

**ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ВСЕРОССИЙСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ
РАСТЕНИЙ ИМЕНИ Н.И. ВАВИЛОВА (ВИР)**

**ТРУДЫ
ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ,
ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ, том 187
выпуск 3**

(основаны Р. Э. Регелем в 1908 г.)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026**

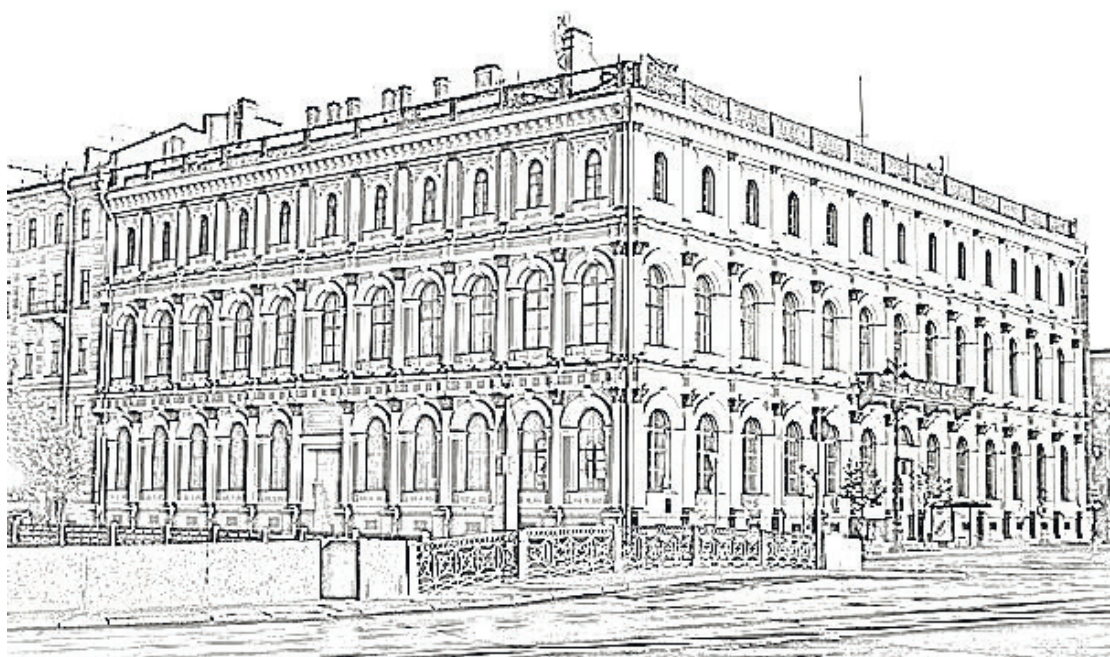
**PROCEEDINGS
ON APPLIED BOTANY, GENETICS
AND BREEDING, vol. 187
issue 3**

(founded by Robert Regel in 1908)

**ST. PETERSBURG
2026**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений
имени Н.И. Вавилова (ВИР)

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR)





Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 - 57455 от 27.03.2014
Учредитель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР)
Адрес учредителя: Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Главный редактор

Хлесткина Елена Константиновна, д-р биол. наук, член-корреспондент РАН (Россия)

Заместители главного редактора

Вишнякова Маргарита Афанасьевна, д-р биол. наук (Россия)

Лоскутов Игорь Градиславович, д-р биол. наук (Россия)

Митрофанова Ольга Павловна, д-р биол. наук (Россия)

Ответственный секретарь

Шипилина Лилия Юрьевна, канд. биол. наук (Россия)

Редакционная коллегия

Анисимова Ирина Николаевна, д-р биол. наук (Россия)
Брач Нина Борисовна, д-р биол. наук (Россия)
Бурляева Марина Олеговна, канд. биол. наук (Россия)
Гавриленко Татьяна Андреевна, д-р биол. наук (Россия)
Голохваст Кирилл Сергеевич, д-р биол. наук, профессор РАН (Россия)
Горина Валентина Милентьевна, д-р с.-х. наук (Россия)
Добровольская Оксана Борисовна, д-р биол. наук (Россия)
Дорофеев Владимир Иванович, д-р биол. наук (Россия)
Думачева Елена Владимировна, д-р биол. наук (Россия)
Зотеева Надежда Мубаровна, д-р биол. наук (Россия)
Зуев Евгений Валерьевич, канд. с.-х. наук (Россия)
Корзун Виктор Николаевич, д-р биол. наук (Германия)
Матвеева Татьяна Валерьевна, д-р биол. наук (Россия)
Медведев Сергей Семенович, д-р биол. наук (Россия)
Мироненко Нина Васильевна, д-р биол. наук (Россия)
Митрофанова Ирина Вячеславовна, д-р биол. наук, член-корреспондент РАН (Россия)
Пороховинова Елизавета Александровна, д-р биол. наук (Россия)
Радченко Евгений Евгеньевич, д-р биол. наук (Россия)
Рашаль Исаак, д-р биол. наук, профессор (Латвия)
Родионов Александр Викентьевич, д-р биол. наук (Россия)
Силантьева Марина Михайловна, д-р биол. наук (Россия)
Соколова Диана Викторовна, канд. биол. наук (Россия)
Солодухина Ольга Владимировна, д-р биол. наук (Россия)
Тихонова Надежда Геннадьевна, канд. биол. наук (Россия)
Ткаченко Кирилл Гаврилович, д-р биол. наук (Россия)
Турусбеков Ерлан Кенесбекович, канд. биол. наук, профессор, академик НАН РК (Казахстан)
Ухатова Юлия Васильевна, канд. биол. наук (Россия)
Филипенко Галина Ивановна, канд. с.-х. наук (Россия)
Хатефов Эдуард Балилович, д-р биол. наук (Россия)
Чухина Ирена Георгиевна, канд. биол. наук (Россия)

Редакционный совет

Афанасенко Ольга Сильвестровна, д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Баталова Галина Аркадьевна, д-р с.-х. наук, академик РАН (Россия)
Бервийе Андре Жан, д-р (Франция)
Бёрнер Андреас, д-р (Германия)
Беспалова Людмила Андреевна, д-р с.-х. наук, академик РАН (Россия)
Голубец Войтех, д-р (Чехия)
Гончаров Николай Петрович, д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Дидерихсен Аксель, д-р (Канада)
Дука Мария Васильевна, д-р биол. наук, профессор, академик АН Молдовы (Молдова)
Еремин Геннадий Викторович, д-р с.-х. наук, академик РАН (Россия)
Кильчевский Александр Владимирович, д-р биол. наук, профессор, академик НАН Беларуси (Беларусь)
Левитин Марк Михайлович – д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Моргунов Алексей Иванович, канд. с.-х. наук (Казахстан)
Муминджанов Хафиз Абдувахобович, д-р биол. наук, профессор (Турция, Таджикистан)
Тихонович Игорь Анатольевич, д-р биол. наук, академик РАН (Россия)
Фризен Николай Вальтерович, д-р биол. наук, профессор (Германия)
Хаммер Карл, д-р, профессор (Германия)

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding

2026 Volume 187 issue 3

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3
<https://elpub.vir.nw.ru>

Scientific Peer-Reviewed Journal
Founded in 1908



Founder: Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR)
Founder's address: 42, 44, Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000, Russia

Editor-in-chief

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Corr. Member of the RAS, Russia

Deputy editor-in-chief

Margarita A. Vishnyakova, Dr. Sci. (Biology), Russia

Igor G. Loskutov, Dr. Sci. (Biology), Russia

Olga P. Mitrofanova, Dr. Sci. (Biology), Russia

Executive secretary

Lilia Yu. Shipilina, Cand. Sci. (Biology), Russia

Editorial board

Irina N. Anisimova, Dr. Sci. (Biology), Russia

Nina B. Brutch, Dr. Sci. (Biology), Russia

Marina O. Burlyaeva, Cand. Sci. (Biology), Russia

Irena G. Chukhina, Cand. Sci. (Biology), Russia

Oxana B. Dobrovolskaya, Dr. Sci. (Biology), Russia

Vladimir I. Dorofeev, Dr. Sci. (Biology), Russia

Elena V. Dumacheva, Dr. Sci. (Biology), Russia

Galina I. Filipenko, Cand. Sci. (Agriculture), Russia

Tatjana A. Gavrilenko, Dr. Sci. (Biology), Russia

Kirill S. Golokhvast, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Russia

Valentina M. Gorina, Dr. Sci. (Agriculture), Russia

Eduard B. Khatefov, Dr. Sci. (Biology), Russia

Viktor N. Korzun, Dr. Sci. (Biology), Germany

Tatyana V. Matveeva, Dr. Sci. (Biology), Russia

Sergey S. Medvedev, Dr. Sci. (Biology), Russia

Nina V. Mironenko, Dr. Sci. (Biology), Russia

Irina V. Mitrofanova, Dr. Sci. (Biology), Corr. Member of the RAS, Russia

Elizaveta A. Porokhovinova, Dr. Sci. (Biology), Russia

Evgeny E. Radchenko, Dr. Sci. (Biology), Russia

Īzaks Rašals, Dr. Sci. (Biology), Professor, Latvia

Aleksandr V. Rodionov, Dr. Sci. (Biology), Russia

Marina M. Silantjeva, Dr. Sci. (Biology), Russia

Diana V. Sokolova, Cand. Sci. (Biology), Russia

Ol'ga V. Soloduhina, Dr. Sci. (Biology), Russia

Nadezhda G. Tikhonova, Cand. Sci. (Biology), Russia

Kirill G. Tkachenko, Dr. Sci. (Biology), Russia

Erlan K. Turuspekov, Cand. Sci. (Biology), Professor, Full Member (Academician) of the NAS RK, Kazakhstan

Yulia V. Ukhatova, Cand. Sci. (Biology), Russia

Nadezhda M. Zoteeva, Cand. Sci. (Biology), Russia

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Russia

Editorial council

Olga S. Afanasenko, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

Galina A. Batalova, Dr. Sci. (Agriculture), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

André Jean Bervillé, Dr., France

Lyudmila A. Bespalova, Dr. Sci. (Agriculture), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

Andreas Börner, Dr., Germany

Axel Diederichsen, Dr., Canada

Maria V. Duca, Dr. Sci. (Biology), Professor, Full Member (Academician) of the Academy of Sciences of Moldova, Republic of Moldova

Gennady V. Eremin, Dr. Sci. (Agriculture), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

Nikolai Friesen, Dr. habil., Professor, Germany

Nikolay P. Goncharov, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

Karl Hammer, Dr., Professor, Germany

Vojtech Holubec (Vojtěch Holubec), Dr., Czech Republic

Alexander V. Kilchevsky, Dr. Sci. (Biology), Professor, Full Member (Academician) of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

Mark M. Levitin, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

Alexey I. Morgounov, Cand. Sci. (Agriculture), Kazakhstan

Hafiz Muminjanov, Dr. Sci. (Biology), Professor, Turkey, Tajikistan

Igor A. Tikhonovich, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia

Ответственные редакторы выпуска: Хлесткина Елена Константиновна, д-р биол. наук, член-корреспондент РАН (Россия),
Соколова Елена Александровна, д-р биол. наук (Россия)
Редактор-переводчик: Крылов Антон Георгиевич (Россия)

Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2026. Т. 187, вып. 3. 262 с.

Изучены хозяйственно ценные признаки линий картирующей популяции льна в полевых условиях Северо-Запада РФ. Проанализированы экологическая пластичность и стабильность коллекционных сортов картофеля в условиях Камчатского края. Рассмотрено влияние эколого-географических факторов на биохимический состав семян у образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным типом роста растений. Исследован качественный и количественный состав антоцианов в линиях-гаплоиндукторах кукурузы с целью повышения точности ДН-технологий. Охарактеризованы видовые особенности компонентного состава эфирного масла в различных органах редких цитрусовых. Проведена диагностика устойчивости к засухе сортов винограда. Оценена урожайность костреца безостого (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) при выращивании на сено в условиях Тюменской области. Выявлено влияние размеров семян на прорастание, рост растений и урожайность кок-сагыза. Обсуждаются принципы структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР. Выделены российские сорта картофеля, отличающиеся одновременно высоким адаптивным потенциалом и высокой товарной урожайностью. Отслежен биохимический состав семян нигеллы (*Nigella* L.), выращенных в условиях Северо-Запада РФ. Показаны генетическое разнообразие и наследование маркерной системы третьего экзона *StAN1 Solanum tuberosum* L. С использованием SSR-генотипирования охарактеризован генетический полиморфизм образцов свеклы (*Beta vulgaris* L.) из коллекции ВИР. Представлены: новый сорт лапчатки белой (*Potentilla alba* L.) 'Снежка' селекции ВИЛАР и новый районированный сорт *Prunus domestica* L. – 'Венгерка Курсакова'. Проведена сравнительная оценка сортов и линий озимой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) в условиях Ростовской области. Усовершенствована методика отбора озимой мягкой пшеницы в Нижнем Поволжье с целью оптимизации селекционного процесса. Среди образцов яблони генетической коллекции ФАНЦА с использованием ДНК-маркеров MD-AC01 и MD-ACS1 выделены доноры сниженного биосинтеза этилена. Отобраны перспективные линии мягкой пшеницы, созданные с участием *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. Выявлена спонтанная гибридизация в секции *Rhizirideum* рода *Allium* на примере *Allium nutans* и *A. spirale*. Оценена устойчивость перспективных образцов картофеля к цистообразующим нематодам и раку картофеля. Изучена вирулентность краснодарской и дагестанской популяций *Puccinia hordei* Otth.

Для ресурсоведов, ботаников, генетиков, селекционеров, преподавателей вузов биологического и сельскохозяйственного профиля.

ISSN 2227-8834 (Print)
ISSN 2619-0982 (Online)

© Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 2026

Editors in charge of this issue: Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Corr. Member of the RAS, Russia, Elena A. Sokolova, Dr. Sci. (Biology), Russia
Editor/Translator: Anton G. Krylov, Russia

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding / N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. St. Petersburg : VIR, 2026. Vol. 187, iss. 3. 262 p.

Agronomic characters have been examined in flax lines from a mapping population grown under field conditions in Northwest Russia. Environmental plasticity and stability indicators have been analyzed in the accessions of potato cultivars and hybrids under the conditions of Kamchatka Territory. *Vigna unguiculata* (L.) Walp. seeds from accessions of different plant growth types have been tested for the effect of ecogeographic factors on their biochemical composition. The qualitative and quantitative composition of anthocyanins has been investigated in maize haploid inducer lines to improve the accuracy of DH technologies. Various organs of rare citrus fruits have been characterized for species-specific features in the component composition of essential oil. Drought resistance of grapevine cultivars has been diagnosed. Yield assessment has been performed for awnless brome grass (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) grown for hay in Tyumen Province. Effects of seed size on seed germination, plant growth, and yield have been ascertained for kok-saghyz. Principles of structuring VIR's spring bread wheat collection are discussed. Russian potato cultivars combining high adaptive potential with good commercial yield have been identified. Biochemical composition of nigella (*Nigella* L.) seeds has been evaluated under the conditions of Russian Northwest. Genetic diversity and inheritance of the marker system in the third exon of *StAN1* in *Solanum tuberosum* L. are described. SSR markers have been used for genotyping and assessment of the genetic polymorphism in beet (*Beta vulgaris* L.) accessions from the VIR collection. Presentations are made for 'Snezhka', a new cultivar of white cinquefoil (*Potentilla alba* L.) released by VILAR, and 'Vengerka Kursakova', a new approved cultivar of *Prunus domestica* L. Comparative evaluation has been conducted among winter durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars and lines in Rostov Province. Winter bread wheat breeding methods have been optimized for the Lower Volga region. Donors of reduced ethylene biosynthesis have been identified among apple-tree accessions in the genetic collection of the Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies using the MD-ACO1 and MD-ACS1 molecular markers. Promising bread wheat lines produced with the use of *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch have been selected. Spontaneous hybridization has been found in *Allium* sect. *Rhizirideum* through a case study of *Allium nutans* and *A. spirale*. Promising potato cultivars have been assessed for resistance to cyst-forming nematodes and wart. The Krasnodar and Dagestan populations of *Puccinia hordei* Otth. have been tested for their virulence.

Addressed to genetic resources experts, geneticists, plant breeders, and lecturers of biological and agricultural universities and colleges.

ISSN 2227-8834 (Print)
ISSN 2619-0982 (Online)

© Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Брач Н.Б., Щедрина З.А., Матвиенко И.И. Хозяйственно ценные признаки линий картирующей популяции льна в полевых условиях Северо-Запада РФ	9
Иващенко А.Д., Хасбиуллина О.И. Анализ экологической пластичности и стабильности коллекционных сортов картофеля в условиях Камчатского края	18
Исламова Р.Т., Бурляева М.О., Крылова Е.А., Попов В.С., Герасимова Т.В., Шеленга Т.В. Влияние эколого-географических факторов на биохимический состав семян образцов <i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp. с разным типом роста растений	27
Карлов А.В., Ульянов А.В., Соловьева А.Е., Хатевов Э.Б., Курина А.Б. Исследование качественного и количественного состава антоцианов в линиях-гаплоиндукторах кукурузы с целью повышения точности ДН-технологий	43
Кулян Р.В., Бехтерев В.Н., Белоус О.Г. Видовые особенности компонентного состава эфирного масла в различных органах редких цитрусовых	60
Нилов Н.Г., Рыфф И.И., Березовская С.П., Стаматиди В.Ю., Попова М.С., Волынкин В.А., Лиховской В.В. Диагностика устойчивости к засухе сортов винограда	70
Феоктистова Н.А. Урожайность костреца безостого (<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub) при выращивании на сено в условиях Тюменской области	84
Шень Г., Чжоу Л., Чжан В., Чжэн Ф., Юй Ч., Ян И., Конькова Н.Г. Влияние размеров семян на прорастание, рост растений и урожайность кок-сагыза	94

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Зуев Е.В. Принципы структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР	102
Мальцев С.В., Шабанов А.Э., Абросимов Д.В. Оценка адаптивных свойств российских сортов картофеля (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	116
Осипова Г.С., Салих Р.Х., Курина А.Б. Биохимический состав семян нигеллы (<i>Nigella</i> L.), выращенных в условиях Северо-Запада РФ	129

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Фисенко П.В., Ким И.В., Мацишина Н.В. Генетическое разнообразие и наследование маркерной системы третьего экзона <i>StAN1 Solanum tuberosum</i> L.	139
Хакимов М.Б., Соколова Д.В., Салина Е.А. SSR-генотипирование и оценка генетического полиморфизма образцов свеклы (<i>Beta vulgaris</i> L.) из коллекции ВИР	152

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Аникина А.Ю., Тхаганов В.Р., Тропина Н.С., Тхаганов Р.Р. Новый сорт лапчатки белой (<i>Potentilla alba</i> L.) 'Снежка' селекции ВИЛАР	166
Богданов Р.Е. Новый районированный сорт <i>Prunus domestica</i> L. – 'Венгерка Курсакова'	173
Дубинина О.А., Ковтунова Н.А., Иванисова А.С. Сравнительная оценка сортов и линий озимой твердой пшеницы (<i>Triticum durum</i> Desf.) в условиях Ростовской области	180
Лящева С.В., Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н., Сергеева А.И., Заворотина А.Д. Аспекты оптимизации селекционного процесса озимой мягкой пшеницы в Нижнем Поволжье	192

Троско Е.С., Колтунова А.М., Гунина Ю.С., Куцев М.Г.

Выделение доноров сниженного биосинтеза этилена среди образцов яблони генетической коллекции ФАНЦА с использованием ДНК-маркеров MD-AC01 и MD-ACS1 202

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ
И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ**

Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Фитилева З.Е., Фисенко А.В., Андреева Л.В.

Интрогрессивные линии мягкой пшеницы, созданные с участием *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. 218

Синицына Т.А., Скапцов М.В., Уварова О.В., Куцев М.Г., Смирнов С.В.

Спонтанная гибридизация в секции *Rhizirideum* рода *Allium* на примере *Allium nutans* и *A. spirale* 234

Худякова А.В., Князева Э.А.

Оценка устойчивости перспективных образцов картофеля к цистообразующим нематодам и раку картофеля 245

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Данилова А.В., Волкова Г.В., Кудинова О.А.

Вирулентность краснодарской и дагестанской популяций *Puccinia hordei* Otth. 255

CONTENTS

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Brutch N.B., Shchedrina Z.A., Matvienko I.I. Agronomic characters of flax lines from a mapping population grown under field conditions in Northwest Russia	9
Ivashchenko A.D., Khasbiullina O.I. Analysis of environmental plasticity and stability in the accessions of potato cultivars and hybrids under the conditions of Kamchatka Territory	18
Islamova R.T., Burlyaeva M.O., Krylova E.A., Popov V.S., Gerasimova T.V., Shelenga T.V. The effect of ecogeographic factors on the biochemical composition of <i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp. seeds from accessions of different plant growth types	27
Karlov A.V., Ulianov A.V., Solovyeva A.E., Khatefov E.B., Kurina A.B. Investigating the qualitative and quantitative composition of anthocyanins in maize haploid inducer lines to improve the accuracy of DH technologies	43
Kulyan R.V., Bekhterev V.N., Belous O.G. Species-specific features in the component composition of essential oil in various organs of rare citrus fruits	60
Nilov N.G., Ryff I.I., Berezovskaya S.P., Stamatidi V.Yu., Popova M.S., Volynkin V.A., Likhovskoi V.V. Diagnostics of drought resistance in grapevine cultivars	70
Feoktistova N.A. Yield of awnless brome grass (<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub) when grown for hay in Tyumen Province	84
Shen G., Zhou L., Zhang W., Zheng F., Yu Z., Yang Y., Kon'kova N.G. Effects of seed size on seed germination, plant growth, and yield of kok-saghyz	94

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Zuev E.V. Principles of structuring VIR's spring bread wheat collections	102
Maltsev S.V., Shabanov A.E., Abrosimov D.V. Assessment of adaptive properties in Russian potato cultivars (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	116
Osipova G.S., Salih R.H., Kurina A.B. Biochemical composition of nigella (<i>Nigella</i> L.) seeds grown in the Northwest of Russia	129

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Fisenko P.V., Kim I.V., Matsishina N.V. Genetic diversity and inheritance of the marker system in the third exon of <i>StAN1</i> in <i>Solanum tuberosum</i> L.	139
Khakimov M.B., Sokolova D.V., Salina E.A. Genotyping with SSR markers and assessment of the genetic polymorphism in beet (<i>Beta vulgaris</i> L.) accessions from the VIR collection	152

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Anikina A.Yu., Thaganov V.R., Tropina N.S., Thaganov R.R. 'Snezhka': a new cultivar of white cinquefoil (<i>Potentilla alba</i> L.) released by VILAR	166
Bogdanov R.E. 'Vengerka Kursakova': a new approved cultivar of <i>Prunus domestica</i> L.	173
Dubinina O.A., Kovtunova N.A., Ivanisova A.S. Comparative evaluation of winter durum wheat (<i>Triticum durum</i> Desf.) cultivars and lines in Rostov Province	180
Lyashcheva S.V., Kulevatova T.B., Zlobina L.N., Sergeeva A.I., Zavorotina A.D. Optimization aspects in the process of winter bread wheat breeding in the Lower Volga region	192
Trosko E.S., Koltunova A.M., Gunina J.S., Kutsev M.G. Identifying donors of reduced ethylene biosynthesis among apple-tree accessions in the genetic collection of the Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies using the MD-ACO1 and MD-ACS1 molecular markers	202

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Druzhin A.E., Sibikeev S.N., Fitileva Z.E., Fisenko A.V., Andreeva L.V.

Introgressive bread wheat lines produced with the use of *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. 218

Sinitsyna T.A., Skaptsov M.V., Uvarova O.V., Kutsev M.G., Smirnov S.V.

Spontaneous hybridization in *Allium* sect. *Rhizirideum*: case study of *Allium nutans* and *A. spirale* 234

Khudyakova A.V., Knyazeva E.A.

Assessing resistance of promising potato cultivars to cyst-forming nematodes and wart 245

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Danilova A.V., Volkova G.V., Kudinova O.A.

Virulence of the Krasnodar and Dagestan populations of *Puccinia hordei* Otth. 255

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 633.52:575

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o21



Хозяйственно ценные признаки линий картирующей популяции льна в полевых условиях Северо-Запада РФ

Н. Б. Брач, З. А. Щедрина, И. И. Матвиенко

*Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия***Автор, ответственный за переписку:** Нина Борисовна Брач, n.brutch@vir.nw.ru

Актуальность. Выращивание льна (*Linum usitatissimum* L.) в широком диапазоне географических широт сформировало генотипы, различающиеся по скороспелости и фоточувствительности. Из гибрида между фоточувствительной линией с геном белоцветковости (*wf1wf1*), ассоциированным с ранним цветением, и слабо фоточувствительной линией с красно-фиолетовыми венчиками (*sfc3-2sfc3-2*, *sfc6sfc6*) выделили 203 линии, различающиеся по этим генам и признакам для дальнейшего анализа.

Материалы и методы. Хозяйственные признаки линий 3 года оценивали в полевых условиях длинного дня Ленинградской области с использованием корреляционного и дисперсионного анализов.

Результаты и заключение. Установлено, что большинство белоцветковых линий сохранили связь гена *wf1* с ранним цветением и зацветают раньше линий с цветными венчиками. Однако выявились раноцветущие линии с красно-фиолетовыми цветками и белоцветковые поздноцветущие, возникшие в результате кроссинговера. Доля влияния генотипа на время цветения линий *WF1WF1* была в два раза выше, чем в группе *wf1wf1*. В среднем белоцветковые линии имеют меньше листьев, но диапазон разнообразия этого признака совпадает с его изменчивостью у линий с окрашенными лепестками. Кроме того, их генотип сильнее влияет на образование листьев, чем у линий с окрашенными лепестками, особенно в неблагоприятных условиях. Высота стебля до первой коробочки растений *wf1wf1* на 80% зависит от генотипа, а растений *WF1WF1* – только на 40%. Вероятно, с этим геном сцеплены не только гены, определяющие время цветения, но и контролирующие высоту растений.

Ключевые слова: *Linum usitatissimum* L., сроки цветения, корреляции, окраска лепестков, влияние условий выращивания

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0005 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования».

Для цитирования: Брач Н.Б., Щедрина З.А., Матвиенко И.И. Хозяйственно ценные признаки линий картирующей популяции льна в полевых условиях Северо-Запада РФ. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):9-17. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o21

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o21

Agronomic characters of flax lines from a mapping population grown under field conditions in Northwest Russia

Nina B. Brutch, Zoya A. Shchedrina, Inna I. Matvienko

N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Nina B. Brutch, n.brutch@vir.nw.ru

Background. Flax *Linum usitatissimum* L. is an important industrial crop cultivated in a wide range of climate conditions and geographic latitudes, thus inducing the evolution of genotypes with varying earliness, photosensitivity, and other characters. Two flax lines differing in photosensitivity, flowering schedule, and leaf number were selected from VIR's genetic collection of flax. An early-flowering highly photosensitive line with white flowers, controlled by the *wf1* gene, was crossed with a late-flowering line with red-violet petals, controlled by *sfc3-2sfc3-2* and *sfc6sfc6*. From this hybrid, 203 self-pollinated lines of the 6th generation were selected. They differed in petal color, photosensitivity, and other characters.

Materials and methods. Three years of field evaluation under long-day conditions in Leningrad Province (60°N) discovered the association of the *wf* gene with other characters, and the effect of variable weather conditions on plant growth (flowering time, number of leaves, and plant height).

Results. Variance and correlation analyses showed that most lines preserved the association of the *wf1* gene with early flowering and bloom on average 4–6 days earlier than lines with colored corollas. However, some early-blooming lines with red-purple flowers, and also white-flowered late-blooming lines were identified, which possibly resulted from a chromosomal crossover. Furthermore, the size of the genotype's effect on flowering time in the *WF1WF1* lines was twice as high as in the *wf1wf1* group. On average, white-flowered lines had fewer leaves, but the range of diversity for this character coincided with the variability displayed in lines with colored petals. In addition, their genotypes had a greater effect on leaf formation than those of lines with colored petals, especially under unfavorable conditions. Plants height to the first boll of the *wf1wf1* plants depended on the genotype by 80%, and in the *WF1WF1* plants by only 40%. It is likely that this gene is linked not only to genes affecting flowering time but also to those for plant height.

Keywords: *Linum usitatissimum* L., flowering time, correlations, petal color, growing conditions' effect

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0005 "Plant resources of oil and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical utilization".

For citation: Brutch N.B., Shchedrina Z.A., Matvienko I.I. Agronomic characters of flax lines from a mapping population grown under field conditions in Northwest Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):9-17. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o21

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Культурный лен *Linum usitatissimum* L. выращивают в широком диапазоне северных и южных широт, а также на разной высоте над уровнем моря. Формирование такого большого ареала распространения вида невозможно без разнонаправленной эволюции систем приспособления к широкому спектру условий, связанных с годовыми циклами изменения как температуры воздуха, так и продолжительности дня и ночи. Долгое время считали, что лен исключительно длиннодневное растение (Sizov, 1955). Однако позже было описано значительное внутривидовое разнообразие по чувствительности к сокращенному (12-часовому – продолжительность дня на экваторе) дню (Brutch et al., 2008; etc.). Другие хозяйственно ценные признаки льна, такие как высота растений, структура соцветия, толщина стебля, строение лубяных пучков в стебле и прочие, тоже оказались зависимыми от фотопериода, однако разные генотипы по-разному реагировали на его изменение (Domantovich et al., 2011, 2012). Позднее было установлено, что длина дня также влияет и на взаимосвязи между признаками льна (Brutch et al., 2015; Pavlov et al., 2018).

Изучение наследования продолжительности межфазного периода «всходы – цветение» у льна показало, что ген *wf1*, контролирующий в гомозиготе белую окраску лепестков (Porokhovina, 2000) у сильно фоточувствительной линии гк-109 из генетической коллекции ВИР, связан с ранним переходом к цветению, но только в условиях длинного дня (Brutch et al., 2019). Для анализа наследования продолжительности периода «всходы – цветение» она была скрещена с поздноцветущей, но слабо фоточувствительной линией гк-375, имеющей красно-фиолетовые цветки *sfc3-2sfc3-2*, *sfc6sfc6* (Porokhovina, 2011). Анализ наследования продолжительности периода «всходы – цветение» во втором поколении, проведенный с использованием компьютерной программы А. Ф. Мережко для количественных признаков (Merezhko, 2005), показал, что время цветения ассоциировано с числом листьев на стебле, которое считается физиологическим индикатором продолжительности периода «всходы – цветение» (Obraztsov, 1975), и эти признаки контролируются близкими генетическими системами, однако в нашем исследовании данная связь проявлялась только на длинном дне. Кроме того, на коротком дне не зафиксирована связь между временем цветения и окраской лепестков. Эти результаты позволили предположить, что при разных режимах освещения активны разные группы генов льна (Brutch et al., 2019). В дальнейшем на основе описанного гибрида с использованием самоопыления и индивидуального отбора были созданы 203 линии 6-го поколения инбридинга, различающиеся по окраске лепестков (белые, красно-фиолетовые, сине-фиолетовые, голубые), продолжительности периода «всходы – цветение», числу листьев на стебле и чувствительности к фотопериоду (Brutch et al., 2019).

Данная статья посвящена анализу взаимосвязи проявления хозяйственных признаков льна с окраской лепестков по результатам полевого изучения описанных линий картирующей популяции (КП), а именно: по продолжительности межфазного периода «всходы – цветение», числу листьев на стебле, сумме накопленных положительных температур в период от всходов до цветения, а также высоте растений до первой коробочки.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили 203 линии 6-го поколения инбридинга картирующей популяции (КП), созданной на базе расщепляющегося гибрида второго поколения между линиями генетической коллекции льна ВИР: ГК-109 аргентинского происхождения, белоцветковой (несущей в гомозиготе рецессивный ген *wf1*) (Porokhovina, 2011), раноцветущей, сильно фоточувствительной, и ГК-375 египетского происхождения (фиолетовоцветковой, несущей в гомозиготе гены *sfc3-2* и *sfc6*), поздноцветущей, слабо фоточувствительной, а также исходные родительские линии гибрида. Популяция содержит 69 белоцветковых линий (*wf1wf1*), 75 красно-фиолетовых (*sfc3-2sfc3-2*), 38 сине-фиолетовых (*sfc6sfc6*) и 20 – дикого типа. Линии картирующей популяции различаются по продолжительности фаз вегетационного периода и фоточувствительности. Все линии были посеяны в 2018–2020 гг. по одному ряду единым массивом на грядах шириной один метр с междурядьями восемь сантиметров на полях научно-производственной базы (НТБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» в Ленинградской области. Расположение посева на 60°N обеспечивает длинный световой день, достигающий максимума 18 ч 50 мин 22 июня.

Погодные условия трех лет изучения фиксировали на метеостанции, непосредственно находящейся в поле. Помимо данных о температуре воздуха и суммы осадков, для анализа полученных результатов использовали гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) – отношение суммы осадков к сумме активных температур (выше +10°C) за тот же период, уменьшенное в 10 раз (Obyedkov, 1994). Для льна, в зависимости от фазы развития, наиболее благоприятные значения ГТК составляют от 1,1 до 1,3. Коэффициент более 1,6 указывает на избыточное увлажнение. Погодные условия разных лет значительно отличались друг от друга. 2018 г. был самым теплым и сухим (в период с мая по август средняя температура воздуха составила 16,1°C, а сумма осадков – 166 мм). Обильные осадки в начале мая способствовали дружному прорастанию семян. Однако затем они прекратились, и ГТК на протяжении почти всей вегетации растений был меньше 1. Снова дожди пошли только в июле. Лето 2019 г. оказалось самым неблагоприятным для выращивания льна. Ранняя весна привела к быстрому таянию снежного покрова и подсыханию пахотного слоя почвы уже в апреле. Однако май оказался холодным и сырым, что сильно задержало прорастание льна (в период с мая по август средняя температура воздуха составила 15,1°C, а сумма осадков – 196 мм). Середина мая 2020 г. характеризовалась холодной дождливой погодой. Но затем на протяжении почти всего вегетационного периода осадков было недостаточно, и ГТК держался на уровне ≈ 1 (в период с мая по август средняя температура воздуха составила 14,4°C, а сумма осадков – 347 мм) (табл. 1).

В 2018 г. посев был произведен 9 мая, в 2019 г. – 27 апреля, в 2020 г. – 2 мая. Полные всходы были зафиксированы соответственно 15, 12 и 11 мая.

В период вегетации для каждой линии фиксировали даты полных всходов и полного цветения (Kutuzova, Pitko, 1988). Уборку производили в фазу ранней желтой спелости. Среди растений каждой линии для дальнейшего изучения отбирали по три типичных растения из середины рядка. У отобранных растений определяли высоту до первой коробочки (наименее варьирующий под влиянием внешних условий показатель размера растения)

Таблица 1. Характеристика погодных условий 2018–2020 гг. на опытном поле в Ленинградской области
Table 1. Characterization of weather conditions in 2018–2020 (Leningrad Province)

Месяц / Month	Декада / Ten-day period	2018			2019			2020		
		Средняя t °C / Mean t °C	Сумма осадков / Precipitation	ГТК / НТС	Средняя t °C / Mean t °C	Сумма осадков / Precipitation	ГТК / НТС	Средняя t °C / Mean t °C	Сумма осадков / Precipitation	ГТК / НТС
май	I дек.	10,2	18,7	1,8	8,0	36,4	10,6	10,2	5,9	1,7
май	II дек.	15,7	11,2	0,7	13,6	8,8	0,6	7,5	50,8	5,6
май	III дек.	14,2	0,0	0,0	13,1	34,2	2,4	11,3	4,6	1,1
июнь	I дек.	12,5	3,0	0,2	18,9	24,1	1,3	15,5	28,8	1,1
июнь	II дек.	16,9	3,2	0,2	17,1	2,1	0,1	19,0	29,8	1,0
июнь	III дек.	15,9	10,4	0,7	17,0	7,7	0,5	19,2	8,2	1,0
июль	I дек.	13,9	32,7	2,4	15,0	21,3	1,4	16,3	20,5	1,0
июль	II дек.	21,8	1,9	0,1	14,8	33,8	2,3	16,8	18,3	1,0
июль	III дек.	21,7	32,1	1,3	17,5	2,9	0,2	15,3	51,8	0,9
август	I дек.	21,3	4,3	0,2	13,6	3,3	0,2	17,3	15,8	1,0
август	II дек.	16,0	22,1	1,4	16,2	5,2	0,3	14,5	0,0	1,0
август	III дек.	13,1	26,5	1,8	16,4	16,4	0,9	15,2	81,4	0,9

и число листьев на стебле. Для анализа полученных данных использовали корреляционный и дисперсионный анализы в программе Excel для Windows, 2016.

Результаты и обсуждение

Влияние погодных условий на рост и развитие растений льна проявилось уже в период прорастания. Несмотря на ранний посев (27 апреля), в 2019 г. полные всходы появились только на 15-й день, так как, невзирая на раннюю весну, начало мая оказалось в среднем на 2 градуса холоднее, чем в 2018 и 2020 г. (см. табл. 1). Эта задержка, а также постоянные изменения ГТК (см. табл. 1) оказали большое негативное влияние на дальнейший рост и развитие растений.

В 2018 г. раньше всех зацвели четыре белоцветковые линии и две линии КП-6 и КП-179 с красно-фиолетовыми цветками. У них период «всходы – цветение» составил 35–37 дней. В 2019 и 2020 г. выделившиеся в 2018 г. по раннему цветению линии подтвердили свой статус и за-

цветали одновременно с раноцветущим родителем – на 35–36-й день в 2019 г. и на 38–39-й день – в 2020 г. В 2018 г. семь самых поздноцветущих линий зацвели на 56–57-й день после всходов вместе с поздноцветущим родителем. Две из них имели белые цветки: КП-169 и КП-174. В последующие годы они также зацветали поздно (табл. 2).

Тот факт, что среди раноцветущих линий оказались растения с окрашенными лепестками, и наоборот – среди поздноцветущих есть генотипы с рецессивными аллелями гена белоцветковости, подтверждает предположение о том, что в процессе создания популяции произошел кроссинговер между геном, определяющим белый цвет венчика, и геном (возможно, блоком генов), отвечающим за время цветения (Brutch et al., 2019). Однако анализ с использованием t-критерия подтвердил, что в целом ассоциация белоцветковости с ранним цветением в условиях естественного длинного дня сохранилась (табл. 3). В то же время обращает на себя внимание тот факт, что коэффициент вариации сроков цветения среди

Таблица 2. Наиболее рано- и поздноцветущие в условиях длинного дня линии картирующей популяции льна
Table 2. The earliest and latest flowering lines of the flax mapping population under long-day conditions

Раноцветущие линии картирующей популяции / Early-flowering lines		Поздноцветущие линии картирующей популяции / Late-flowering lines	
Лепестки белые / White petals	Лепестки окрашены / Colored petals	Лепестки белые / White petals	Лепестки окрашены / Colored petals
КП-129, КП-131, КП-139, КП-199	КП-6, КП-179	КП-169, КП-174	КП-46, КП-47, КП-79, КП-156, КП-166, КП-176, КП-178

Таблица 3. Сравнение продолжительности межфазного периода «всходы – цветение» у линий картирующей популяции с различной окраской венчика**Table 3. Comparison of the germination-to-flowering period duration in the lines with different corolla colors**

Среднее значение, размах изменчивости и коэффициент вариации продолжительности периода «всходы – цветение» (сутки) / Mean value, variability range, and variation coefficient for the duration of the germination-to-flowering period (days)			t-критерий / t-test
Год / Year	Белый венчик / White petals	Окрашенный венчик / Colored petals	
2018	44,5 (36–57) CV = 11,7	47,3 (35–57) CV = 8,8	3,84*
2019	36,5 (30–42) CV = 6,7	37,3 (30–42) CV = 4,5	2,55*
2020	43,5 (39–47) CV = 4,9	44,4 (38–48) CV = 3,9	3,84*

Примечание: * – различия значимы при $P_0 < 0,05$ Note: * – the differences are significant at $P_0 < 0.05$

белоцветковых линий во все годы испытаний был выше, чем в группе линий с окрашенными лепестками.

Ассоциация количества листьев на стебле с окраской лепестков проявилась в 2018 и 2020 г., но в 2019 г. она была статистически незначимой. Низкие температуры весны 2019 г. значительно замедлили прорастание семян. В дальнейшем это привело к ускоренному прохождению межфазного периода «всходы – цветение», сокращению общего количества листьев на стебле и размаха изменчивости этого признака среди линий картирующей популяции, что выразилось в относительном сни-

жении вариации этого признака среди белоцветковых линий по сравнению с остальными (табл. 4).

Анализ корреляций между сроками начала цветения и количеством листьев на стебле показал, что их сила зависит от погодных условий конкретного года выращивания (табл. 5). Длительное прорастание семян в 2019 г. привело к ослаблению связи между продолжительностью периода «всходы – цветение» и числом листьев на стебле у всех групп линий. Несмотря на то что почти все корреляции были статистически значимыми из-за большого количества проанализированных линий, сила

Таблица 4. Сравнение числа листьев на стебле у линий картирующей популяции с различной окраской венчика**Table 4. Comparison of the leaf number on the stem in the lines with different corolla colors from the mapping population**

Среднее значение и размах изменчивости числа листьев на стебле (штуки) / Mean value, and variability range for the leaf number on the stem (pcs.)			t-критерий / t-test
Год / Year	Белый венчик / White petals	Окрашенный венчик / Colored petals	
2018	70,2 (48–97) CV = 17,0	76,6 (48–97) CV = 13,1	3,84*
2019	56,9 (40–77) CV = 13,1	58,3 (33–78) CV = 14,4	1,28
2020	66,8(48–87) CV = 12,8	70,2 (45–90) CV = 9,6	2,77*

Примечание: * – различия значимы при $P_0 < 0,05$ Note: * – the differences are significant at $P_0 < 0.05$ **Таблица 5. Корреляции между продолжительностью межфазного периода «всходы – цветение» и числом листьев на стебле у линий картирующей популяции в различные годы испытаний****Table 5. Correlations between the germination-to-flowering period duration and leaf number on the stem in the lines of the mapping population in different years of the experiment**

Год / Year	Все линии / All lines	Линии с белым венчиком / Lines with white petals	Линии с окрашенным венчиком / Lines with colored petals
2018	0,74*	0,76*	0,67*
2019	0,25*	0,33*	0,17
2020	0,69*	0,69*	0,67*

Примечание: * – корреляции значимы при $P_0 < 0,05$ Note: * – the correlations are significant at $P_0 < 0.05$

связи между временем цветения и количеством листьев у линий с окрашенными лепестками оказалась ниже критического значения.

Так как сроки цветения в значительной мере зависят от температуры воздуха и увлажненности почвы, проанализированы связи между суммами накопленных за период «всходы – цветение» положительных температур, с одной стороны, и продолжительностью самого этого периода, а также числа листьев на стебле – с другой стороны (табл. 6). Корреляций суммы выпадавших осадков с другими изученными признаками обнаружено не было.

лись генотипом и только на 13% – погодными условиями. Количество листьев на стебле у этих линий на 45% зависело от условий выращивания и только на треть – от генотипа. Случайное варьирование числа листьев на стебле составило не более 21%, а продолжительности периода «всходы – цветение» еще меньше – 13–15%.

Однако анализ, проведенный без учета данных, полученных в аномальном по погодным условиям фазы прорастания 2019 г., показал другие результаты (табл. 8). Основное влияние как на сроки цветения, так и на количество листьев на стебле оказывали генотипы линий, особенно сильным это влияние было среди белоцвет-

Таблица 6. Среднее значение и размах изменчивости суммы накопленных положительных температур за межфазный период «всходы – цветение» у линий картирующей популяции и их корреляции с продолжительностью периода «всходы – цветение» и числом листьев на стебле

Table 6. Mean values and variability ranges for the sum of accumulated positive temperatures during the germination-to-flowering period in the lines of the mapping population, and their correlations with the duration of the germination-to-flowering period and the number of leaves on the stem

Год / Year	Суммы накопленных положительных температур / Sum of accumulated positive temperatures	Признаки, коррелирующие с суммой положительных температур / Characters correlated with the sum of accumulated positive temperatures	Все линии / All lines	Линии с белым венчиком / Lines with white petals	Линии с окрашенным венчиком / Lines with colored petals
2018	696 (518-854)	Период «всходы – цветение» / Germination-to-flowering period	0,99*	0,99*	1,00*
		Число листьев / Leaf number	0,73*	0,75*	0,67*
2019	578 (475-686)	Период «всходы – цветение» / Germination-to-flowering period	0,92*	0,98*	0,87*
		Число листьев / Leaf number	0,27*	0,33*	0,18
2020	624 (511-706)	Период «всходы – цветение» / Germination-to-flowering period	1,00*	1,00*	1,00*
		Число листьев / Leaf number	0,68*	0,68*	0,66*

Примечание: * – корреляции значимы при $P_0 < 0,05$

Note: * – the correlations are significant at $P_0 < 0.05$

В 2018 и 2020 г. связь продолжительности периода «всходы – цветение» с суммой накопленных положительных температур была абсолютной во всех группах линий. Данный результат указывает на то, что в благоприятных условиях продолжительность периода «всходы – цветение» практически полностью зависит от температуры воздуха. В 2019 г. эта связь несколько ослабла, особенно у линий с окрашенным венчиком. Корреляция температуры воздуха с количеством листьев на стебле была слабее и в 2019 г. оказалась незначимой у линий с окрашенными венчиками.

Дисперсионный анализ сроков цветения и количества листьев на стебле за все три года испытаний показал, что и генотип линии, и погодные условия выращивания достоверно влияют на оба эти признака (табл. 7). У линий с белым венчиком продолжительность периода «всходы – цветение» наполовину зависела от условий года и только на 36% – от генотипа. А число листьев на стебле, наоборот, наполовину определялось генотипом, и на треть – погодными особенностями. Сроки цветения линий с окрашенными венчиками почти на ¾ определя-

емых форм: 76,9% – на время цветения и 86,1% – на число листьев на стебле. А погодные условия достоверно повлияли на количество листьев только в группе линий с окрашенным венчиком и за счет этого на всю выборку в целом. Это согласуется с данными о том, что корреляции между временем цветения и числом листьев на стебле были выше именно в группе белоцветковых линий даже в аномальном 2019 г.

Одним из основных хозяйственно ценных признаков льна является высота растений. Подробное изучение структуры растения включает в себя определение общей и технической высот, однако эти характеристики в значительной степени зависят от условий выращивания и случайного варьирования. Наиболее стабильным признаком является высота растения до первой коробочки, так как на нее не влияет степень ветвления соцветия. В нашем исследовании растения с окрашенным венчиком были статистически достоверно примерно на 2 сантиметра выше, чем белоцветковые. Однако в неблагоприятном 2019 г. эти различия не достигли уровня значимости (табл. 9).

Таблица 7. Доля влияния генотипа линии и условий года выращивания на продолжительность межфазного периода «всходы – цветение» и число листьев на стебле по результатам трехлетних испытаний (2018–2020 гг.)

Table 7. The effect size of the influence of the line's genotype and the year's growing conditions on the duration of the germination-to-flowering period and the number of leaves on the stem, based on the results of three-year tests (2018–2020)

	Все линии / All lines		Линии с белым венчиком / Lines with white petals		Линии с окрашенным венчиком / Lines with colored petals	
	Период «всходы – цветение» / Germination- to-flowering period	Число листьев / Leaf number	Период «всходы – цветение» / Germination- to-flowering period	Число листьев / Leaf number	Период «всходы – цветение» / Germination- to-flowering period	Число листьев / Leaf number
Генотип / Genotype	27,15*	41,18*	36,30*	52,64*	72,13*	33,54*
Условия / Conditions	60,40*	38,04*	49,75*	27,81*	13,13*	45,51*
Случайное отклонение / Random deviation	12,45	20,78	13,95	19,56	14,73	20,95

Примечание: * – влияние фактора значимо при $P_0 < 0,05$

Note: * – the factor's effect is significant at $P_0 < 0.05$

Таблица 8. Доля влияния генотипа линии и условий года выращивания на продолжительность межфазного периода «всходы – цветение» и число листьев на стебле по результатам испытаний 2018 и 2020 г.

Table 8. The effect size of the influence of the line's genotype and the year's growing conditions on the duration of the germination-to-flowering period and the number of leaves on the stem, based on the results of the 2018 and 2020 tests

	Все линии / All lines		Линии с белым венчиком / Lines with white petals		Линии с окрашенным венчиком / Lines with colored petals	
	Период «всходы – цветение» / Germination- to-flowering period	Число листьев / Leaf number	Период «всходы – цветение» / Germination- to-flowering period	Число листьев / Leaf number	Период «всходы – цветение» / Germination- to-flowering period	Число листьев / Leaf number
Генотип / Genotype	70,69*	78,12*	76,89*	86,10*	63,00*	70,70*
Условия / Conditions	9,51	7,36*	2,44	2,72	17,51	12,23*
Случайное отклонение / Random deviation	19,80	14,57	20,67	11,18	19,49	17,08

Примечание: * – влияние фактора значимо при $P_0 < 0,05$

Note: * – the factor's effect is significant at $P_0 < 0.05$

Несмотря на небольшие различия средних значений высоты растений в группах с разной окраской венчика, дисперсионный анализ влияния генотипа и условий года выращивания на высоту растений по результатам трехлетнего изучения показал достовер-

ное влияние как генотипа линий, так и условий выращивания на высоту растений до первой коробочки (табл. 10). При этом влияние генотипа оказалось значительно выше, особенно в группе линий с белыми венчиками.

Таблица 9. Сравнение высоты растений до первой коробочки у линий картирующей популяции с различной окраской венчика, см (среднее значение, размах изменчивости и коэффициент вариации)**Table 9.** Comparison of the plant height to the first boll in the lines with different corolla colors from the mapping population, cm (mean value, variability range, and variation coefficient)

Год / Year	Линии с белым венчиком / Lines with white petals	Линии с окрашенным венчиком / Lines with colored petals	t-критерий / t-criterion
2018	61,4 (46–81) CV = 11,8	63,7 (45–81) CV = 11,3	-2,16*
2019	72,7 (60–86) CV = 6,9	73,6 (64–89) CV = 6,4	1,29
2020	69,2 (54–80) CV = 7,9	71,0 (64–89) CV = 7,2	-2,17*

Примечание: * – различия значимы при $P_0 < 0,05$ Note: the differences are significant at $P_0 < 0.05$ **Таблица 10.** Доля влияния генотипа линии и условий года выращивания на высоту растений до первой коробочки по результатам трехлетних испытаний (2018–2020)**Table 10.** The effect size of the influence of the line's genotype and the year's growing conditions on the plant height to the first boll, based on the results of three-year trials (2018–2020)

	Все линии / All lines	Линии с белым венчиком / Lines with white petals	Линии с окрашенным венчиком / Lines with colored petals
Генотип / Genotype	42,5*	79,9*	40,3*
Условия / Conditions	35,8*	13,5*	34,9*
Случайное отклонение / Random deviation	21,6	6,6	24,8

Примечание: * – влияние фактора значимо при $P_0 < 0,05$ Note: * – the factor's effect is significant at $P_0 < 0.05$

Заключение

Комплексный анализ признаков линий картирующей популяции в полевых условиях показал, что у большинства линий связь гена *wf1*, определяющего белую окраску лепестков, с ранним сроком цветения на длинном дне сохранилась, и эти линии в полевых условиях Северо-Запада РФ зацветают в среднем на 4–6 дней раньше, чем линии с окрашенными венчиками. Однако выявились раноцветущие линии КП-6, КП-179 и некоторые другие с красно-фиолетовыми цветками, а также белоцветковые поздноцветущие линии КП-169, КП-174 и прочие, возникшие, вероятно, в результате кроссинговера. В то же время доля влияния генотипа на время цветения в группе линий с доминантными аллелями гена *WF1* (с учетом результатов неблагоприятного 2019 г.) оказалась в два раза выше, чем в группе белоцветковых линий.

Сравнение времени цветения с числом листьев на стебле до соцветия у разных линий показало, что в среднем белоцветковые линии имеют меньше листьев, но диапазон изменчивости этого признака совпадает с таковым у линий с окрашенными лепестками. Кроме того, в группе белоцветковых линий генотип имеет большее влияние на формирование листьев, чем у линий с окрашенными лепестками, особенно в неблагоприятных условиях.

Сравнение высоты стеблей до первой коробочки у растений с разными аллелями гена *wf1* показало, что у растений рецессивных гомозигот высота на 80% зависит от генотипа, а у доминантных – только на 40%. Таким образом, можно предположить, что с этим геном сцеплены не только гены, влияющие на время цветения, но и контролирующие высоту растений.

References / Литература

- Brutch N., Koshkin V., Matvienko I., Porokhovina E., Tavares de Sousa M., Domantovich A. Influence of low temperatures and short photoperiod on the time of flowering in flax. In: *Fiber Foundations – Transportation, Clothing and Shelter in the Bioeconomy: Proceedings of the 2008 International Conference on Flax and Other Bast Plants; 21–23 July 2008; Saskatoon Saskatchewan, Canada*. Saskatoon; 2008. p.81-91.
- Brutch N.B., Koshkin V.A., Domantovich A.V., Matvienko I.I. Influence of photoperiod on correlations between flax characteristics. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(7):43-46. [in Russian] (Брач Н.Б., Кошкин В.А., Домантович А.В., Матвиенко И.И. Влияние фотопериода на корреляции признаков льна. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(7):43-46).
- Brutch N.B., Matvienko I.I., Porokhovina E.A., Pavlov A.V. The *WF1* (White Flower 1) gene controlling the white color of petals and flowering time in lines from a mapping population of flax (*Linum usitatissimum* L.). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(6):717-722. DOI: 10.18699/VJ19.545
- Domantovich A., Brutch N., Koshkin V., Nosevich M. Using the anatomical method in the selection of source material for breeding to increase the fiber content and quality among flax lines with different photoperiodic sensitivity (Ispolzovaniye anatomicheskogo metoda pri vydelenii iskhodnogo materiala dlya selektsii na povysheniye soderzhaniya i kachestva volokna u liniy lna s raznoy fotoperiodicheskoy chuvstvitelnostyu). *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2011;(23):11-18. [in Russian] (Домантович А.В., Брач Н.Б., Кошкин В.А., Носевич М.А. Использо-

- вание анатомического метода при выделении исходного материала для селекции на повышение содержания и качества волокна у линий льна с разной фотопериодической чувствительностью. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2011;(23):11-18).
- Domantovich A.V., Koshkin V.A., Branch N.B., Matvienko I.I. Investigation of photoperiod sensitivity of *Linum usitatissimum* L. lines and effect of short-day conditions on their economically valuable traits. *Russian Agricultural Sciences*. 2012;38(3):173-177. DOI: 10.3103/S1068367412030056
- Kutuzova S.N., Pitko A.G. Guidelines for the study of the flax collection (*Linum usitatissimum* L.) (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu kollektitsii lna [*Linum usitatissimum* L.]). N.K. Lemeshev (ed.). Leningrad: VIR; 1988. [in Russian] (Кутузова С.Н., Питко А.Г. Методические указания по изучению коллекции льна (*Linum usitatissimum* L.) / под ред. Н.К. Лемешева. Ленинград: ВИР; 1988).
- Merezhko A.F. Using Mendelian principles in the computerized analysis of quantitative characters' inheritance (Ispolzovaniye mendelevskikh printsipov v kompyuternom analize nasledovaniya kolichestvennykh priznakov). In: *Ecological Genetics of Cultivated Plants (Ekologicheskaya genetika kulturnykh rasteniy): Proceedings of the School of Young Scientists; June 20–25, 2005; Krasnodar*. Krasnodar; 2005. P.107-117. [in Russian] (Мережко А.Ф. Использование менделевских принципов в компьютерном анализе наследования количественных признаков. В кн.: *Экологическая генетика культурных растений: Материалы школы молодых ученых; 20–25 июня 2005 г.; Краснодар*. Краснодар; 2005. С.107-117).
- Obraztsov A.S. Genetic and physiological mechanisms regulating earliness in annual plants (Geneticheskiye i fiziologicheskiye mekhanizmy regulatsii skorospelosti odnoletnikh rasteniy). *Agricultural Biology*. 1975;10(3):334-342. [in Russian] (Образцов А.С. Генетические и физиологические механизмы регуляции скороспелости однолетних растений. *Сельскохозяйственная биология*. 1975;10(3):334-342).
- Obyedkov M.G. Fiber flax (Len-dolgunets). Moscow: Rosselkhozizdat; 1979. [in Russian] (Объедков М.Г. Лен-долгунец. Москва: Россельхозиздат; 1979).
- Pavlov A., Nôžková J., Šavrtková M., Matvienko I., Brutch N.B. Photoperiod influence on the stem structure of fibre flax. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*. 2018;64(4):160-172. DOI: 10.2478/agri-2018-0017
- Porokhovinova E.A. Genetic control of morphological characters of flax. *Proceedings on Applied Botany, of Genetics and Breeding*. 2011;167:159-183. [in Russian] (Пороховинова Е.А. Генетический контроль морфологических признаков льна. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2011;167:159-183).
- Porokhovinova E.A. Evaluating the inheritance of the color and shape of flowers and seeds and their connection to the duration of the germination-to-flowering phase in flax (*Linum usitatissimum* L.) (Izucheniye nasledovaniya okraski i formy tsvetka i semyan, a takzhe yeye svyazi s prodolzhitelnostyu fazy vskhody-tsveteniya u lna [*Linum usitatissimum* L.]). *VIR Bulletin*. 2000;(239):56-58. [in Russian] (Пороховинова Е.А. Изучение наследования окраски и формы цветка и семян, а также ее связи с продолжительностью фазы всходы-цветение у льна (*Linum usitatissimum* L.) *Бюллетень ВИР*. 2000;(239):56-58).
- Sizov I.A. Flax (Len). Moscow: Selkhozgiz; 1955. [in Russian] (Сизов И.А. Лен. Москва: Сельхозгиз; 1955).

Информация об авторах

Нина Борисовна Бруч, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, n.brutch@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2253-6263>

Зоя Андреевна Щедрина, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, z.shedrina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2245-9395>

Инна Ивановна Матвиенко, специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, i.matvienko_vir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1576-8771>

Information about the authors

Nina B. Brutch, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.brutch@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2253-6263>

Zoya A. Shchedrina, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, z.shedrina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2245-9395>

Inna I. Matvienko, Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.matvienko_vir@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1576-8771>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026; одобрена после рецензирования 14.07.2026; принята к публикации 01.09.2026. The article was submitted on 10.04.2026; approved after reviewing on 14.07.2026; accepted for publication on 01.09.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.491:631.524.85
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-013



Анализ экологической пластичности и стабильности коллекционных сортов картофеля в условиях Камчатского края

А. Д. Иващенко, О. И. Хасбиуллина

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР, Камчатский край, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Дмитриевна Иващенко, ivashchenkoanna@bk.ru

Актуальность. Для регионов с коротким вегетационным периодом и выраженной межгодовой контрастностью погодных условий актуально выделение генотипов картофеля, сочетающих продуктивность, экологическую пластичность и стабильность урожая. Цель работы – оценить коллекционные сорта и клоны межвидовых гибридов картофеля различного происхождения по урожайности, экологической пластичности, стабильности и селекционной ценности, а также выявить генотипы, перспективные для использования в селекционной работе в условиях Камчатского края.

Материалы и методы. В 2022–2024 гг. в коллекционном питомнике изучали 71 образец картофеля: сорта отечественной и зарубежной селекции, а также клоны межвидовых гибридов ВИР. Оценка экологической пластичности и стабильности проводили по методике S. A. Eberhart и W. I. Russell в изложении В. А. Зыкина с расчетом коэффициента регрессии (b_i) и дисперсии отклонений от регрессии (S^2d_i). Дополнительно использовали среднюю урожайность, стандартное отклонение, коэффициент вариации и показатель селекционной ценности.

Результаты и заключение. Выделены генотипы интенсивного типа ($b_i > 1$), положительно отзывавшиеся на улучшение условий возделывания; наиболее стабильными среди них были сорта ‘Петербургский’, ‘Отрада’, ‘Ручеек’ и ‘Fiesta’. К числу пластичных и сравнительно стабильных отнесены ‘Арктика’, ‘Жуковский Ранний’, ‘Жемчужина Камчатки’ и стандарт ‘Вулкан’. Стабильным проявлением урожайности отличались также ‘Алёна’, ‘Ирбитский’, ‘Юбиляр’, ‘Камчатка’, ‘Кетский’, стандарт ‘Fresco’, ‘Red Scarlett’ и клон межвидового гибрида 134-2-2006; данные генотипы дополнительно отражены в разделе результатов. Выделенные образцы представляют интерес как исходный материал для селекции картофеля в условиях Камчатского края.

Ключевые слова: картофель, сорт, гибрид, урожайность, экологическая пластичность, стабильность, Камчатский край

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания Камчатского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала ВИР (FNGW-2022-0004).

Для цитирования: Иващенко А.Д., Хасбиуллина О.И. Анализ экологической пластичности и стабильности коллекционных сортов картофеля в условиях Камчатского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):18-26. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-013

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o13

Analysis of environmental plasticity and stability in the accessions of potato cultivars and hybrids under the conditions of Kamchatka Territory

Anna D. Ivashchenko, Olga I. Khasbiullina

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kamchatka Research Institute of Agriculture – branch of VIR, Kamchatka Territory, Russia***Corresponding author:** Anna D. Ivashchenko, ivashchenkoanna@bk.ru

Background. Identification of genotypes with high environmental plasticity and stability potential is essential for breeding programs aimed at developing new high-yielding potato cultivars adapted to the short growing season in Kamchatka. The objective of this study was to evaluate potato cultivars and clones of interspecific hybrids of diverse origin for their yield, environmental plasticity, stability, and breeding value, and to identify genotypes exhibiting high levels of these characters under the extreme conditions of Kamchatka Territory.

Materials and methods. Seventy-one potato accessions were evaluated in a collection nursery over a three-year period: cultivars of domestic and foreign breeding, as well as clones of interspecific hybrids maintained at VIR. This source material was tested following the guidelines by S. A. Eberhart and W. I. Russell as described by V. A. Zykin.

Results and conclusion. Genotypes of the intensive type ($bi > 1$) – those responding positively to improved cultivation conditions – were identified; cvs. 'Peterburgsky', 'Otrada', 'Rucheyok', and 'Fiesta' were classified as the most stable. 'Arktika', 'Zhukovskiy Ranniy', 'Zhemchuzhina Kamchatki', and the reference 'Vulkan' were identified as plastic and relatively stable. Stability was also exhibited by 'Alyona', 'Irbitsky', 'Yubilyar', 'Kamchatka', 'Ketsky', the reference 'Fresco', 'Red Scarlett', and interspecific hybrid clone 134-2-2006. The identified genotypes are of interest as source material for potato breeding in Kamchatka Territory.

Keywords: potato, cultivar, hybrid, yield, environmental plasticity, stability, Kamchatka Territory

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task assigned to the Kamchatka Research Institute of Agriculture, branch of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (FNGW-2022-0004).

For citation: Ivashchenko A.D., Khasbiullina O.I. Analysis of environmental plasticity and stability in the accessions of potato cultivars and hybrids under the conditions of Kamchatka Territory. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):18-26. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o13

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Изменение климата может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на биотический стресс у растений картофеля. Тем не менее в будущем ожидается значительное увеличение абиотического стресса, что создает серьезные угрозы для производства картофеля (Ahmed et al., 2024).

Задача, стоящая перед наукой, по необходимости увеличения производства картофеля требует активного освоения и последующего развития современных генетических технологий по выведению высокопродуктивных сортов различного хозяйственного назначения, приспособленных к выращиванию в конкретных почвенно-климатических условиях. (Bashlakova, Sintsova et al., 2018; Zhuravleva et al., 2018; Tsema, Latypova, 2020; Simakov et al., 2022). Ключевым требованием к сортам является их устойчивость к экологическим условиям окружающей среды, и эта проблема становится особенно важной в регионах с выраженными неблагоприятными климатическими факторами.

По мнению И. Г. Мухаметшина, Ю. П. Логинова и других авторов, в условиях сурового климата риски производства картофеля увеличиваются, потенциал продуктивности сортов и гибридов напрямую зависит от действия внешних условий возделывания культуры. Сорта с высокой продуктивностью и адаптивностью способны обеспечить стабильность урожая в суровых экологических условиях (Mukhametshin, 2017; Loginov et al., 2019).

Климат Камчатского края отличается значительным разнообразием и нестабильностью погоды, что обусловлено географическим положением региона, влиянием окружающих морей и Тихого океана, миграцией воздушных масс и рельефом местности. На юго-востоке полуострова, где сосредоточено 60% посевов картофеля и овощей, безморозный период длится от 80 до 130 дней, а количество осадков превышает уровень, наблюдаемый в других регионах страны, при этом распределение осадков по сезонам является неравномерным (Ryahovskaya et al., 2016).

Не все сорта, районированные в Дальневосточном федеральном округе (ДФО), способны сочетать высокую урожайность с повышенной экологической пластичностью в условиях Камчатского края. Некоторые из них менее устойчивы к снижению продуктивности при возделывании в экстремальных условиях региона. Сорта картофеля, выведенные с учетом почвенно-климатических характеристик Камчатки, наиболее адаптированы к этому региону и полностью удовлетворяют потребности потребителей. Таким образом, помимо традиционной оценки, целесообразно дополнить характеристику сортов их оценкой по уровню адаптивности.

Создание новых сортов является ключевым методом для повышения продуктивности и качества картофеля, наряду с разработкой и соблюдением соответствующей агротехники. Основу традиционной селекции составляет гибридизация, которая включает в себя выбор родительских пар и отбор (Partoev et al., 2016).

Решение данных задач в первую очередь предполагает всестороннее изучение мировой коллекции генетических ресурсов и выделение генотипов с нужными хозяйственно ценными признаками и возможностями адаптации к различным агроклиматическим условиям выращивания для вовлечения их в селекционный процесс.

Цель исследования – оценить коллекционные сорта и межвидовые гибриды картофеля различного происхождения по урожайности, экологической пластичности,

стабильности и селекционной ценности, а также выявить генотипы, обладающие высокой выраженностью указанных признаков в экстремальных условиях Камчатского края.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2022–2024 гг. на опытном участке лаборатории биотехнологии полевых культур и селекции картофеля Камчатского НИИ сельского хозяйства – филиала ВИР. Тип почвы: легкая охристая вулканическая. За период исследований агрохимические показатели почвы составляли: органического вещества (гумус) – 8,4%; легкогидролизуемого азота – 126 мг/кг; NO_3 – 7,1 мг/кг; CaO – 1,2 ммоль/100 г почвы; P_2O_5 – 18,25 мг/л; MgO – 0,24 ммоль/100 г почвы; pH – 4,33. Схема посадки – 70 × 35 см. Агротехника общепринятая для селекции и оригинального семеноводства картофеля в зоне исследования (Ryahovskaya, 2015). Исследования проводили согласно общепринятым методикам (Andryushina et al., 1967; Simakov et al., 2006).

Пластичность и стабильность изучаемых образцов оценивали по методике S. A. Eberhart и W. I. Russell в изложении В. А. Зыкина (Zykin et al., 1984). При характеристике образцов учитывали коэффициент регрессии (b_i) и дисперсию отклонений от регрессии (S^2_d). Показатель b_i отражает отзывчивость генотипа на изменение условий среды, а S^2_d характеризует стабильность проявления признака по годам исследования: чем меньше значение, тем стабильнее генотип. В работе также использовали среднюю урожайность, стандартное отклонение (SD), коэффициент вариации (CV) и показатель селекционной ценности (Sc). При анализе продуктивного и адаптивного потенциала сортов использовали показатель «среднесортная урожайность года», отражающий уровень урожайности в конкретном году и регионе (Molyavko et al., 2012).

Коэффициент вариации (CV) представляет собой стандартное отклонение, выраженное в процентах от средней арифметической совокупности. Согласно общепринятой классификации, при $CV < 10\%$ отмечается слабая изменчивость, при $CV = 10\text{--}20\%$ – средняя, а при $CV \geq 20\%$ – сильная изменчивость (Dospikhov, 1985). Селекционная ценность (Sc) отражает потенциал сорта или гибрида как источника хозяйственно ценных признаков для последующего использования в селекционных программах (Pakudin, Lopatina, 1984).

Объектом исследований служил набор из 71 образца картофеля, включавший сорта разных групп спелости отечественной и зарубежной селекции, а также 11 клонов межвидовых гибридов ВИР, обладающих устойчивостью к возбудителям болезней и комплексом хозяйственно ценных признаков (Rogozina et al., 2018). Коллекционный материал был представлен сортами российской, голландской, немецкой, австрийской, белорусской и эстонской селекции. Отнесение сортов к группам спелости выполнено по данным оригинаторов, каталогов и результатам фенологических наблюдений в условиях опыта: раннеспелые – 20, среднеранние – 33, среднеспелые и поздние – 18 образцов.

По данным агрометеостанции села Сосновка, сумма активных температур выше 10°C нарастающим итогом за период с июня по сентябрь в 2022 г. составила 1377°C , в 2023 г. – 1523°C , в 2024 г. – 1371°C , при среднемноголетнем значении 1092°C . Эти значения были выше среднемноголетних на $285,0^\circ\text{C}$, $431,2^\circ\text{C}$ и $279,1^\circ\text{C}$ соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Температура воздуха и атмосферные осадки в сравнении со среднегодовыми значениями за вегетационный период с 2022 по 2024 г.**Table 1.** Air temperature and precipitation compared with the average annual values for the growing seasons from 2022 through 2024

Месяц / Month	Декада / Ten-day period	Температура воздуха, °C / Air temperature, °C				Атмосферные осадки, мм / Atmospheric precipitation, mm			
		среднесуточная /average daily			много- летняя / long-term	сумма / total amount			много- летняя / long-term
		2022 г.	2023 г.	2024 г.		2022 г.	2023 г.	2024 г.	
Июнь	I	9,1	8,4	10,8	7,7	1,8	63,9	0,3	19,0
	II	11,6	12,7	8,9	8,9	10,3	40,1	23,9	21,0
	III	12,9	14,2	10,6	10,3	7,1	10,8	3,0	31,0
	за месяц	11,2	11,7	10,1	8,9	19,2	114,8	27,2	71,0
Июль	I	17,4	14,0	11,3	11,5	15,6	61,4	77,0	27,0
	II	16,8	13,9	13,9	12,6	2,9	3,9	62,1	28,0
	III	14,3	16,0	13,0	13,3	32,4	14,3	27,9	41,0
	за месяц	16,1	14,7	12,9	12,5	50,9	79,6	167,0	96,0
Август	I	14,3	15,1	15,4	13,7	44,5	28,6	66,4	35,0
	II	14,6	16,0	12,8	13,3	51,0	38,1	14,3	32,0
	III	15,0	14,4	14,6	12,5	62,7	7,2	56,7	35,0
	за месяц	14,6	15,1	14,3	13,2	158,2	73,9	137,4	102,0
Сентябрь	I	13,7	13,8	12,9	10,9	3,8	79,9	73,9	29,0
	II	10,1	10,9	9,6	9,2	58,8	66,4	19,7	39,0
	III	9,1	8,0	8,9	7,6	73,0	14,1	10,7	32,0
	за месяц	10,9	10,9	10,5	9,3	135,6	160,4	104,3	100,0
Сумма > 10°		1377	1523	1371	1092	363,9	428,7	435,9	369,0

В период посадки картофеля (I декада июня) 2023 г. осадков выпало 336,3% от нормы, тогда как 2022 и 2024 г. были засушливыми, с осадками в 9,5% и 1,6% от нормы соответственно. За июль 2022 и 2023 г. осадков выпало ниже нормы на 53,0% и 82,9%, в то время как в 2024 г. они превысили норму на 173,9%. Август 2023 г. оказался более сухим, с осадками в 73,9 мм, что составило 72,4% от нормы, тогда как в 2022 и 2024 г. осадки превысили норму и составили 155,1% и 134,7%.

Продолжительность солнечного сияния была выше среднегодового показателя в июне на 68 и 24 часа в 2022 и 2023 г.; в июле – на 28 и 23 часа в 2022 и 2023 г.; в августе – на 49 и 8 часов в 2023 и 2024 г. соответственно.

Относительная влажность воздуха в среднем за три года составила 78% в июне и 86% в июле и августе, при этом наибольшая относительная влажность была зафиксирована в 2024 г. в июле и августе, колеблясь в пределах 87–94% и 82–91% соответственно.

Комплексным показателем оценки погодных условий является гидротермический коэффициент (ГТК). Оптимальный ГТК для картофеля составляет 1,4–1,6. В 2022 г., в период от посадки до всходов, ГТК составил 1,0, что было ниже оптимального на 0,4–0,6 и на 1,4 по сравнению со среднегодовым значением (2,4). Этот период

оказался засушливым, так как атмосферные осадки составили всего 17% от среднегодового. Однако во время вегетации ГТК повысился до 1,7, что приблизилось к оптимальному значению. В 2023 г. ГТК достиг 3,2, что оказалось значительно выше оптимального уровня для картофеля на 1,6–1,8 и выше среднегодового показателя на 0,8. Этот метеорологический период оказался неблагоприятным для всходов картофеля, поскольку с 1 по 30 июня выпало 114,8 мм атмосферных осадков. В 2024 г. в период от посадки до всходов ГТК составил 1,0, что вновь указывает на засушливые условия. Тем не менее за время вегетации ГТК увеличился до 3,3, что выше среднегодового показателя на 0,9. Этот год оказался менее благоприятным для роста и развития картофеля.

Естественного отмирания ботвы картофеля в условиях Камчатского края не происходит, это связано с поздними посадками картофеля (I–II декады июня) и наступлением ранних заморозков: 2022 г. – 19 сентября (–2,9°C в воздухе и –4,0 на поверхности почвы); 2023 г. – 15 сентября (–1,5°C), 2024 – 8 сентября (–1,5°C). В целом вегетационные периоды 2022 и 2023 г. были более благоприятными для роста и развития картофеля по сравнению с 2024 г.

Результаты и их обсуждение

Повышение генетического потенциала урожайности традиционно является и по настоящий день остается ключевой задачей в селекции. В. В. Хангильдин указывает, что только высокая адаптивность сорта может обеспечить стабильность урожая в различных экологических условиях (Hangildin, 1978).

Индекс условий среды (I_j) показывает степень благоприятности условий года для формирования урожая картофеля. Погодные условия в годы исследований существенно различались. За 2022–2024 гг. средняя урожайность по всем 71 изученным генотипам составила 40,5 т/га, при этом по отдельным образцам показатель изменялся от 8,5 до 87,6 т/га (табл. 2). Межгодовая изменчивость урожайности по совокупности изученных образцов была значительной: CV в 2022 г. составил 23,7%, в 2023 г. – 33,7%, в 2024 г. – 28,5%. Наиболее благоприятные условия для выращивания картофеля отмечены в 2022 и 2023 г., когда средняя урожайность составила 45,0 и 44,8 т/га соответственно, а индекс среды (I_j) достигал 4,5 и 4,3. В 2024 г. условия были экстремальными ($I_j = -8,8$), что сопровождалось снижением урожайности всех групп образцов до среднего уровня 31,7 т/га. С высокой урожайностью (выше 50,0 т/га) были отмечены следующие сорта: 'Жаворонок' (к-12101) 'Метеор' (к-25212), 'Детскосельский' (к-2902), 'Рябинушка' (к-12203), 'Северянин', 'Самба' (к-25458), 'Fiesta' (к-19431), 'Gala' (к-25270), 'Latona' (к-11946), 'Evolution', 'Provento'; урожайностью 37,7–48,8 т/га характеризовались 34 образца (47,9% от изученной коллекции), что превышало показатели стандартов 'Fresco' – 32,0 т/га и 'Вулкан' – 35,4 т/га.

В таблице 2 показатели $\min$ и $\max$ характеризуют минимальную и максимальную урожайность конкретного образца за трехлетний период наблюдений, а строки «среднее», « $\max$ » и « $\min$ » рассчитаны по всей совокупности изученных генотипов. В ходе исследований варьирование признака пластичности по урожайности (bi) колебалась в пределах от –1,44 до +3,41. Всего 24 (33,8%) образца продемонстрировали низкую реакцию на изменение условий среды ($bi = 0,1–0,8$). Они характеризовались урожайностью 36,7–52,4 т/га, а коэффициент вариации у большинства из них находился в пределах 2,5–20,3%, что свидетельствует о слабой или средней изменчивости признака. Исключение составили образцы с высоким CV: 'Аврора' (к-12188) – 26,5%, 'Пензенская Скороспелка' – 30,1%, 'Солнышко' (к-25192) – 29,8%, 'Удача' (к-11900) – 29,2%, 'Adretta' (к-20343) – 37,5%, 'Bellarosa' (к-24765) – 37,8%, 'Provento' (22,2%) и клон межвидового гибрида 117-2 – 55,8%, что указывает на высокую изменчивость урожайности по годам. Урожайность таких генотипов в неблагоприятном 2024 г. снижалась в меньшей степени, чем у интенсивных сортов, поэтому их можно рассматривать как материал для экстенсивных фонов возделывания.

В коллекционном изучении выделен 31 (43,7%) образец, в том числе шесть клонов межвидовых гибридов ВИР: 8-1-2004, 99-6-5, 8-3-2004, 99-6-6, 8-5-2004 и 135-3-2005, отличавшихся повышенной отзывчивостью на изменение условий среды ($bi = 1,1–3,5$). Из них наибольшей стабильностью характеризовались сорта 'Вулкан', 'Петербургский' (к-11913), 'Ручеек' (к-12213), 'Отрада' и 'Fiesta' ($S^2d_i = 3,5; 1,0; 10,6; 4,1; 1,0$ соответственно). Высокоурожайные образцы картофеля: 'Жаворонок', 'Колым-

Таблица 2. Выделившиеся образцы коллекционного питомника по урожайности и их влияние на параметры пластичности и стабильности

Table 2. Accessions from the collection nursery identified for their yield, and their effect on plasticity and stability parameters

Сорт/гибрид / Cultivar or hybrid	Урожайность, т/га / Yield, t/ha						CV, %	bi	S^2d_i	Sc
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	$\bar{X} \pm S_x$	$\min$	$\max$				
'Fresco', стандарт	31,6	36,1	29,8	$32,0 \pm 3,06$	28	37,5	9,3	0,3	10,5	30,6
'Вулкан', стандарт	42,0	38,8	25,3	$35,4 \pm 9,1$	24,5	45,0	25,7	1,1	3,5	21,0
'Алёна'	37,5	36,9	30,6	$35,0 \pm 3,8$	28,7	40,7	10,8	0,5	0,4	28,8
'Adretta'	67,8	31,2	48,8	$41,4 \pm 18,5$	30,6	53,0	37,5	0,1	683,8	35,5
'Аврора'	53,5	36,4	35,3	$41,7 \pm 11,0$	34,3	57,5	26,5	0,7	176,1	26,8
'Anosta'	51,6	66,9	30,3	$49,6 \pm 18,6$	27,5	70,0	37,5	2,2	123,3	28,7
'Alvara'	51,7	40,0	32,0	$41,2 \pm 10,0$	31,5	52,5	24,4	1,1	68,0	25,4
'Arizona'	44,0	29,4	55,6	$43,0 \pm 13,5$	29,0	60,0	31,5	–1,4	119,6	54,7
'Арктика'	45,6	52,1	36,2	$44,6 \pm 8,1$	32,7	57,5	18,1	0,9	19,9	34,9
'Bellarosa'	25,0	43,7	23,3	$30,6 \pm 11,6$	20,5	45,0	37,8	0,8	185,7	28,2
'Бармас'	64,3	50,3	32,0	$48,8 \pm 16,0$	33,5	66,5	33,0	1,9	89,8	24,3
'Gala'	37,0	66,6	33,8	$50,9 \pm 18,2$	36,1	75,0	39,7	1,3	462,8	42,3
'Детскосельский'	36,6	46,1	49,2	$50,9 \pm 6,24$	25,0	50,0	14,2	–0,6	38,9	58,3
'Жуковский Ранний'	44,3	38,1	30,6	$37,7 \pm 6,51$	27,5	49,5	17,2	0,8	16,6	26,5
'Жаворонок'	53,2	80,8	20,8	$52,1 \pm 30,0$	19,0	84,8	58,1	3,5	423,3	20,5

Таблица 2. Продолжение

Table 2. Continued

Сорт/гибрид / Cultivar or hybrid	Урожайность, т/га / Yield, t/ha						CV, %	bi	S ² d _i	Sc
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	X ± Sx	min	max				
‘Жемчужина Камчатки’	35,3	37,1	22,6	37,1 ± 7,57	22,4	37,2	23,9	1,0	2,7	20,8
‘Zekura’	48,0	42,3	28,2	39,5 ± 10,3	24,6	50,0	26,1	1,3	15,6	22,9
‘Ирбитский’	41,1	39,6	39,0	39,3 ± 1,0	34,3	43,0	2,5	0,1	0,5	38,1
‘Колымский’	66,2	32,7	35,5	44,8 ± 18,2	30,3	70,0	40,5	1,1	533,7	24,5
‘Кетский’	41,7	40,0	35,9	39,2 ± 3,1	32,5	43,7	7,8	0,4	1,8	33,7
‘Камчатка’	40,3	39,4	33,5	37,7 ± 3,2	31,6	45,0	8,5	0,5	0,4	32,0
‘Лиляя Белорусская’	36,7	48,3	54,6	46,6 ± 9,5	32,7	57,5	20,3	-0,9	57,0	71,1
‘Latona’	44,6	65,5	44,4	51,5 ± 12,4	42,2	70,0	24,0	0,8	226,2	50,5
‘Метеор’	43,5	85,0	29,6	52,7 ± 28,6	25,0	87,5	53,9	2,6	874,4	36,1
99-6-5	53,1	42,7	16,7	37,3 ± 19,1	14,6	55,0	51,3	2,4	42,6	11,3
‘Отрада’	39,6	35,3	21,2	32,0 ± 9,9	20,0	40,0	30,8	1,2	10,6	16,8
‘Петербургский’	48,7	50,3	32,6	43,9 ± 9,5	30,0	50,8	21,7	1,3	1,0	29,6
‘Provento’	43,5	65,5	48,2	52,4 ± 11,5	39,5	66,6	22,2	0,5	245,1	58,1
‘Пензенская Скороспелка’	53,1	32,7	32,0	39,2 ± 11,8	29,0	55,0	30,1	0,8	194,7	23,7
94-5	41,5	50,5	32,3	41,5 ± 9,5	41,5	30,6	22,8	1,0	43,7	31,7
‘Raya’	53,0	38,4	34,4	41,9 ± 10,0	34,0	55,0	24,0	3,5	108,4	26,7
‘Рябинушка’	56,1	62,7	30,5	51,3 ± 14,6	35,0	70,0	28,4	1,8	28,8	32,0
‘Red Scarlett’	40,5	44,0	39,1	41,2 ± 2,5	37,5	45,0	6,1	0,2	4,8	39,3
‘Roko’	31,2	37,6	29,2	32,7 ± 4,7	26,2	38,0	14,5	0,4	25,4	204,7
‘Ручеёк’	48,0	49,4	30,9	47,2 ± 10,1	30,7	51,6	23,7	1,3	1,0	27,6
‘Северянин’	53,8	66,0	31,4	50,4 ± 17,8	27,5	70,0	35,3	2,1	80,6	28,9
‘Солнышко’	33,7	53,5	32,9	40,0 ± 11,8	32,5	65,0	29,8	0,8	205,2	39,1
‘Самба’	58,2	50,0	44,4	50,9 ± 7,0	43,1	60,0	13,9	0,8	30,1	38,4
‘Удача’	39,1	65,5	41,7	48,8 ± 14,2	37,2	66,7	29,2	0,8	344,1	52,4
‘Чародей’	47,0	59,4	32,2	46,2 ± 13,5	16,0	60,0	29,4	1,6	78,1	31,3
‘Fiesta’	74,1	76,1	39,0	63,1 ± 20,8	38,0	77,5	33,0	2,7	4,1	33,2
‘Evolution’	49,8	73,8	29,1	50,9 ± 22,5	27,4	75,0	44,1	2,5	307,2	29,6
‘Юбилей Жукова’	37,0	26,0	17,8	26,9 ± 9,5	17,5	37,5	35,3	1,0	57,0	13,1
‘Юбиляр’	45,4	46,9	46,2	46,2 ± 1,0	40,0	50,0	2,2	-0,01	2,0	47,0
‘Paul Vagner’	60,0	10,8	12,8	27,8 ± 27,7	10,8	60,0	99,0	1,8	1193,6	6,1
8-1-2004	64,1	48,5	20,3	44,3 ± 22,3	20,0	70,0	50,5	2,7	99,7	13,8
8-5-2004	58,4	40,6	30,4	43,1 ± 14,1	29,7	59,9	32,8	1,5	136,6	22,2
134-2-2006	24,1	22,3	36,2	27,5 ± 7,6	17,8	40,0	27,8	-0,99	2,7	41,0
117-2	59,1	20,0	30,0	36,4 ± 20,3	17,5	67,5	55,8	0,8	751,3	18,5

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

Сорт/гибрид / Cultivar or hybrid	Урожайность, т/га / Yield, t/ha						CV, %	bi	S ² d _i	Sc
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	X ± Sx	min	max				
135-3-2005	38,4	47,5	24,4	36,7 ± 11,6	23,1	50,0	31,9	1,4	44,6	22,9
8-3-2004	47,8	17,2	9,4	28,8 ± 20,6	8,5	50,0	83,5	1,8	463,0	4,6
99-6-6	44,5	27,8	16,4	32,4 ± 14,0	15,0	55,0	47,9	1,5	120,4	10,7
среднее / mean	45,0	44,8	31,7	40,5						
max	74,1	85,0	55,6		8,5	87,6	99	3,48	1193,6	204,7
min	24,1	10,8	9,4		43,1	30,6	2,2	-1,42	0,4	4,6

Примечание: $x \pm Sx$ – среднее $\pm$ стандартное отклонение; CV, % – коэффициент вариации; bi – коэффициент регрессии; S²d_i – дисперсия отклонений от регрессии; Sc – селекционная ценность генотипа. Столбцы min и max отражают минимальную и максимальную урожайность конкретного сортообразца за 2022–2024 гг.; строка «среднее» рассчитана по всем изученным генотипам (71)

Note: $x \pm Sx$ – mean $\pm$ standard deviation; CV, % – coefficient of variation; bi – regression coefficient; S²d_i – deviation variance from regression; Sc – breeding value of the genotype. The min and max columns contain the minimum and maximum yield values of a genotype over 2022–2024; the line “mean” was calculated for all 71 studied genotypes

ский, ‘Meteop’, ‘Gala’, ‘Anosta’(к-19902), ‘Raya’, ‘Evolution’, ‘Paul Vagner’, а также клоны межвидовых гибридов: 8-3-2004, 99-6-6 (41,9–52,7 т/га), с коэффициентами регрессии bi = 3,5; 1,1; 2,6; 1,3; 3,5; 2,5; 2,2; 1,8; 1,8; 1,5 соответственно, положительно реагировали на улучшение агрофона и благоприятные климатические условия года, однако в отдельные годы характеризовались нестабильной урожайностью (S²d_i = 423,3; 533,7; 874,4; 462,8; 108,4; 307,2; 463,0; 1193,6; 120,4 соответственно). У сорта ‘Юбилар’ (к-24627), напротив, наблюдалась стабильная урожайность (S²d_i = 2,0) при слабой отзывчивости на изменение факторов среды (bi = -0,01). С высокой нестабильностью и изменчивостью признака (CV = 99%) к интенсивному типу отнесен низкоурожайный поздний сорт ‘Paul Vagner’ (27,8 т/га; bi = 3,5; S²d_i = 1193,6), который в неблагоприятных условиях года резко снижает урожайность: 2022 г. – 60 т/га, 2023 г. – 10,8 т/га, 2024 г. – 12,8 т/га. Пластичными, с коэффициентом регрессии (bi = 1) в изменяющихся условиях года, показали себя: ‘Жемчужина Камчатки’ (к-25572), ‘Юбилей Жукова’ (к-12179) и межвидовой гибрид 94-5, при этом стабильность признака различалась: от S²d_i = 2,7 у ‘Жемчужины Камчатки’ до S²d_i = 57,0 у ‘Юбилей Жукова’.

Среди изученных образцов 25 (35,2%) были охарактеризованы как непластичные (bi = 0,1–0,8) и нестабильные (S²d_i = 10,5–751,3), несмотря на высокую урожайность 27,4–52,4 т/га. Среднеранние образцы с коэффициентом регрессии (bi) -0,01...-1,4 и показателем стабильности (S²d_i) 38,9; 364,7; 119,6; 57,0 – ‘Детскосельский’, клон межвидового гибрида 135-5-2005, ‘Arizona’ (к-25314), ‘Лиля Белорусская’ – отнесены к генотипам с низкой экологической пластичностью. Для гибридного материала полученные результаты позволяют дифференцировать образцы по направлению использования: клоны межвидовых гибридов 8-1-2004, 8-3-2004 и 8-5-2004 целесообразно рассматривать как источники отзывчивости на улучшение агрофона, тогда как 99-6-5 и 134-2-2006 представляют интерес как более стабильные доноры продуктивности. Клон 134-2-2006, несмотря на сравнительно невысокую урожайность, отличался устойчивым проявлением признака по годам (S²d_i = 2,7; bi = -0,99), что важно для селекции на стабильность в экстремальных условиях.

Полученные результаты в целом согласуются с данными исследований, выполненных ранее в условиях Камчатского края, где также отмечалось существенное влияние погодных условий года на реализацию потенциала сортов картофеля и выделялись различающиеся по пластичности и стабильности генотипы (Vlasenko, 2018, 2021; Ivashchenko, Khasbiullina, 2024). В то же время настоящее исследование расширяет предшествующие работы за счет включения более широкого набора коллекционных сортов и клонов межвидовых гибридов. Сопоставление с результатами, полученными в других регионах России, показывает общую закономерность: интенсивные высокоурожайные сорта лучше реализуют потенциал в благоприятные годы, тогда как генотипы с bi < 1 отличаются более сдержанной реакцией на колебания среды и меньшим снижением урожайности в стрессовых условиях. Для Камчатского края эта закономерность проявляется особенно отчетливо из-за короткого периода вегетации, переувлажнения и высокой межгодовой контрастности метеословий.

Показатель селекционной ценности (Sc) использовали как интегральную характеристику продуктивности и устойчивости проявления признака. При изучении коллекционных образцов Sc по продуктивности варьировал в пределах 4,6–204,7. Большинство генотипов – 57 образцов (80,2%) – характеризовались средним уровнем селекционной ценности (Sc = 20,9–71,1). Наибольшее значение отмечено у позднего сорта ‘Roko’ (Sc = 204,7), относящегося к генотипам со слабой реакцией на изменение условий среды (bi = 0,4). Клон межвидового гибрида 8-3-2004, поздний сорт ‘Paul Vagner’, а также еще 12 образцов (16,9%) с Sc = 4,6–20,0 характеризовались меньшей селекционной ценностью по продуктивности в условиях проведенного опыта. Дополнительно стабильным проявлением урожайности по годам отличались ‘Алёна’ (S²d_i = 0,4), ‘Ирбитский’ (к-24712) (S²d_i = 0,5), ‘Камчатка’ (S²d_i = 0,4), ‘Кетский’ (к-24626) (S²d_i = 1,8), ‘Юбилар’ (к-24627) (S²d_i = 2,0), ‘Red Scarlett’ (к-12096) (S²d_i = 4,8), стандарт ‘Fresco’ (S²d_i = 10,5), что позволяет рассматривать их как источники стабильности урожая для дальнейшей селекционной работы.

Заклучение

В результате сравнительного анализа образцов коллекционного питомника по урожайности и параметрам экологической пластичности и стабильности выделены генотипы интенсивного типа ($bi > 1$), хорошо отзывавшиеся на улучшение условий возделывания: 'Вулкан', 'Жаворонок' (к-12101), 'Колымский', 'Метеор' (к-25212), 'Петербургский' (к-11913), 'Рябинушка' (к-12203), 'Ручеёк' (к-12213), 'Северянин', 'Чародей' (к-11908), 'Anosta' (к-19902), 'Fiesta' (к-19431), 'Gala' (к-25270), 'Raya', 'Evolution', а также клоны межвидовых гибридов: 8-1-2004, 99-6-5, 8-3-2004, 99-6-6, 8-5-2004 и 135-3-2005. Наибольшая стабильность в этой группе отмечена у сортов 'Петербургский', 'Отрада', 'Ручеёк' и 'Fiesta'. К числу пластичных и сравнительно стабильных отнесены 'Жуковский Ранний' (к-11825), 'Жемчужина Камчатки', стандарт 'Вулкан' и 'Арктика'. Стабильностью ($S^2d_i = 0,4-10,5$) характеризовались 'Алёна', 'Юбиляр' (к-24627), стандарт 'Fresco', 'Red Scarlett' (к-12096), 'Кетский' (к-24626), 'Камчатка', 'Ирбитский' (к-24712) и клон межвидового гибрида 134-2-2006. Выделенные сорта и межвидовые гибриды представляют практический интерес как исходный материал для селекции картофеля в условиях Камчатского края.

References / Литература

- Ahmed M., Ahmad S., Abbas G., Hussain S., Hoogenboom G. Potato-potato system. In: *Cropping Systems Modeling Under Changing Climate*. Singapore: Springer; 2024. p.271-306. DOI: 10.1007/978-981-97-0331-9_10
- Andryushina N.A., Batsanov N.S., Budina L.V., Grinevich V.F., Ilyin V.F., Klyukvina Yu.V., Shmyglya V.A., Yashina I.M. Methods of research on the potato crop (Metodika issledovaniy po kulture kartofelya). Moscow: VASKhNIL; 1967. [in Russian] (Андрюшина Н.А., Бацанов Н.С., Будина Л.В., Гриневич В.Ф., Ильин В.Ф., Ключкина Ю.В., Шмыгля В.А., Яшина И.М. Методика исследований по культуре картофеля. Москва: ВАСХНИЛ; 1967).
- Bashlakova O.N., Sintsova N.F. The assessment of selection numbers of potato according to the combination of traits in the conditions of Kirov region. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019;20(6):575-584. [in Russian] (Башлакова О.Н., Синцова Н.Ф. Оценка селекционных номеров картофеля по комплексу признаков в условиях Кировской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019;20(6):575-584). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.6.575-584
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Агропромиздат; 1985).
- Hangildin V.V. On the principles of modeling intensive-type cultivars (O printsipakh modelirovaniya sortov intensivnogo tipa). In: *Genetics of Crop Quantitative Characters of Agricultural Plants: Collection of Scientific Papers (Genetika kolichestvennykh priznakov selskokhozyaystvennykh rasteniy: sbornik nauchnykh trudov)*. D.K. Beliaev (ed.). Moscow: Nauka; 1978. p.111-115. [in Russian] (Хангильдин В.В. О принципах моделирования сортов интенсивного типа. В кн.: *Генетика количественных признаков сельскохозяйственных растений: сборник научных трудов* / под ред. Д.К. Беляева. Москва: Наука; 1978. С.111-115).
- Ivashchenko A.D., Khasbiullina O.I. Evaluation of collectible potato varieties for earliness and productivity in the Kamchatka Territory. *Agroscience*. 2024;2(2):49-56. [in Russian] (Ивашченко А.Д., Хасбиуллина О.И. Оценка коллекционных сортообразцов картофеля на скороспелость и продуктивность в условиях Камчатского края. *Агронаука*. 2024;2(2):49-56). DOI: 10.24412/2949-2211-2024-2-2-49-58
- Loginov Yu.P., Kazak A.A., Yakubyshina L.I. Condition and prospects of development of potato growing in Western Siberia. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2019;1(75):50-52. [in Russian] (Логинов Ю.П., Казак А.А., Якубышина Л.И. Состояние и перспективы развития картофелеводства в Западной Сибири. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019;1(75):50-52).
- Molyavko A.A., Marukhlenko A.V., Borisova N.P. The coefficient of adaptability of potato cultivar determines its productivity. *Potato and Vegetables*. 2012;(3):10-11. [in Russian] (Молявко А.А., Марухленко А.В., Борисова Н.П. Коэффициент адаптивности сорта картофеля определяет продуктивность. *Картофель и овощи*. 2012;(3):10-11).
- Mukhametshin I.G. Ecological plasticity and stability of potato varieties under conditions of Udmurt Republic. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2017;6(68):245-249. [in Russian] (Мухаметшин И.Г. Экологическая пластичность и стабильность сортов картофеля в условиях Удмуртской Республики. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017;6(68):245-249).
- Pakudin V.Z., Lopatina L.M. Assessment of ecological plasticity and stability of agricultural crop varieties (Otsenka ekologicheskoy plastichnosti i stabilnosti sortov selskokhozyaystvennykh kultur). *Agricultural Biology*. 1984;19(4):109-113. [in Russian] (Пакудин В.З., Лопатина Л.М. Оценка экологической пластичности и стабильности сортов сельскохозяйственных культур. *Сельскохозяйственная биология*. 1984;19(4):109-113).
- Partoev K., Davlyatnazarova Z.B., Aliev K. Combination of the traditional breeding methods of the potato with modern biotechnology. *Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan*. 2016;59(9-10):434-439. [in Russian] (Партоев К., Давлятназарова З.Б., Алиев К. Селекция новых сортов картофеля традиционными методами отбора в сочетании с современной биотехнологией. *Доклады Национальной академии наук Таджикистана*. 2016;59(9-10):434-439).
- Rogozina E.V., Chalaya N.A., Beketova M.P., Biryukova V.A., Kirpicheva M.A., Kuznetsova M.A., Manankov V.V., Fadina O.A., Khlopyuk M.S., Khavkin E.E. Catalogue of the VIR Global Collection. Issue 866. Interspecific potato hybrids resistant to disease causative agents. St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Рогозина Е.В., Чалая Н.А., Бекетова М.П., Бирюкова В.А., Кирпичева М.А., Кузнецова М.А., Мананков В.В., Фадинова О.А., Хлопюк М.С., Хавкин Э.Е. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 866. Межвидовые гибриды картофеля, устойчивые к возбудителям болезней. Санкт-Петербург: ВИР; 2018).
- Ryakhovskaya N.I. (ed.). The system of agriculture in Kamchatka Territory (Sistema zemledeliya Kamchatskogo kraya). Petropavlovsk-Kamchatsky; Kamchatka Research Institute of Agriculture; 2015. [in Russian] (Система земледелия Камчатского края / под ред. Н.И. Ряховской. Петропавловск-Камчатский: Камчатский НИИ сельского хозяйства; 2015).

- Ryakhovskaya N.I., Gaynatullina V.V., Vlasenko G.P. Agrobiological rationale for seed potato cultivation in the environments of Kamchatka Territory (Agrobiologicheskoye obosnovaniye vozdel'yvaniya semennogo kartofelya v usloviyakh Kamchatskogo kraya). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress; 2016. [in Russian] (Ряховская Н.И., Гайнатуллина В.В., Власенко Г.П. Агrobiологическое обоснование возделывания семенного картофеля в условиях Камчатского края. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс; 2016).
- Simakov E.A., Anisimov B.V., Zhevora S.V., Mityushkin A.V., Zhuravlev A.A., Zebrin S.N. Potato growing in Russia: current state and prospects under new conditions. *Potato and Vegetables*. 2022(4):3-6. [in Russian] (Симаков Е.А., Анисимов Б.В., Жевора С.В., Митюшкин А.В., Журавлев А.А., Зебрин С.Н. Картофелеводство России: состояние и перспективы в новых условиях. *Картофель и овощи*. 2022;(4):3-6). DOI: 10.25630/PAV2022.80.38.001
- Simakov E.A., Sklyarova N.P., Yashina I.M. Guidelines for the potato breeding process technology (Metodicheskiye ukazaniya po tekhnologii selektsionnogo protsesssa kartofelya). Moscow: Achievements of Science and Technology of AIC; 2006. [in Russian] (Симаков Е.А., Склярова Н.П., Яшина И.М. Методические указания по технологии селекционного процесса картофеля. Москва: Достижения науки и техники АПК; 2006).
- Tsema L.G., Latypova A.L. Perspective food potato varieties for cultivation in the Perm' region conditions. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2020;4(64):31-37. [in Russian] (Цёма Л.Г., Латыпова А.Л. Перспективные сорта картофеля столового назначения для возделывания в условиях Пермского края. *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020;4(64):31-37). DOI: 10.48012/1817-5457_2020_4_31
- Vlasenko G.P. Assessment of the ecological plasticity of early and medium-early potato varieties in the Kamchatka Krai. *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2021;3(217):100-105. [in Russian] (Власенко Г.П. Оценка экологической пластичности ранних и среднеранних сортов картофеля в Камчатском крае. *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2021;3(217):100-105). DOI: 10.37102/0869-7698_2021_217_03_16
- Vlasenko G.P. Plasticity and stability of potato varieties under conditions of Kamchatka Krai. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018;32(4):44-46. [in Russian] (Власенко Г.П. Пластичность и стабильность сортов картофеля в условиях Камчатского края. *Достижение науки и техники АПК*. 2018;32(4):44-46). DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10410
- Zhuravleva E.V., Bukaeva M.N., Filipchuk A.A. Development of new domestic potato varieties on the basis of modern genetic technologies and breeding methods. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018;32(3):92-94. [in Russian] (Журавлёва Е.В., Букаева М.Н., Филипчук А.А. Создание новых отечественных сортов картофеля на основе современных генетических технологий и методов селекции. *Достижения науки и техники АПК*. 2018;32(3):92-94). DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10319
- Zykin V.A., Meshkova V.V., Sapega V.A. Ecological plasticity parameters of agricultural plants, their calculation and analysis: guidelines (Parametry ekologicheskoy plastichnosti selskhokhozyastvennykh rasteniy, ikh raschet i analiz: metodicheskiye rekomendatsii). Novosibirsk; 1984. [in Russian] (Зыкин В.А., Мешкова В.В., Сапега В.А. Параметры экологической пластичности сельскохозяйственных растений, их расчет и анализ: методические рекомендации. Новосибирск; 1984).

Информация об авторах

Анна Дмитриевна Ивашенко, старший научный сотрудник, аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР, 684033 Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Сосновка, ул. Центральная, 4, ivashchenkoanna@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4714-4565>

Ольга Ивановна Хасбиуллина, кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР, 684033 Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Сосновка, ул. Центральная, 4, Khasbiullina@kamniish.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7368-0244>

Information about the authors

Anna D. Ivashchenko, Senior Researcher, Postgraduate Student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kamchatka Research Institute of Agriculture – branch of VIR, 4 Tsentralnaya St., Sosnovka Village, Yelizovsky District, Kamchatka Territory 684033, Russia, ivashchenkoanna@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4714-4565>

Olga I. Khasbiullina, Cand. Sci. (Agriculture), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kamchatka Research Institute of Agriculture – branch of VIR, 4 Tsentralnaya St., Sosnovka Village, Yelizovsky District, Kamchatka Territory 684033, Russia, Khasbiullina@kamniish.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7368-0244>

Вклад авторов: Ивашенко А. Д. – руководство и проведение исследований; анализ результатов; подготовка рукописи. Хасбиуллина О. И. – руководитель аспирантуры; подготовка рукописи.

Contribution of the authors: Ivashchenko A. D. – supervision and conducting of the research; analysis of the results; preparation of the manuscript. Khasbiullina O. I. – supervision of postgraduate studies; preparation of the manuscript.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.01.2026; одобрена после рецензирования 25.06.2026; принята к публикации 15.07.2026. The article was submitted on 23.01.2026; approved after reviewing on 25.06.2026; accepted for publication on 15.07.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 633.36:581.1:577.1

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-019



Влияние эколого-географических факторов на биохимический состав семян образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным типом роста растений

Р. Т. Исламова¹, М. О. Бурляева¹, Е. А. Крылова¹, В. С. Попов¹, Т. В. Герасимова², Т. В. Шеленга¹¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия² Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанский генетический банк семян – филиал ВИР, Краснодарский край, Россия

Автор, ответственный за переписку: Виталий Сергеевич Попов, v.popov@vir.nw.ru

Актуальность. Вигна – засухоустойчивая культура с высоким содержанием в семенах белка, крахмала и биологически активных соединений, перспективная для возделывания на юге России. Влияние эколого-географических условий на биохимический состав семян вигны и их взаимосвязь с типом роста растений изучены недостаточно. Цель работы – оценка изменчивости содержания крахмала, белка и антоцианов в семенах образцов вигны с разным типом роста из коллекции ВИР, репродуцированных в различных климатических условиях.

Материалы и методы. Семена для анализа были получены из Кубанского генетического банка семян – филиала ВИР и генбанка ВИР (г. Санкт-Петербург). Изучали семена вигны, выращенные в 2000–2024 гг. в условиях: Адлерской опытной станции, Астраханской опытной станции и Дальневосточной опытной станции – филиалов ВИР. Образцы отличались разным типом роста главного стебля (детерминатным и индетерминатным). Содержание крахмала, белка и антоцианов определяли методом ближней инфракрасной спектроскопии (БИК). Статистическую обработку выполняли с использованием корреляционного анализа Спирмена, ANOVA.

Результаты. Установлено, что место репродукции статистически значимо влияет на накопление крахмала в семенах, тогда как содержание белка не зависит от этого фактора. Анализ интегральных признаков за вегетационный период выявил генотип-специфические корреляции. Дисперсионный анализ показал значимый вклад генотипа и типа роста растений в накопление крахмала и белка. Содержание антоцианов слабо коррелировало с климатическими факторами и типом роста растений.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы в селекции растений, адаптированных к абиотическим стрессорам различных регионов нашей страны.

Ключевые слова: вигна, крахмал, белок, антоцианы, тип роста главного стебля, генотип, климатические факторы, изменчивость, селекция

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного задания согласно тематическим планам ВИР по проекту № FGEM-2022-0002 «Выявление возможностей генофонда бобовых культур для оптимизации их селекции и диверсификации использования в различных отраслях народного хозяйства».

Для цитирования: Исламова Р.Т., Бурляева М.О., Крылова Е.А., Попов В.С., Герасимова Т.В., Шеленга Т.В. Влияние эколого-географических факторов на биохимический состав семян образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным типом роста растений. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):27-42. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-019

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o19

The effect of ecogeographic factors on the biochemical composition of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. seeds from accessions of different plant growth types

Renata T. Islamova¹, Marina O. Burlyayeva¹, Ekaterina A. Krylova¹, Vitaliy S. Popov¹, Tatiana V. Gerasimova², Tatiana V. Shelenga¹

¹ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources St. Petersburg, Russia

² N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Genetic Seed Bank – branch of VIR, Krasnodar Territory, Russia

Corresponding author: Vitaliy S. Popov, v.popov@vir.nw.ru

Background. Cowpea is a drought-resistant crop with high content of protein, starch, and bioactive compounds in its seeds. It is promising for cultivation in the south of Russia under climate change. The effect of ecogeographic conditions on the biochemical composition of cowpea seeds and their relationship with the growth type of plants have not been sufficiently studied. The objective was to assess the variability in the content of starch, protein, and anthocyanins in the seeds of cowpea accessions belonging to different growth types from the VIR collection, reproduced under various climate conditions.

Materials and methods. The accessions differed in the type of main stem growth (determinate and indeterminate). The seeds were obtained from the Kuban Genetic Seed Bank (branch of VIR) and the VIR Genebank (St. Petersburg). Cowpea seeds grown at Adler Experiment Station, Astrakhan Experiment Station, and the Far Eastern Experiment Station (branches of VIR) from 2000 to 2024 were studied. The content of starch, protein, and anthocyanins was assessed using near-infrared spectroscopy. Statistical analysis included Spearman's rank correlations, nonparametric tests, ANOVA, and *post hoc* comparisons.

Results. The site of reproduction had a statistically significant effect on starch accumulation in seeds, while protein content did not depend on this factor. Analysis of variance showed a significant contribution of the genotype and the plant growth type to starch and protein accumulation. Anthocyanin content demonstrated a weak correlation with the climate factors and plant growth type.

Conclusion. The obtained results can be used by breeders to develop plants adapted to abiotic stressors in various regions of Russia.

Keywords: cowpea, starch, protein, anthocyanins, main stem growth type, genotype, climate factors, variability, breeding

Acknowledgments: the study was supported financially in the framework of the state task according to the thematic plans of VIR under Project No. FGEM-2022-0002 "Identifying possibilities in the genetic diversity of leguminous crops to optimize their breeding and diversify uses in various sectors of the national economy".

For citation: Islamova R.T., Burlyayeva M.O., Krylova E.A., Popov V.S., Gerasimova T.V., Shelenga T.V. The effect of ecogeographic factors on the biochemical composition of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. seeds from accessions of different plant growth types. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):27-42. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o19

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Изменение климата в последние десятилетия становится одним из ключевых факторов, определяющих развитие мирового сельского хозяйства. Повышение средней температуры воздуха, увеличение частоты экстремальных погодных явлений и изменение режима выпадения осадков оказывают существенное влияние на рост, развитие и продуктивность культурных растений (Loeb et al., 2024; Foster, Rahmstorf, 2026). Согласно современным прогнозам, дальнейшее усиление климатической нестабильности способно привести к серьезным изменениям в функционировании агроэкосистем и поставить под угрозу устойчивость производства продовольствия (McKay et al., 2022). В этих условиях особое значение приобретает изучение реакции сельскохозяйственных культур не только на экстремальные погодные явления, но и на совокупность климатических факторов, определяющих качество получаемой продукции.

Особый интерес в этом отношении представляют зерновые бобовые культуры. Благодаря высокому содержанию белка, сложных углеводов, витаминов, минеральных веществ и биологически активных соединений они являются важнейшим компонентом современного продовольственного обеспечения. Кроме высокой пищевой ценности, бобовые играют существенную роль в поддержании стабильности использования земельных угодий благодаря способности вступать в симбиотические отношения с азотфиксирующими микроорганизмами, улучшая плодородие почв и снижая потребность в азотных удобрениях (Perchuk et al., 2020).

Среди представителей семейства Fabaceae особое место занимает вигна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) – культура, отличающаяся экологической пластичностью, засухоустойчивостью и способностью формировать относительно стабильный урожай в странах с аридным климатом (Ezin et al., 2021; Miroshnichenko et al., 2024; Kim D. et al., 2025). В последние годы интерес к вигне значительно возрос, расширился ареал ее возделывания, особенно в регионах с растущим дефицитом влаги и повышенными температурами воздуха. Наряду с высокой урожайностью, семена вигны характеризуются сбалансированным биохимическим составом, содержат значительное количество белка, крахмала, фенольных соединений и других полезных веществ, что делает культуру перспективной как для пищевого, так и для селекционного использования (Miroshnichenko et al., 2024).

В настоящее время существует ряд исследований, посвященных изучению внутривидовой изменчивости биохимического состава семян вигны, разработке методов экспресс-оценки содержания основных питательных компонентов семян. В некоторых из них показана значительная генотипическая вариабельность содержания белка, крахмала и антоцианов (Miroshnichenko et al., 2024; Daimon et al., 2025; Shelenga et al., 2025a; Popov et al., 2026). Большинство опубликованных исследований посвящено преимущественно сравнению генотипов, тогда как влияние условий места репродукции на формирование биохимического состава семян остается менее изученным.

Несмотря на относительно небольшое число работ, посвященных непосредственно вигне, для других зерновых бобовых культур накоплен значительный объем сведений о влиянии климатических условий на качество семян (Egorova et al., 2019; Golovina, 2021; Jansone et al., 2021; Panasiwicz, 2022; Valente et al., 2023; Mbiu et al.,

2025; Shelenga et al., 2025b). Эти исследования позволяют рассматривать сою (*Glycine max* (L.) Merr.), фасоль обыкновенную (*Phaseolus vulgaris* L.), люпин (*Lupinus* spp.) и нут (*Cicer arietinum* L.) как модели для понимания закономерностей формирования биохимического состава семян в различных эколого-географических условиях.

Основные показатели качества семян зерновых бобовых и других культур – содержание белка, крахмала и биологически активных соединений фенольной природы (антоцианов). Одним из наиболее изученных компонентов семян бобовых культур является белок. Еще в первой трети XX века ученые обращали внимание на сравнительно слабое влияние географических условий на биохимический состав семян зерновых бобовых культур. Спустя почти столетие этот вопрос остается предметом научной дискуссии. Современные исследования подтверждают, что накопление белка определяется сложным взаимодействием наследственных особенностей растения и условий среды, однако относительный вклад каждого из этих факторов существенно различается в зависимости от вида культуры и конкретного генотипа (Jansone et al., 2021; Miroshnichenko et al., 2024; Shelenga et al., 2025b).

Так, у люпина содержание белка характеризуется выраженной межвидовой и внутривидовой изменчивостью. В исследованиях K. Panasiwicz (2022) содержание белка варьировало от 323 до 445 г/кг сухого вещества в зависимости от сорта и вида, а в более поздних работах подтвердилось сохранение этого эффекта в различных почвенно-климатических условиях (Taberner-Pibernat et al., 2025). Вместе с тем в условиях Средиземноморья установлено, что увеличение количества осадков способствует повышению как урожайности, так и белковой продуктивности люпина (Valente et al., 2023). Для узколистного люпина, выращенного на северо-западе России, влияние погодных условий оказалось значительно менее выраженным, определяющую роль играли сортовые особенности (Shelenga et al., 2025b).

Для сои влияние окружающей среды на накопление белка в семенах изучено подробнее. Показано, что содержание белка изменяется в зависимости как от года репродукции, так и от региона выращивания, причем величина эффекта определяется сочетанием погодных условий, агротехнических приемов и особенностями симбиоза с азотфиксирующими микроорганизмами (Jansone et al., 2021). Исследования северных экотипов сои показали, что годы с недостатком тепла и избытком влаги сопровождались снижением урожайности, однако одновременно наблюдалось увеличение числа активных азотфиксирующих клубеньков и более интенсивное накопление белка как в вегетативных органах, так и в семенах (Golovina, 2021).

Для фасоли обыкновенной большинство исследований свидетельствует о преобладающем влиянии генотипа на содержание белка в семенах, хотя вклад климатических условий в его накопление может существенно возрастать при воздействии теплового или водного стресса (Egorova et al., 2019; Mbiu et al., 2025). В работе Т. В. Буравцевой с соавторами (Buravtseva et al., 2015) изучали содержание белка в семенах фасоли обыкновенной (*P. vulgaris*), выращенных в трех пунктах: на Крымской опытно-селекционной станции ВИР (г. Крымск; 2000, 2001, 2003, 2005 г.), на Астраханской опытной станции ВИР (г. Астрахань; 2005–2012 гг.) и на научно-производственной базе (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (г. Пушкин; 2002–2007 и 2010–2012 гг.). Авторы вы-

явили зависимость содержания белка в семенах от климатических факторов, однако коэффициенты корреляции оказались неустойчивыми в разные годы, что не позволило выделить стабильные универсальные закономерности. В репродукции семян из Крымска у образцов, выращенных в 2000–2001 гг., белок положительно коррелировал с температурой и влажностью в июне, но отрицательно – с осадками и влажностью в июле – августе; у образцов 2001 и 2005 г. связи были противоположными: накопление белка возрастало при холодном июне, жарком июле, сухой погоде в начале лета и влажном августе. В остальных репродукциях семян из Крымска (2000, 2003, 2005 г.) и Астрахани (2007–2012 гг.) значимых корреляций не обнаружено, за исключением слабых связей у астраханских образцов 2005–2006 гг. В Пушкине содержание белка зависело от обилия осадков и влажности воздуха, снижаясь при высоких температурах в июне и августе. В целом прослеживалась общая положительная связь с влажностью в июне ($r = 0,49$), однако реакция разных генотипов на погодные условия была индивидуальной.

Для сои показано, что более прохладные условия в период налива семян, меньшая облачность и увеличение продолжительности солнечного дня способствуют повышению содержания крахмала. При этом высококрахмалистые генотипы характеризуются меньшей стабильностью признака в зависимости от года и места репродукции (Dhungana et al., 2017). У фасоли (*P. vulgaris*) водный дефицит во время формирования семян оказывает влияние преимущественно на динамику накопления крахмала и его структурные характеристики, изменяя размер крахмальных гранул и активность ферментов углеводного обмена (García et al., 2021). Для вигны влияние экологических факторов изучено значительно слабее. Несмотря на высокую адаптивность культуры к засухе, имеющиеся данные свидетельствуют, что изменчивость содержания крахмала преимущественно определяется генотипом, тогда как вклад среды оценивается как менее выраженный (Stoilova, Simova-Stoilova, 2024).

Антоцианы являются одной из наиболее вариабельных групп вторичных метаболитов семян бобовых культур, их накопление зависит как от генотипа, так и от условий выращивания. Для фасоли обыкновенной показано влияние региона происхождения, сезона и года репродукции на содержание фенольных соединений (García-Díaz et al., 2018). У черносемянной сои существенное влияние на содержание антоцианов оказывают температурный режим, сроки и географическая широта посева, причем выраженность реакции в большей степени находится в зависимости от генотипа (Kim E. et al., 2014). У вигны уровень антоцианов, генетический контроль которого определяют *MYB*-гены, является одним из факторов, определяющим окраску семенной кожуры, однако в ряде исследований показана значительная изменчивость содержания антоцианов между образцами различного происхождения (Orita et al., 2019; Krylova et al., 2023). В целом накопление антоцианов у растений регулируется комплексом факторов среды, включая температуру воздуха, освещенность, водный режим и стрессовые воздействия (Li, Ahammed, 2023); у вигны влияние климатических факторов на этот показатель изучен недостаточно.

Ранее нами выявлено, что влажность воздуха достоверно влияет на изменчивость морфологических признаков вигны, в том числе и на тип роста растения (Kry-

lova et al., 2022). Общеизвестно, что изменчивость биохимических, морфологических, хозяйственно ценных и других признаков под воздействием окружающей среды сопряжена с генетическими или физиологическими механизмами адаптации растений. Однако нами не были обнаружены в доступных литературных источниках данные по изучению изменчивости комплекса взаимосвязей между биохимическими, морфологическими признаками, в том числе и типом роста растений, в контрастных условиях среды.

Таким образом, несмотря на многочисленные исследования влияния климатических факторов на биохимический состав семян зернобобовых культур, сведения о совместном влиянии генотипа, условий места репродукции и типа роста растений на накопление крахмала, белка и антоцианов у вигны остаются ограниченными. Особенно мало данных о реакции отдельных генотипов на различные эколого-географические условия выращивания. В связи с этим целью исследования являлась оценка изменчивости основных показателей хозяйственной ценности: содержания крахмала, белка и антоцианов в семенах образцов вигны с разным типом роста растения, репродуцированных в различных эколого-географических условиях, а также выявление влияния погодных факторов и генотип-специфических особенностей на формирование этих признаков.

Материалы и методы

Объектом исследования служили семена вигны (*V. unguiculata*) из коллекции ВИР (к-639, к-640, к-642, к-1783, к-2056), выращенные в условиях трех опытных станций – филиалов ВИР: Адлерской опытной станции (Адлерская ОС ВИР; влажные субтропики), Астраханской опытной станции (Астраханская ОС ВИР; континентально-засушливый климат) и Дальневосточной опытной станции (Дальневосточная ОС ВИР; муссонный климат). Образцы отличались различным типом роста главного стебля: к-2056 характеризовался детерминатным типом роста во всех условиях произрастания; к-639, к-640, к-642 – индетерминатным типом роста (в условиях Астраханской ОС растения кустовые с вьющейся верхушкой, в условиях Дальневосточной ОС – лианы); к-1783 изменял тип роста в зависимости от места репродукции (в условиях Астраханской ОС растения имели кустовую форму, Дальневосточной ОС – кустовую с вьющейся верхушкой). Изменчивость типа роста у образцов, входящих в выборку, при репродукции в условиях вышеперечисленных станций была изучена ранее (Krylova et al., 2024). Все образцы имели коричневую или красно-коричневую окраску семенной кожуры. Анализировались репродукции семян 2000–2024 гг. (53 наблюдения) (табл. 1).

Семена репродукций 2000–2024 гг. были предоставлены Кубанским генетическим банком семян – филиалом ВИР и генбанком ВИР (г. Санкт-Петербург). Образцы семян сохранялись в условиях, рекомендованных для длительного хранения семян бобовых культур (Vishniukova et al., 2018), при которых изменения макропоказателей качества в процессе хранения не превышают статистической погрешности. Ранее R.W. Pease с коллегами (Pease et al., 1988) исследовали в течении нескольких лет влияние условий хранения (относительная влажность 12% и температура +20°C) на основные показатели питательных свойств бобовых (бобы, чечевица, фасоль, люпин и горох) и установили, что значения анализируемых параметров практически не изменялись даже в менее

Таблица 1. Исследованные образцы вигны

Table 1. The studied cowpea accessions

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Происхождение / Origin	Тип роста главного стебля / Main stem growth type	Станция, год репродукции / Station, year of reproduction		
			Адлерская ОС	Астраханская ОС	Дальневосточная ОС
639	Китай / China	индетерминатный / indeterminate	2000; 2022	2005; 2007; 2008; 2021; 2020; 2022	2019; 2021; 2022
640	Китай / China	индетерминатный / indeterminate	2020; 2021	2005; 2007; 2008; 2016; 2020; 2021; 2022	2019; 2021; 2022
642	Китай / China	индетерминатный / indeterminate	2000; 2021; 2022	2005; 2007; 2008; 2020; 2022; 2023	2019; 2021; 2022
1783	Германия / Germany	изменяющийся / changing	2021; 2022	2017; 2020; 2021; 2022; 2023	2021; 2022
2056	Россия, Приморский край / Primorsky Territory, Russia	детерминатный / determinate	2021; 2022	2021; 2022; 2024	2021; 2022; 2024

Примечание: Адлерская ОС – Адлерская опытная станция ВИР; Астраханская ОС – Астраханская опытная станция ВИР; Дальневосточная ОС – Дальневосточная опытная станция ВИР; индетерминатный – в условиях Астраханской ОС растения кустовые с вьющейся верхушкой, в условиях Дальневосточной ОС – лианы; изменяющийся – в условиях Астраханской ОС растения кустовые, в условиях Дальневосточной ОС – кустовые с вьющейся верхушкой; детерминатный – в условиях Астраханской ОС и Дальневосточной ОС растения кустовые с вьющейся верхушкой

Note: Адлерская ОС – Adler Experiment Station of VIR; Астраханская ОС – Astrakhan Experiment Station of VIR; Дальневосточная ОС – Far East Experiment Station of VIR; indeterminate – bushy plants with a curly top at Astrakhan Experiment Station, and lianas at the Far East Experiment Station; changing – bushy plants at Astrakhan Experiment Station, and bushy plants with a curly top at the Far East Experiment Station; determinate – bushy plants with a curly top at both Astrakhan and the Far East Experiment Stations

оптимальных условиях, предусмотренных для хранения семян в генбанках.

Анализировались следующие климатические показатели, характеризующие места выращивания образцов, измеренные во время вегетационного периода растений (в апреле – сентябре на Астраханской ОС и Адлерской ОС; в апреле – октябре на Дальневосточной ОС): среднемесячная температура воздуха (°C) и среднее арифметическое среднемесячных температур за период вегетации растений (в. п.); сумма осадков (мм) за месяц и в. п.; среднемесячная относительная влажность воздуха (%) и среднее арифметическое среднемесячных значений влажности воздуха за в. п. Использовали архивные источники метеоданных (<https://pogodaiklimat.ru>; <https://rp5.ru>; <https://world-weather.ru/archive>) (табл. 2).

Содержание крахмала, белка и антоцианов в семенах определяли методом ближней инфракрасной спектроскопии (БИК) на анализаторе Matrix-I (Bruker, Германия) с применением ранее разработанных калибровочных моделей для семян вигны («Вигна. Белок», «Вигна. Крахмал», «Вигна. Общее содержание антоцианов») (Shelenga et al., 2025a).

Статистическая обработка данных выполнена в среде Python с использованием библиотек statsmodels, scipy и pandas. Для оценки взаимосвязей между количественными признаками применялся корреляционный анализ Спирмена. Рассчитывались корреляции между погодными условиями (п. г.) и усредненными по месту и году репродукции биохимическими показателями семян, а также между п. г. и усредненными данными для каждого образца. Кроме того, по всем данным оценивались взаимосвязи между содержанием антоциана, белка и крахмала в семенах.

Сравнение двух независимых групп (выборок) проводилось с использованием непараметрического U-критерия Манна – Уитни, а для трех и более групп – рангового дисперсионного анализа Краскела – Уоллиса. При параметрических сравнениях двух выборок использовался t-критерий Стьюдента. Апостериорный анализ (post-hoc) проводился с поправкой Бонферрони.

Для выявления ассоциаций между типом роста главного стебля растений и содержанием крахмала, белка и антоцианов в семенах вигны проведен дисперсионный анализ (ANOVA) с фиксированными факторами. В каче-

Таблица 2. Погодные условия на станциях в период выращивания семян
Table 2. Weather conditions at the stations during the seed growing period

Год репродукции / Year of reproduction	Станция / Station								
	Адлерская ОС			Астраханская ОС			Дальневосточная ОС		
	Среднемесячные температуры (°C) / Mean monthly temperatures (°C)	Суммы осадков за месяц (мм) / Monthly precipitation amounts (mm)	Среднемесячная влажность воздуха (%) / Mean monthly air humidity (%)	Среднемесячные температуры (°C) / Mean monthly temperatures (°C)	Суммы осадков за месяц (мм) / Monthly precipitation amounts (mm)	Среднемесячная влажность воздуха (%) / Mean monthly air humidity (%)	Среднемесячные температуры (°C) / Mean monthly temperatures (°C)	Суммы осадков за месяц (мм) / Monthly precipitation amounts (mm)	Среднемесячная влажность воздуха (%) / Mean monthly air humidity (%)
2000	19,57 ± 4,15	112,7 ± 92,5	77,4 ± 1,7	-	-	-	-	-	-
2005	-	-	-	20,78 ± 5,28	19,1 ± 22,5	62,7 ± 5,9	-	-	-
2007	-	-	-	20,88 ± 6,29	23,2 ± 25,2	61,1 ± 6,7	-	-	-
2008	-	-	-	20,23 ± 5,15	19,7 ± 8,7	61,6 ± 5,9	-	-	-
2016	-	-	-	21,23 ± 5,59	40,8 ± 42,9	60,4 ± 6,8	-	-	-
2017	-	-	-	20,92 ± 5,75	13,5 ± 19,6	56,4 ± 8,3	-	-	-
2019	-	-	-	-	-	-	14,17 ± 4,84	161,5 ± 191,0	79,0 ± 14,8
2020	20,90 ± 5,58	37,3 ± 35,7	70,0 ± 2,4	20,98 ± 6,57	12,3 ± 12,4	50,4 ± 6,9	-	-	-
2021	20,15 ± 5,06	150,5 ± 71,2	79,9 ± 3,9	22,43 ± 6,10	17,5 ± 19,2	52,9 ± 7,5	15,37 ± 5,92	62,3 ± 40,3	79,7 ± 11,9
2022	20,20 ± 5,24	131,3 ± 67,5	78,7 ± 3,8	21,22 ± 5,36	14,4 ± 13,7	58,9 ± 10,1	14,70 ± 5,43	122,5 ± 71,9	79,9 ± 10,0
2023	-	-	-	21,50 ± 5,35	25,3 ± 18,4	60,4 ± 8,6	-	-	-
2024	-	-	-	22,15 ± 5,03	24,7 ± 2,4	53,4 ± 8,8	15,27 ± 5,70	117,2 ± 87,8	83,3 ± 7,8

Примечание: представлены средние значения ± стандартное отклонение
Note: mean values ± standard deviations are presented

стве зависимых переменных выступали количественные показатели биохимического состава семян (крахмал, белок, антоцианы), а в качестве независимых факторов – тип роста (три градации: 1 – детерминатный во всех условиях произрастания, 2 – изменяющийся в зависимости от условий и 3 – индетерминатный). Факторы «место репродукции» и «генотип» были включены в модель как ковариаты, чтобы исключить их потенциальное влияние и выделить «чистый» эффект типа роста растений. Модель строилась в аддитивной форме (без взаимодействий), поскольку предварительный анализ показал некоторую несбалансированность данных. Все категориальные переменные были преобразованы в факторный тип, использовался тип сумм квадратов II (подходящий для несбалансированных планов). Для попарных сравнений групп по типу роста применялся post-hoc-тест Тьюки с коррекцией на множественные сравнения (Tukey, 1953).

В работе приняты следующие обозначения статистических показателей. Уровни статистической значимости (p-value) для всех используемых тестов обозначаются буквой p с соответствующим индексом: p_{ct} – для t-критерия Стьюдента; $p_{кр-у}$ – для критерия Краскела – Уоллиса (в статистике H); $p_{сп}$ – для коэффициента ранговой корреляции Спирмена (сам коэффициент обозначается r); $p_{анова}$ – для дисперсионного анализа (ANOVA, F-критерий); $p_{тьюки}$ – для post-hoc-теста Тьюки. При использовании поправки Бонферрони скорректированный уровень значимости обозначается как p_b . Во всех случаях уровень значимости принят равным $\alpha = 0,05$.

Результаты

Влияние места репродукции на биохимические показатели семян

Сравнение средних значений биохимических показателей качества семян, сформированных в различных эколого-географических условиях, в ряде случаев выявило выраженную зависимость состава семян от места репродукции.

Наибольшее среднее содержание крахмала и антоцианов отмечено в условиях Адлерской ОС, тогда как максимальные значения белка зафиксированы на Астраханской ОС, минимальное – в условиях Дальневосточной ОС (табл. 3).

Анализ по критерию Краскела – Уоллиса подтвердил наличие статистически значимых различий между семенами, выращенными на разных станциях, по содержанию крахмала ($H = 11,44$; $p_{кр-у} = 0,0033$). Post-hoc-анализ (t-тест с поправкой Бонферрони) показал, что содержание крахмала в семенах на Адлерской ОС достоверно выше, чем на Астраханской ОС ($p_b = 0,0014$), тогда как различия по этим признакам между репродукциями других станций не были статистически значимыми. По показателям белка и антоцианов достоверных различий между семенами, репродуцированными на разных станциях, не выявлено.

Можно предположить, что эколого-географические условия в первую очередь определяют вариабельность содержания крахмала, тогда как белок и антоцианы демонстрируют более стабильный уровень накопления.

Влияние генотипа на биохимические показатели качества семян

Анализ данных по всем изученным репродукциям семян для каждого генотипа не выявил выраженной внутривидовой изменчивости по содержанию белка, крахмала и антоцианов. Максимальное содержание крахмала отмечено у образца к-2056, минимальное – у к-639. По содержанию белка лидировал к-639, тогда как минимальные значения были характерны для к-2056. Наибольшее содержание антоцианов обнаружено у к-640, минимальное – у к-1783. Несмотря на разброс крайних значений в исследуемой выборке не удалось выявить статистически значимых отличий между образцами по критерию Стьюдента (табл. 4).

Следует отметить, что сильных взаимосвязей между показателями содержания крахмала, белка и антоцианов в семенах не наблюдалось, причем значимой из них была только корреляция между количеством крахмала и антоциана, r (коэффициент ранговой корреляции Спирмена) = 0,347; $p_{сп} = 0,001$.

Изменчивость (экологическая пластичность) биохимических показателей семян на разных станциях в различные годы

Для оценки влияния межгодовой изменчивости погодных условий на биохимический состав семян в пределах каждой климатической зоны (места репродукции) данные внутри каждой станции усредняли по годам – все

Таблица 3. Содержание крахмала, белка и антоцианов в семенах вигны, выращенных на разных опытных станциях ВИР

Table 3. Starch, protein, and anthocyanin content in cowpea seeds grown at various Experiment Stations of VIR

Станция / Station	Крахмал (% сух. массы) / Starch (% dry weight)	Белок (% сух. массы) / Protein (% dry weight)	Антоцианы (мг/100 г сух. массы) / Anthocyanins (mg/100 g dry weight)
Адлерская ОС	50,6 ± 2,6*	27,5 ± 5,4	10,04 ± 1,84
Астраханская ОС	47,7 ± 2,3*	28,8 ± 5,3	8,50 ± 1,55
Дальневосточная ОС	49,0 ± 2,5	25,4 ± 4,5	8,97 ± 1,65

Примечание: Адлерская ОС – Адлерская опытная станция ВИР; Астраханская ОС – Астраханская опытная станция ВИР; Дальневосточная ОС – Дальневосточная опытная станция ВИР; представлены средние значения ± стандартное отклонение; * – показатели статистически значимо отличаются по критерию Стьюдента ($p_{ct} < 0,05$); сух. массы – сухой массы

Note: Адлерская ОС – Adler Experiment Station of VIR; Астраханская ОС – Astrakhan Experiment Station of VIR; Дальневосточная ОС – Far East Experiment Station of VIR; mean values ± standard deviations are presented; * – the indicators significantly differ according to Student's test ($p_{ct} < 0.05$)

Таблица 4. Среднее содержание крахмала, белка и антоцианов в семенах разных образцов вигны по всем годам исследования**Table 4.** Average starch, protein and anthocyanin content in the seeds of different cowpea accessions across all the years of the study

Образец / Accession	Крахмал (% сух. массы) / Starch (% dry weight)	Белок (% сух. массы) / Protein (% dry weight)	Антоцианы (мг/100 г сух. массы) / Anthocyanins (mg/100 g dry weight)
к-639	47,7 ± 2,9	29,2 ± 7,2	9,33 ± 1,36
к-640	48,9 ± 1,8	28,5 ± 3,8	9,79 ± 1,94
к-642	48,6 ± 2,3	28,9 ± 4,4	8,83 ± 2,21
к-1783	48,2 ± 2,6	24,7 ± 2,3	7,05 ± 1,44
к-2056	51,6 ± 1,7*	22,7 ± 4,9	9,34 ± 2,08

Примечание: представлены средние значения ± стандартное отклонение; сух. массы – сухой массы; * – отмечены выделившиеся образцы

Note: mean values ± standard deviations are presented; * – best values are marked

образцы, выращенные в один год, объединяли в одно наблюдение. Такой подход позволяет нивелировать генотипические различия и выделить экологическую составляющую изменчивости, обусловленную колебаниями погоды от года к году. Отдельно по каждой станции рассчитывали корреляции Спирмена между средними годовыми значениями содержания крахмала, белка и антоцианов в семенах и климатическими показателями: средней температурой, средней суммой осадков, средней влажностью воздуха за вегетационный период (табл. 5).

На Адлерской и Астраханской ОС значимых корреляций между изучаемыми показателями не выявлено ($p_{\text{сн}} > 0,05$). На Астраханской ОС отмечены положительные корреляции между содержанием белка в семенах и осадками, выпавшими за сезон ($r = 0,693$, $p_{\text{сн}} = 0,026$), и средней влажностью за сезон ($r = 0,802$, $p_{\text{сн}} = 0,005$), а также антоцианов с осадками за время вегетации растений ($r = 0,806$, $p_{\text{сн}} = 0,005$). Скорректированный r_b рассчитан для 9 тестов для каждой станции (3 биохимических признака × 3 климатических фактора). После по-

Таблица 5. Экологические корреляции между интегральными климатическими показателями (по средним годовым значениям) и биохимическими показателями семян, выращенными в Краснодарском крае, Астраханской области и Приморском крае**Table 5.** Ecological correlations between integrated climate indicators (based on mean annual values) and biochemical indicators of seeds grown in Krasnodar Territory, Astrakhan Province, and Primorsky Territory

Станция / Station	Признак / Indicator	Климатический фактор / Climate factor	r	p _{сн}
Адлерская ОС	Крахмал / Starch	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	–0,600	0,400
Адлерская ОС	Крахмал / Starch	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	0,400	0,600
Адлерская ОС	Крахмал / Starch	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	0,400	0,600
Адлерская ОС	Белок / Protein	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	–0,800	0,200
Адлерская ОС	Белок / Protein	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	0,000	1,000
Адлерская ОС	Белок / Protein	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	0,000	1,000
Адлерская ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	0,000	1,000
Адлерская ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	–0,200	0,800
Адлерская ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	–0,200	0,800

Таблица 5. Окончание

Table 5. The end

Станция / Station	Признак / Indicator	Климатический фактор / Climate factor	r	p _{сн}
Астраханская ОС	Крахмал / Starch	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	-0,025	0,946
Астраханская ОС	Крахмал / Starch	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	0,018	0,960
Астраханская ОС	Крахмал / Starch	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	0,068	0,853
Астраханская ОС	Белок / Protein	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	-0,571	0,084
Астраханская ОС	Белок / Protein	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	0,693*	0,026
Астраханская ОС	Белок / Protein	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	0,802**	0,005
Астраханская ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	0,152	0,676
Астраханская ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	0,806**	0,005
Астраханская ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	0,285	0,425
Дальневосточная ОС	Крахмал / Starch	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	0,105	0,895
Дальневосточная ОС	Крахмал / Starch	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	-0,105	0,895
Дальневосточная ОС	Крахмал / Starch	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	0,632	0,368
Дальневосточная ОС	Белок / Protein	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	-0,800	0,200
Дальневосточная ОС	Белок / Protein	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	0,800	0,200
Дальневосточная ОС	Белок / Protein	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	-0,400	0,600
Дальневосточная ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Средняя температура во время в. п. / Mean temperature during the g. s.	-0,800	0,200
Дальневосточная ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Сумма осадков во время в. п. / Total precipitation amount during the g. s.	0,800	0,200
Дальневосточная ОС	Антоцианы / Anthocyanins	Средняя влажность воздуха во время в. п. / Mean air humidity during the g. s.	-0,600	0,400

Примечание: * – значимые корреляции; ** – корреляции, значимые после поправки Бонферрони (скорректированный $p_b < 0,05$); r – коэффициент ранговой корреляции Спирмена; p_{сн} – уровень статистической значимости (нескорректированный); в. п. – период вегетации; белок, крахмал, антоцианы – содержание белка, крахмала и антоцианов в семенах

Note: * – significant correlations; ** – correlations significant after the Bonferroni correction (adjusted $p_b < 0.05$); r – Spearman's rank correlation coefficient; p_{сн} – level of statistical significance (unadjusted); g. s. – growing season; protein, starch, anthocyanins – the content of protein, starch, and anthocyanins in seeds

правки Бонферрони для 9 тестов ($\alpha = 0,05/9 \approx 0,0056$) статистически значимыми остаются корреляции между содержанием белка в семенах и влажностью воздуха ($p_b = 0,045$), а также между количеством антоцианов в семенах и суммой осадков ($p_b = 0,045$). Корреляция между содержанием белка и суммой осадков после поправки стала незначима ($p_b = 0,234$). Учитывая малое число лет ($n = 4$), полученные результаты следует рассматривать как предварительные; для подтверждения выявленных тенденций необходим анализ на более длительных временных рядах.

Генотип-специфические реакции биохимических показателей качества семян на изменения условия среды

Анализ изучаемых характеристик у отдельных генотипов показал, что диапазон изменчивости биохимических показателей семян в различных условиях варьирует у разных образцов, что свидетельствует о наличии взаимодействия генотипа и среды (табл. 6).

Наиболее выраженная реакция на изменение климатических условий выявлена у образца к-1783. Содержание белка в его семенах положительно коррелировало

Таблица 6. Значимые генотипические корреляции между биохимическими показателями семян и климатическими факторами

Table 6. Significant genotypic correlations between biochemical indicators of seeds, and climate factors

Образец / Accession	Признак / Indicator	Климатический фактор / Climate factor	r	p _{сн}
к-639	Антоцианы / Anthocyanins	Осадки июня / Precipitation in June	0,609	0,047
к-639	Белок / Protein	Осадки сентября / Precipitation in September	-0,787	0,004
к-639	Крахмал / Starch	Температура августа / Temperature in August	-0,619	0,042
к-640	Антоцианы / Anthocyanins	Осадки мая / Precipitation in May	0,557	0,048
к-640	Крахмал / Starch	Влажность апреля / Humidity in April	0,726	0,005
к-640	Крахмал / Starch	Осадки июля / Precipitation in July	0,555	0,049
к-642	Крахмал / Starch	Осадки апреля / Precipitation in April	0,663	0,019
к-642	Крахмал / Starch	Влажность апреля / Humidity in April	0,622	0,031
к-1783	Антоцианы / Anthocyanins	Осадки августа / Precipitation in August	-0,695	0,038
к-1783	Антоцианы / Anthocyanins	Температура августа / Temperature in August	0,667	0,050
к-1783	Белок / Protein	Температура мая / Temperature in May	0,946**	< 0,001
к-1783	Белок / Protein	Температура июля / Temperature in July	0,882	0,002
к-1783	Белок / Protein	Влажность июля / Humidity in July	-0,861	0,003
к-1783	Белок / Protein	Влажность сентября / Humidity in September	-0,820	0,007
к-1783	Белок / Protein	Температура июня / Temperature in June	0,762	0,017
к-1783	Белок / Protein	Влажность июня / Humidity in June	-0,714	0,031
к-1783	Белок / Protein	Осадки июня / Precipitation in June	-0,695	0,038
к-1783	Белок / Protein	Влажность августа / Humidity in August	-0,689	0,040
к-2056	Крахмал / Starch	Осадки мая / Precipitation in May	0,919**	< 0,001
к-2056	Крахмал / Starch	Влажность апреля / Humidity in April	0,919**	< 0,001
к-2056	Крахмал / Starch	Осадки апреля / Precipitation in April	0,731	0,025
к-2056	Крахмал / Starch	Осадки июля / Precipitation in July	0,731	0,025
к-2056	Крахмал / Starch	Влажность мая / Humidity in May	0,725	0,027

Примечание: ** – корреляции, значимые после поправки Бонферрони (скорректированный $p_b < 0,05$); r – коэффициент ранговой корреляции Спирмена; p_{сн} – уровень статистической значимости (нескорректированный); белок, крахмал, антоцианы – содержание белка, крахмала и антоцианов в семенах; температура – средняя температура месяца; осадки – сумма осадков за месяц; влажность – средняя влажность воздуха месяца

Note: ** – correlations significant after the Bonferroni correction (adjusted $p_b < 0,05$); r – Spearman's rank correlation coefficient; p_{сн} – level of statistical significance (unadjusted); protein, starch, anthocyanins – the content of protein, starch, and anthocyanins in seeds; temperature – mean temperature for the month; precipitation – total precipitation amount for the month; humidity – mean humidity for the month

с температурой воздуха в течение вегетационного периода, особенно с температурой мая ($r = 0,946$, $r_{\text{сп}}$ и $p_b < 0,001$, после поправки Бонферрони), и отрицательно – с количеством осадков и относительной влажностью воздуха (см. табл. 6). Следовательно, в более теплых и относительно сухих условиях данный генотип формировал семена с повышенным содержанием белка, тогда как увеличение количества осадков и влажности воздуха сопровождалось снижением этого показателя. Вероятно, накопление белка у образца к-1783 в значительной степени определялось температурно-влажностным режимом вегетационного периода.

Для образца к-2056 наиболее чувствительным к условиям репродукции показателем оказалось содержание крахмала. Его накопление положительно коррелировало как с количеством атмосферных осадков в мае ($r = 0,919$, $r_{\text{сп}}$ и $p_b < 0,001$), так и с относительной влажностью воздуха, особенно в начале вегетационного периода в апреле ($r = 0,919$, $r_{\text{сп}}$ и $p_b < 0,001$) (см. табл. 6). Наибольшее содержание крахмала отмечалось при обильном увлажнении, тогда как в условиях недостатка влаги этот показатель снижался. Полученные результаты могут свидетельствовать о высокой зависимости формирования углеводного комплекса семян данного генотипа от условий влагообеспеченности.

Образцы к-639, к-640 и к-642 характеризовались менее выраженной зависимостью биохимических показателей от погодных условий. Вместе с тем у образцов к-640 и к-642 максимальное накопление крахмала и антоцианов наблюдалось при репродукции на Адлерской ОС, что может свидетельствовать о более благоприятном сочетании гидротермических условий влажных субтропиков для реализации их биохимического потенциала.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что реакция биохимического состава семян вигны на усло-

вия выращивания, вероятнее всего, носит генотип-специфический характер. Для отдельных образцов ведущую роль играют температурные условия вегетационного периода (к-1783), тогда как для других определяющим фактором является режим увлажнения (к-2056). У остальных изученных генотипов влияние условий среды выражено слабее, что указывает на более высокую стабильность биохимического состава семян.

В целом результаты исследования показывают, что биохимический состав семян вигны формируется под совместным влиянием генотипических особенностей образцов и эколого-географических условий репродукции. Наиболее чувствительным к изменениям гидротермического режима оказался крахмал, содержание которого зависело как от количества осадков, так и от относительной влажности воздуха. Накопление белка в большей степени определялось генотипическими особенностями, а также температурными условиями отдельных этапов вегетации. Изменчивость содержания антоцианов была выражена в меньшей степени и не демонстрировала столь четкой зависимости от изученных климатических факторов.

Исследование ассоциаций между типом роста растений и содержанием крахмала, белка и антоцианов в семенах

Результаты однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) (табл. 7) показали, что тип роста оказывает статистически значимое влияние на все три изученных показателя ($p_{\text{анова}} < 0,001$). При этом факторы «станция (место репродукции)» и «образец (генотип)» также вносили существенный вклад в изменчивость признаков, но даже после их учета эффект типа роста оставался высокозначимым, что свидетельствует о его независимом действии.

Таблица 7. Содержание крахмала, белка и антоцианов (среднее $\pm$ стандартное отклонение) в семенах образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с различными типами роста растений

Table 7. Starch, protein, and anthocyanin content (mean $\pm$ standard deviation) in seeds of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. accessions belonging to different plant growth types

Тип роста растения / Plant growth type	n	Содержание биохимических веществ в семенах / Content of biochemical compounds in seeds		
		Крахмал (% сух. массы) / Starch (% dry weight)	Белок (% сух. массы) / Protein (% dry weight)	Антоцианы (мг/100 г сух. массы) / Anthocyanins (mg/100 g dry weight)
Детерминантный / Determinate	9	51,3 $\pm$ 0,021 a	22,7 $\pm$ 0,047 a	9,21 $\pm$ 2,05 a
Изменяющийся / Changing	9	48,3 $\pm$ 0,029 b	25,7 $\pm$ 0,033 ab	7,40 $\pm$ 1,86 a
Индетерминантный / Indeterminate	36	48,1 $\pm$ 0,023 b	29,3 $\pm$ 0,049 b	9,13 $\pm$ 1,93 a
F(2,47)		575,33	65,91	23,11
$p_{\text{анова}}$		< 0,001	< 0,001	< 0,001

Примечание: разные буквы (a, b, ab) в пределах одного столбца указывают на статистически значимые различия между группами, выделенными по типу роста (тест Тьюки, $p_{\text{Тьюки}} < 0,05$); n – число наблюдений в группе; F-статистика и $p_{\text{анова}}$ – уровни приведены для общего эффекта фактора «тип роста» в модели ANOVA с учетом факторов «станция (место) репродукции» и «образец (генотип)» (df для числителя = 2, для знаменателя = 47)

Note: different letters (a, b, or ab) within a column indicate statistically significant differences between the groups classified according to the growth type (Tukey's test, $p_{\text{Тьюки}} < 0,05$); n – number of observations per group; F-statistics and $p_{\text{анова}}$ – values correspond to the overall effect of the factor "plant growth type" in the ANOVA model adjusted for "station (site) of reproduction" and "accession (genotype)" as additional factors (df numerator = 2, and denominator = 47)

Семена образца с детерминантным типом роста (к-2056) накапливали достоверно больше крахмала, чем семена образцов с другим типом. Разница средних значений составила 3% от сухой (сух.) массы по сравнению с образцом (к-1783), изменяющим тип роста, и 3,3% – с образцами (к-639, к-640, к-642) с индетерминантным типом ($p_{\text{Тьюки}} < 0,05$). Достоверных различий между образцами, изменяющими тип роста в зависимости от условий, и образцами с индетерминантным типом роста не обнаружено ($p_{\text{Тьюки}} = 0,947$).

Напротив, содержание белка было минимальным у образца с детерминантным типом роста и максимальным у образцов с индетерминантным типом: разница составила 6,6% от сух. массы ($p_{\text{Тьюки}} = 0,001$). Образец, изменяющий тип роста в разных условиях, занимал промежуточное положение и статистически не отличался от образцов с детерминантным и индетерминантным типом роста.

Содержание антоцианов в семенах было ассоциировано с типом роста растений ($p_{\text{анова}} < 0,001$). Однако парные различия не достигли порога статистической значимости при коррекции по критерию Тьюки, наибольшая разница наблюдалась по количеству антоцианов между образцами с индетерминантным и изменяющимся в разных условиях типами роста ($p_{\text{Тьюки}} = 0,053$, на уровне тенденции). Это может указывать на недостаточное разнообразие выборки (все семена имели красно-коричневый цвет) для выявления конкретных парных контрастов при относительно высокой внутригрупповой вариабельности, поэтому выводы о связи между типом роста растения и содержанием антоцианов в семенах следует рассматривать как предварительные.

Таким образом, результаты свидетельствуют о том, что, вероятно, биохимический состав семян ассоциирован с типом роста растений, причем наиболее выраженные отличия затрагивают содержание крахмала и белка в семенах, а для антоцианов связь прослеживается на уровне тенденции. Важно подчеркнуть, что выявленные ассоциации не означают причинно-следственного влияния содержания веществ на тип роста; они лишь указывают на сопряженность данных признаков, которая, вероятно, обусловлена общими генетическими или физиологическими механизмами, что требует более подробного изучения, например с использованием неспецифического метаболомного профилирования.

Обсуждение

Экологическая пластичность биохимических показателей качества семян

Оценка влияния погодных условий на биохимический состав семян в пределах каждой климатической зоны показала, что при более мягких условиях роста (при достаточной влагообеспеченности во все годы) на Адлерской ОС и Дальневосточной ОС значимых корреляций между изученными признаками не наблюдалось. На Астраханской ОС (в зоне аридного климата) отмечались достоверные высокие положительные корреляции между содержанием белка в семенах и влажностью воздуха во время вегетации ($r = 0,802$, $p_{\text{сн}} = 0,005$), а также между количеством антоцианов и суммой осадков за в. п. ($r = 0,806$, $p_{\text{сн}} = 0,005$). Аналогичные результаты можно получить, если сравнить данные изучения узколистного люпина, выращенного в Северо-Западном регионе России при достаточной влажности (Shelenga et al., 2025b) и в условиях Средиземноморья с различным количеством

осадков (Valente et al., 2023). На северо-западе России влияние погодных условий оказалось значительно менее выраженным, чем в Средиземноморье, где увеличение количества осадков вызвало повышение белка. Повышение значений корреляций при большей изменчивости некоторых признаков, которую мы наблюдали при сравнении качественного состава семян, сформированных в жестких засушливых условиях и с более высокой влажностью воздуха на Астраханской ОС, вполне закономерны: подобные явления отмечались и ранее у многих культурных растений (Rostova, 2002; Burlyayeva, Rostova, 2014, 2019). Кроме того, увеличение количества белка и антоцианов с повышением влагообеспеченности на Астраханской ОС может быть связано с тем, что данные условия способствуют более активному вегетативному росту и, как следствие, накоплению азотистых соединений и вторичных метаболитов. Однако ввиду малого числа наблюдений эти результаты следует рассматривать как предварительные. Для подтверждения выявленных тенденций необходим анализ на более длительных временных рядах. Отсутствие значимых экологических корреляций на Адлерской ОС и Дальневосточной ОС, а также нестабильность связей на Астраханской ОС свидетельствуют об отсутствии устойчивой зависимости биохимического состава семян от межгодовых колебаний погоды в пределах отдельных станций. Это согласуется с данными, полученными для других бобовых культур, где влияние погодных условий на качество семян часто оказывается менее выраженным, чем генотипические различия (Buravtseva et al., 2015; Mannino et al., 2021; Mbiu et al., 2025).

Генотип-специфические реакции параметров качества семян в различных условиях среды

В отличие от экологических, генотипические корреляции, рассчитанные между образцами по их средним значениям, выявили выраженные специфические реакции. Наиболее выраженную генотип-специфичность продемонстрировали образцы к-1783 и к-2056.

У образца к-1783 (изменяющийся тип роста) содержание белка положительно коррелировало с температурой мая, что указывает на высокую чувствительность данного генотипа к температурному режиму в начальном периоде вегетации. Положительная корреляция содержания белка с температурой мая позволяет предположить, что ранневесеннее тепло способствует активизации вегетативного роста и процессов симбиотической азотфиксации, формируя более мощный пул азотистых соединений, который впоследствии ремобилизуется в семена в период их налива. Аналогичные закономерности ранее были описаны для сои в условиях Северного Кавказа, где повышение температуры в начале вегетации сопровождалось увеличением содержания белка в семенах (Novikova et al., 2018). Отрицательные корреляции белка с влажностью в июле и сентябре ($r = -0,861$ и $r = -0,820$ соответственно) свидетельствуют о том, что избыточное увлажнение в середине и конце вегетации неблагоприятно сказывается на накоплении белка у этого генотипа, вероятно, из-за замедления процессов созревания или повышенной фитопатогенной нагрузки.

У образца к-2056 (детерминантный тип роста) накопление крахмала положительно коррелировало с осадками мая ($r = 0,919$, $p_{\text{б}} < 0,001$) и влажностью апреля ($r = 0,919$, $p_{\text{б}} < 0,001$), что свидетельствует о высокой зависимости формирования углеводного комплекса семян дан-

ного генотипа от условий раннего увлажнения. Это согласуется с физиологической ролью водного режима в регуляции фотосинтетической активности и транспорта ассимилятов: при оптимальном увлажнении возрастает интенсивность функционирования листового аппарата, что способствует усиленному поступлению продуктов фотосинтеза в генеративные органы, где они используются для синтеза крахмала (Fargoq et al., 2009). Для данного генотипа ранневесеннее увлажнение является одним из критических факторов, определяющих потенциальную крахмалистость семян.

Для индетерминантных образцов (к-639, к-640, к-642) после поправки Бонферрони значимых генотипических корреляций не выявлено, что указывает на более стабильное формирование биохимического состава их семян в различных погодных условиях. Вместе с тем у образцов к-640 и к-642 максимальное накопление крахмала и антоцианов наблюдалось при репродукции на Адлерской ОС, что может свидетельствовать о более благоприятном сочетании гидротермических условий влажных субтропиков для реализации их биохимического потенциала, однако эти различия не достигали статистической значимости.

Ассоциации типа роста растений с биохимическим составом семян

Согласно результатам дисперсионного анализа, тип роста оказывал высокозначимое влияние на накопление крахмала и белка даже после учета эффектов места репродукции и генотипа ($p_{\text{анова}} < 0,001$). Образец с детерминантным типом роста накапливал достоверно больше крахмала (51,3% сух. массы) по сравнению с генотипом, изменяющим в разных условиях тип роста (48,3%), и индетерминантным генотипом (48,1%). Напротив, содержание белка было минимальным (22,7%) у образца с детерминантным типом роста и максимальным – с индетерминантным (29,3%); изменяющий рост образец занимал промежуточное положение (25,7%).

Ранее, в работе Е. А. Крыловой с коллегами (Krylova et al., 2022), было показано, что влажность воздуха оказывает достоверное влияние на изменчивость морфологических признаков, в том числе на способность растений к формированию вьющегося побега, причем реакция на влажность была нетождественной у разных генотипов: индетерминантные образцы проявляли большую пластичность, тогда как детерминантный сорт к-2056 сохранял компактную форму куста даже при избыточном увлажнении (Krylova et al., 2022). В настоящем исследовании на том же генетическом материале мы показали, что тип роста ассоциирован не только с морфологией, но и с биохимическим составом семян. Полученные результаты могут свидетельствовать о возможной генетической сопряженности локусов, определяющих тип роста, с генами, регулирующими углеводный и белковый обмен, или с плейотропным действием генов, отвечающих за развитие бобовых культур (Akinmade et al., 2026). Для проверки этой гипотезы необходимы дальнейшие молекулярно-генетические и метаболомные исследования.

Для антоцианов влияние типа роста растений также было значимо ($p_{\text{анова}} < 0,001$), однако попарные различия не достигали порога статистической значимости. По тесту Тьюки наибольшая разница между образцом, изменяющими тип роста, и генотипами с индетерминантным типом составляла 1,73 мг/100 г. В нашем исследовании ассоциация антоцианов с типом роста растений просле-

живается лишь на уровне тенденции и требует дальнейшего изучения с привлечением нового материала.

Селекционное значение и перспективы использования изученных образцов вигны

Полученные результаты имеют прикладное значение для селекционной работы с вигной. Образец к-2056 (детерминантный тип роста), характеризующийся высоким содержанием крахмала (в среднем 51,3% сух. массы), который накапливается при увеличенной влажности в первой половине вегетационного периода, может быть перспективен для выращивания в регионах с устойчивым весенним влагообеспечением (например, в условиях Дальнего Востока) с целью получения высококрахмалистого семенного материала. Напротив, образец к-1783 (изменяющий тип роста), демонстрирующий выраженную чувствительность к температурно-влажностному режиму и имеющий повышенный уровень белка при теплых условиях (до 29,3% сух. массы), может быть рекомендован для возделывания в более континентальных, засушливых регионах с жарким летним периодом (например, в условиях Астраханской области), где он способен реализовать свой белковый потенциал.

Индетерминантные образцы (к-639, к-640, к-642), характеризующиеся более стабильным биохимическим составом, могут быть использованы в селекционных программах, направленных на создание сортов с высокой адаптивной способностью к различным эколого-географическим условиям.

Заключение

По нашим данным, вклад климатических и генетических факторов в формирование биохимического состава семян вигны носит дифференцированный характер и зависит от изучаемого признака. Наиболее сильно связана с климатическими условиями изменчивость содержания крахмала в семенах, определяемая преимущественно водным режимом среды. Содержание белка в семенах контролируется главным образом генотипом и температурными условиями начала вегетации. Причем содержание белка и крахмала в семенах у изученных нами образцов ассоциировано и с типом роста растения. Образцы с детерминантным типом роста накапливают больше крахмала и меньше белка в семенах по сравнению с генотипами с индетерминантным типом роста. Изменчивость антоцианов в исследованной выборке семян не демонстрирует устойчивой климатической детерминации, слабо сопряжена с типом роста растения и требует дальнейшего изучения. Выявленные генотип-специфические реакции подтверждают перспективность направленной селекции вигны с учетом адаптивных стратегий накопления запасных веществ в различных эколого-географических условиях.

References / Литература

- Akinmade H., Ben-Israel S., Ryan A., Johnson C., Tharayil A., Arias R.O. et al. Genetic dissection of protein content in cowpea using custom-made NIRS equations and GWAS as a model for nutritional breeding and undergraduate research training. *G3 (Bethesda)*. 2026;16(6):jkag088. DOI: 10.1093/g3journal/jkag088
- Buravtseva T.V., Burlyaeva M.O., Egorova G.P., Solovyeva A.E. Screening of samples of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) from VIR collection for breeding of varieties with

- high protein content. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(7):47-51. [in Russian] (Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Егорова Г.П., Соловьева А.Е. Скрининг образцов фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.) из коллекции ВИР для селекции сортов с высоким содержанием белка в семенах. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(7):47-51).
- Burlyaeva M.O., Rostova N.S. Variability and determinacy of morphological, phenological, biochemical and agronomic characteristics in forage soybeans of various uses under the conditions of Krasnodar region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2014;175(2):42-52. [in Russian] (Бурляева М.О., Ростова Н.С. Изменчивость и детерминированность морфологических, фенологических, биохимических и хозяйственных признаков кормовой сои разных направлений использования в условиях Краснодарского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2014;175(2):42-52).
- Burlyaeva M.O., Rostova N.S. Variability of the structure of correlations between the morphological and commercial traits of soybeans with different growth habit and branching characters. *Vavilov Journal Genetics and Breeding*. 2019;23(6):708-716. DOI: 10.18699/VJ19.544
- Daimon H., Yamamoto R., Matsumura A., Ohashi Y., Yonaha K. Variations in functional components in seeds among black cowpea lines traditionally cultivated in Miyako Islands, Okinawa, Japan. *Plant Production Science*. 2025;28(4):307-314. DOI: 10.1080/1343943X.2025.2539225
- Dhungana S.K., Kulkarni K.P., Kim M., Ha B.K., Kang S., Song J.T. et al. Environmental stability and correlation of soybean seed starch with protein and oil contents. *Plant Breeding and Biotechnology*. 2017;5(4):293-303. DOI: 10.9787/PBB.2017.5.4.293
- Egorova G.P., Perchuk I.N., Solovyeva A.E., Buravtseva T.V. Sources of high protein content in common bean seeds (*Phaseolus vulgaris*) from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(2):44-50. [in Russian] (Егорова Г.П., Перчук И.Н., Соловьева А.Е., Буравцева Т.В. Источники высокого содержания белка семян фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris*) из мировой коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(2):44-50). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-44-50
- Ezin V., Tosse A.G.C., Chabi I.B., Ahanchede A. Adaptation of cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) to water deficit during vegetative and reproductive phases using physiological and agronomic characters. *International Journal of Agronomy*. 2021;(1):9665312. DOI: 10.1155/2021/9665312
- Farooq M., Wahid A., Kobayashi N., Fujita D., Basra S.M.A. Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*. 2009;29(1):185-212. DOI: 10.1051/agro:2008021
- Foster G., Rahmstorf S. Global warming has accelerated significantly. *Geophysical Research Letters*. 2026; 53:e2025GL118804. DOI: 10.1029/2025GL118804
- García M.C., Peña-Valdivia C.B., Gracida L.A.B., Jiménez P.Y., Esteva A.G., Padilla-Chacón D. Effects of water restriction on carbohydrates concentration, starch granules size and amylolytic activity in seeds of *Phaseolus vulgaris* L. and *P. acutifolius* A. Gray. *Botanical Sciences*. 2021;99(2):364-376. DOI: 10.17129/bots.2647
- García-Díaz Y.D., Aquino-Bolaños E., Chávez-Servia J.L., Vera-Guzmán A.M., Carrillo-Rodríguez J.C. Bioactive compounds and antioxidant activity in the common bean are influenced by cropping season and genotype. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2018;78(2):255-265. DOI: 10.4067/S0718-58392018000200255
- Golovina E.V. Physiological features of the accumulation and distribution of whole protein in the organs of plants of soybean varieties of the Northern ecotype. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;650(1):012102. DOI: 10.1088/1755-1315/650/1/012102
- Jansone I., Šterna V., Stramkale V., Stramkalis A., Justs A., Zute S. Impact of cultivation technologies on soybean production and quality. In: *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 13th International Scientific and Practical Conference*. Vol. 1. Rezekne; 2021. p.101-107. DOI: 10.17770/etr2021vol1.6605
- Kim D.K., Ochar K., Iwar K., Ha B.K., Kim S.H. Cowpea (*Vigna unguiculata* L.) production, genetic resources and strategic breeding priorities for sustainable food security: a review. *Frontiers in Plant Science*. 2025;16:1562142. DOI: 10.3389/fpls.2025.1562142
- Kim E.H., Lee O.K., Kim J.K., Kim S.L., Lee J., Kim S.H. et al. Isoflavones and anthocyanins analysis in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) from three different planting locations in Korea. *Field Crops Research*. 2014;156:76-83. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.10.020
- Krylova E.A., Chunikhina O.A., Boyko A.P., Miroshnichenko E.V., Khlestkina E.K., Burlyaeva M.O. Variability of morphological and phenological traits in *Vigna unguiculata* (L.) Walp. accessions contrasting by growth type in different ecological and geographical conditions. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2024;7(2):16-30. [in Russian] (Крылова Е.А., Чунихина О.А., Бойко А.П., Мирошниченко Е.В., Хлесткина Е.К., Бурляева М.О. Изменчивость морфологических и фенологических признаков среди контрастных по типу роста образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. в разных эколого-географических условиях. *Биотехнология и селекция растений*. 2024;7(2):16-30). DOI: 10.30901/2658-6266-2024-2-о7
- Krylova E.A., Khlestkina E.K., Burlyaeva M.O. Influence of air humidity on variability of morphological features of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. in artificial conditions. *Ecological genetics*. 2022;20(3):215-229. [in Russian] (Крылова Е.А., Хлесткина Е.К., Бурляева М.О. Влияние влажности воздуха на изменчивость морфологических признаков *Vigna unguiculata* (L.) Walp. в искусственных условиях. *Экологическая генетика*. 2022;20(3):215-229). DOI: 10.17816/ecogen108877
- Krylova E.A., Mikhailova A.S., Zinchenko Y.N., Perchuk I.N., Razgonova M.P., Khlestkina E.K. et al. The content of anthocyanins in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) seeds and contribution of the MYB gene cluster to their coloration pattern. *Plants (Basel)*. 2023;12(20):3624. DOI: 10.3390/plants12203624
- Li Z., Ahammed G.J. Plant stress response and adaptation via anthocyanins: A review. *Plant Stress*. 2023;10:100230. DOI: 10.1016/j.stress.2023.100230
- Loeb N.G., Ham S.H., Allan R.P., Thorsen T.J., Meyssignac B., Kato S. et al. Observational assessment of changes in earth's energy imbalance since 2000. *Surveys in Geophysics*. 2024;45(6):1757-1783. DOI: 10.1007/s10712-024-09838-8
- Mannino G., Gentile C., Ertani A., Serio G., Berteau C.M. Anthocyanins: biosynthesis, distribution, ecological role, and use of biostimulants to increase their content in plant foods – A review. *Agriculture*. 2021;11(3):212. DOI: 10.3390/agriculture11030212
- Mbiu J., Assefa T., Mukankusi C., Rubyogo J.C., Philipo M. Consumer traits of common beans: a global and regional perspective on seed coat darkening, cooking time, protein, and

- mineral content. *Frontiers in Nutrition*. 2025;12:1658338. DOI: 10.3389/fnut.2025.1658338
- McKay D.I.A., Staal A., Abrams J.F., Winkelmann R., Sakschewski B., Loriani S. et al. Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*. 2022;377(6611):eabn7950. DOI: 10.1126/science.abn7950
- Miroshnichenko E.V., Perchuk I.N., Nesterova T.A., Burlyaeva M.O. The influence of weather conditions and agrotechnics on the productivity and quality of vigna seeds in the Astrakhan region. *Legumes and Groat Crops*. 2024;2(50):110-119. [in Russian] (Мирошниченко Е.В., Перчук И.Н., Нестерова Т.А., Бурляева М.О. Влияние погодных условий и агротехники на продуктивность и качество семян вигны в условиях Астраханской области. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2024;2(50):110-119). DOI: 10.24412/2309-348X-2024-2-110-119
- Novikova L.Yu., Seferova I.V., Nekrasov A.Yu., Perchuk I.N., Shelenga T.V., Samsonova M.G. et al. Impact of weather and climate on seed protein and oil content of soybean in the North Caucasus. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(6):708-715. [in Russian] (Новикова Л.Ю., Сеферова И.В., Некрасов А.Ю., Перчук И.Н., Шеленга Т.В., Самсонова М.Г. и др. Влияние погодноклиматических условий на содержание белка и масла в семенах сои на Северном Кавказе. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(6):708-715). DOI: 10.18699/VJ18.414
- Orita A., Yahada A., Shoji T., Oki T., Ohta H. Proximate, anthocyanin and oligomeric proanthocyanidin compositions of cowpeas [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] cultivated in Southwest Japan. *Legume Research*. 2019;43(3):359-364. DOI: 10.18805/lr-478
- Panasiewicz K. Chemical composition of lupin (*Lupinus* spp.) as influenced by variety and tillage system. *Agriculture*. 2022;12(2):263. DOI: 10.3390/agriculture12020263
- Peace R.W., Keith M.O., Sarwar G., Botting H.G. Effects of storage on protein nutritional quality of grain legumes. *Journal of Food Science*. 1988;53(2):439-441. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1988.tb07725.x
- Perchuk I., Shelenga T., Gurkina M., Miroshnichenko E., Burlyaeva M. Composition of primary and secondary metabolite compounds in seeds and pods of asparagus bean (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) from China. *Molecules*. 2020;25(17):3778. DOI: 10.3390/molecules25173778
- Popov V.S., Nikiforov A.A., Safonova E.E., Shelenga T.V., Krylova E.A., Burlyaeva M.O. Nutritional value of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. accessions with different seed color. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(1):6-17. [in Russian] (Попов В.С., Никифоров А.А., Сафонова Э.Э., Шеленга Т.В., Крылова Е.А., Бурляева М.О. Питательная ценность образцов *Vigna unguiculata* (L.) Walp. с разным цветом семян. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(1):6-17). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-1-04
- Rostova N.S. Correlations: structure and variability. In: *Proceedings of the St. Petersburg Society of Naturalists. Ser. 1. Vol. 94*. St. Petersburg: St. Petersburg State University; 2002. p.1-308. [in Russian] (Ростова Н.С. Корреляции: структура и изменчивость. В кн.: *Труды Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей. Сер. 1. Т. 94*. Санкт-Петербург: СПбГУ; 2002. С.1-308).
- RP5.ru. Weather in 243 countries of the world (RP5.ru. Pogoda v 243 stranakh mira): [website]. [in Russian] (RP5.ru. Погода в 243 странах мира: [сайт]). URL: <https://rp5.ru> [дата обращения: 11.03.2026].
- Shelenga T.V., Nikiforov A.A., Burlyaeva M.O., Perchuk I.N., Popov V.S. Rapid assessment of nutritional value indicators in *Vigna unguiculata* (L.) Walp. seed accessions from the VIR collection using NIR spectroscopy. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025a;186(2):68-78. [in Russian] (Шеленга Т.В., Никифоров А.А., Бурляева М.О., Перчук И.Н., Попов В.С. Экспресс-оценка показателей питательной ценности семян *Vigna unguiculata* (L.) Walp. из коллекции ВИР с помощью БИК-спектроскопии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025a;186(2):68-78). DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-68-78
- Shelenga T.V., Salikova A.V., Popov V.S., Egorova G.P., Malyshchev L.L., Vishnyakova M.A. Interrelations between the main seed quality characteristics of narrowleaf lupine from the VIR collection. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2025b;29(1):35-43. [in Russian] (Шеленга Т.В., Саликова А.В., Попов В.С., Егорова Г.П., Малышев Л.Л., Вишнякова М.А. Взаимосвязи основных признаков качества семян люпина узколистного из коллекции ВИР. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025b;29(1):35-43). DOI: 10.18699/vjgb-25-05
- Stoilova T., Simova-Stoilova L. Bulgarian cowpea landraces – agrobiological and morphological characteristics and seed biochemical composition. *Agriculture*. 2024;14(12):2339. DOI: 10.3390/agriculture14122339
- Taberner-Pibernat P., Ribas-Agustí A., Quinteros G., Sabeña G., López-Gómez M., Domínguez-Valencia R. et al. Compositional and nutritional value of lupin cultivars: Identifying high-protein seeds for enhanced protein isolate production and phytochemical valorisation. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2025;20:102010. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.102010
- Tukey J.W. The problem of multiple comparisons. Princeton, NJ: Princeton University; 1953.
- Valente I.M., Sousa C., Almeida M., Miranda C., Pinheiro V., Garcia-Santos S. et al. Insights from the yield, protein production, and detailed alkaloid composition of white (*Lupinus albus*), narrow-leafed (*Lupinus angustifolius*), and yellow (*Lupinus luteus*) lupin cultivars in the Mediterranean region. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1231777. DOI: 10.3389/fpls.2023.1231777
- Vishniyakova M.A., Seferova I.V., Buravtseva T.V., Burlyaeva M.O., Semenova E.V., Filipenko G.I., Aleksandrova T.G., Egorova G.P., Yankov I.I., Bulyntsev S.V., Gerasimova T.V., Drugova E.V. VIR global collection of grain legume crop genetic resources: replenishment, conservation and studying. Guidelines. St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Семенова Е.В., Филипенко Г.И., Александрова Т.Г., Егорова Г.П., Яньков И.И., Булынтцев С.В., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение. Методические указания. Санкт-Петербург: ВИР; 2018).
- Weather and Climate. Reference and Information Portal (Pogoda i klimat. Spravochno-informatsionny portal): [website]. [in Russian] (Погода и климат. Справочно-информационный портал: [сайт]). URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> [дата обращения: 11.03.2026].
- World-weather.ru. World weather archive (World-weather.ru. Arkhiv pogody v mire): [website]. [in Russian] (World-weather.ru. Архив погоды в мире: [сайт]). URL: <https://world-weather.ru/archive> [дата обращения: 11.03.2026].

Информация об авторах

Рената Тагировна Исламова, аспирант, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, renata.tag.isl@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7151-1173>

Марина Олеговна Бурляева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, m.burlyaeva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3708-2594>

Екатерина Александровна Крылова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.krylova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4917-6862>

Виталий Сергеевич Попов, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, v.popov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3274-7662>

Татьяна Викторовна Герасимова, кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанский генетический банк семян – филиал ВИР, 352183 Россия, Краснодарский край, Гулькевичский район, п. Ботаника, ул. Парковая, 2, nkos.vir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9534>

Татьяна Васильевна Шеленга, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, tatianashelenga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3992-5353>

Information about the authors

Renata T. Islamova, Postgraduate Student, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, renata.tag.isl@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-7151-1173>

Marina O. Burlyayeva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, m.burlyaeva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3708-2594>

Ekaterina A. Krylova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, e.krylova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4917-6862>

Vitaliy S. Popov, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, v.popov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3274-7662>

Tatiana V. Gerasimova, Cand. Sci. (Agriculture), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Genetic Seed Bank – branch of VIR, 2 Parkovaya St., Botanika Settlement, Gulkevichi District, Krasnodar Territory 352183, Russia, nkos.vir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0750-9534>

Tatiana V. Shelenga, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatianashelenga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3992-5353>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.07.2026; одобрена после рецензирования 17.08.2026; принята к публикации 26.08.2026.

The article was submitted on 18.07.2026; approved after reviewing on 17.08.2026; accepted for publication on 26.08.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 633.15:631.523:581.192:577.19

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-017



Исследование качественного и количественного состава антоцианов в линиях-гаплоиндукторах кукурузы с целью повышения точности ДН-технологий

А. В. Карлов, А. В. Ульянов, А. Е. Соловьева, Э. Б. Хатефов, А. Б. Курина

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Андрей Владиславович Карлов, dra29399@gmail.com

Актуальность. Линии-гаплоиндукторы кукурузы используются в ускоренной селекции Doubled Haploid Technology (ДН-технологии) для получения гомозиготных линий. Ключевым маркером для идентификации гаплоидных зерновок служит антоциановая окраска, контролируемая генами *R1-nj* и *C1*, фенотип Navajo. Однако вариабельность и состав антоцианов могут снижать точность визуального отбора. Статья посвящена определению качественного и количественного содержания антоцианов в линиях-гаплоиндукторах кукурузы.

Материалы и методы. Проведен спектрофотометрический скрининг 125 линий-гаплоиндукторов кукурузы по суммарному содержанию антоцианов. Для репрезентативной выборки из 35 линий методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) установлен индивидуальный состав антоцианов.

Результаты. Суммарное содержание антоцианов в каждой изученной линии варьировало от 14 до 203,6 мг/100 г. Во всех изученных линиях выявлено 16 соединений антоцианов, 10 из которых были идентифицированы. Впервые для линий-гаплоиндукторов показано присутствие двух изомерных форм антоцианового маркера cyanidin-3-(6-malonyl) glucoside (Cy-3-(6-mal)Glu). Кластерный анализ разделил линии на две группы: с преобладанием неацилированных и ацилированных форм. Выделены уникальные генотипы – линия ГИ-1 (7343) 7026 с максимальным суммарным содержанием антоцианов (203,6 мг/100 г), ГИ-8097-2 с самым высоким содержанием антоциана cyanidin-3-glucoside (Cy-3-Glu) и ГИ-97Y165-4 (8495) 7338 черн. как источник альтернативного антоцианового маркера peonidin-3-glucoside (Peo-3-Glu).

Заключение. Одинаковый фенотип Navajo проявляется разными антоциановыми профилями. Линии с ацилированными формами предпочтительны для ДН-технологий благодаря повышенной стабильности пигментов. Выделенные генотипы могут быть рекомендованы в качестве доноров при создании новых линий-гаплоиндукторов с улучшенными маркерными свойствами.

Ключевые слова: кукуруза, антоцианы, линии-гаплоиндукторы, изменчивость, гаплоидная селекция

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий согласно тематическому плану ВИР по проектам № FGEM-2025-0007 «Клеточные технологии для расширения селекционного потенциала культур овощного направления использования» и № FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Для цитирования: Карлов А.В., Ульянов А.В., Соловьева А.Е., Хатефов Э.Б., Курина А.Б. Исследование качественного и количественного состава антоцианов в линиях-гаплоиндукторах кукурузы с целью повышения точности ДН-технологий. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):43-59. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-017

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o17

Investigating the qualitative and quantitative composition of anthocyanins in maize haploid inducer lines to improve the accuracy of DH technologies

Andrey V. Karlov, Aleksey V. Ulianov, Alla E. Solovyeva, Eduard B. Khatefov, Anastasia B. Kurina

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia***Corresponding author:** Andrey V. Karlov, dra29399@gmail.com

Background. Haploid inducer lines of maize are used for accelerated selection in the doubled haploid (DH) technology to obtain homozygous lines. The anthocyanin coloration controlled by the *R1-nj* and *C1* genes and the Navajo phenotype serve as key markers for identifying haploid grains. However, the variability and composition of anthocyanins may reduce the accuracy of visual selection. The objective was to determine the qualitative and quantitative composition of anthocyanins in maize haploid inducer lines.

Materials and methods. Spectrophotometric screening of 125 maize haploid inducer lines for the total anthocyanin content was performed. Individual anthocyanin compositions were determined for a representative set of 35 lines using high-performance liquid chromatography (HPLC).

Results. The total anthocyanin content in each line ranged from 14 to 203.6 mg/100 g. All the lines contained 16 anthocyanin compounds, 10 of which were identified. For the first time, two isomeric forms of the anthocyanin marker cyanidin-3-(6-malonyl) glucoside (Cy-3-(6-mal)Glu) were shown for haploid inducer lines. Cluster analysis divided the lines into two groups, where either non-acylated or acylated forms predominated. Unique genotypes were identified among the lines: GI-1 (7343) 7026 with the maximum total content of anthocyanins (203.6 mg/100 g), GI-8097-2 with the highest content of cyanidin-3-glucoside (Cy-3-Glu), and GI-97Y165-4 (8495) 7338 chern. as a source of the alternative anthocyanin marker peonidin-3-glucoside (Peo-3-Glu).

Conclusion. The same Navajo phenotype was manifested in different anthocyanin profiles. Lines with acylated forms are preferable for DH technologies due to the increased stability of pigments. The selected genotypes can be recommended as donors for the development of new haploid inducer lines with improved marker properties.

Keywords: maize, anthocyanins, haploid inducers, variability, haploid breeding

Acknowledgments: the research was conducted within the framework of state tasks in accordance with the thematic plan of VIR, Projects No. FGEM-2025-0007 "Cell technologies to expand the breeding potential of crops for vegetable use" and No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and grain crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".

For citation: Karlov A.V., Ulianov A.V., Solovyeva A.E., Khatefov E.B., Kurina A.B. Investigating the qualitative and quantitative composition of anthocyanins in maize haploid inducer lines to improve the accuracy of DH technologies. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):43-59. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o17

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Кукуруза (*Zea mays* L.) – одна из важнейших сельскохозяйственных культур, широко возделываемых в мире, обладающая высокой питательной ценностью и промышленным значением (Lone et al., 2021). Кукуруза подразделяется на 8 подвидов (Shmaraev, Matveeva, 1985), однако способность к накоплению антоцианов варьирует в зависимости от подвида и генотипа, что особенно важно для их применения в качестве маркеров.

Антоцианы – это растительные пигменты, которые присутствуют как в генеративных, так и в вегетативных органах растений. Они являются водорастворимыми флавоноидными пигментами и окрашивают растения в цвета от красного до фиолетового (Cai et al., 2023; García-López et al., 2025). Антоцианы находятся в клетке постоянно и проявляются либо на определенной стадии развития растения, либо под воздействием стрессовых абиотических факторов (высокая температура, засуха и т. д.).

В настоящее время антоцианы активно изучаются и используются, прежде всего, в разных областях современной медицины, фармацевтической и пищевой промышленности, поскольку обладают широким спектром полезных для человека свойств: антиоксидантной активностью, способностью снижать риски развития сердечно-сосудистых заболеваний, оказывать противовоспалительное и противоопухолевое действие и др. (Khoo et al., 2017). Для селекционеров и генетиков они также представляют большой научный интерес, так как могут использоваться в качестве маркеров для гаплоидной селекции (DH) (Cai et al., 2023; García-López et al., 2025).

DH-технология (метод удвоенных гаплоидов) широко используется в научном мире на различных культурах, включая кукурузу. Она основана на идентификации гаплоидных зерновок у гибридов материнской линии с отцовской линией, обладающей гаплоиндуцирующей способностью. Маркерная система основана на работе двух регуляторных генов *R1-nj* и *C1* (Chaikam et al., 2019), которые совместно формируют фенотип Navajo, характеризующийся наличием локализованной антоциановой окраски в области зародыша и верхушки зерновки. Однако эффективность маркерной системы зависит от генотипов гаплоиндуктора и материнской формы. В частности, у некоторых форм кукурузы, особенно у кремнистой, распространены гены – ингибиторы антоциановой окраски (*C1-I*, *C2-idf*, *in1-D*), которые подавляют экспрессию регуляторных генов *R1-nj* и *C1* и затрудняют идентификацию гаплоидных зерен (Chaikam et al., 2019; Asadova et al., 2020). Дополнительную сложность создает наличие генотипов, способных к спонтанному накоплению антоцианов, что снижает контрастность маркерной окраски.

Генотипы кукурузы, которые имеют окраску зерна, как правило, накапливают антоцианы в перикарпии и алейроновом слое (Petroni et al., 2014; Cai et al., 2023). Качественный и количественный состав антоцианов может варьироваться в зависимости от генотипа и анализируемой части растения (Abdel-Aal et al., 2006). Основными мономерными антоцианами, идентифицированными в зерне кукурузы, являются: cyanidin-3-glucoside (Cy-3-Glu) (который часто оказывается преобладающим пигментом), peonidin-3-glucoside (Peo-3-Glu), pelargonidin 3-glucoside (Pg-3-Glu), а также их производные, ацилированные органическими кислотами (яблочной, янтарной или уксусной) (Cai et al., 2023).

Следует отметить, что в вегетативных органах растений концентрация антоцианов часто выше, чем в генеративных органах. В связи с этим их более рационально использовать, например, для создания натуральных красителей (Deineka et al., 2016).

Несмотря на трудности, связанные с самостоятельным накоплением многими сортами кукурузы высоких уровней антоцианов и наличием у большинства сортов генов – ингибиторов антоциановой окраски, селекционеры активно создают новые линии-гаплоиндукторы кукурузы, которые хорошо маркируют материнские линии разных подвидов кукурузы – зубовидной, кремнистой, сахарной и т. д. (Shmaraev, Matveeva, 1985; Ulyanov et al., 2022). DH-технология позволяет селекционерам получать чистые линии кукурузы быстрее, чем при инцухте кукурузы в полевых условиях *in vivo*. Поскольку антоциановая окраска является не только визуальным маркером при отборе гаплоидных зерен, но и показателем биохимического потенциала генотипа, изучение антоциановых профилей линий-гаплоиндукторов кукурузы является актуальным для современной селекции.

Цель работы – определение суммарного содержания антоцианов в линиях-гаплоиндукторах кукурузы как основы для повышения эффективности визуального скрининга при DH-технологиях, а также установление качественного состава антоцианов в репрезентативной выборке линий.

Материалы и методы

В качестве исходного селекционного материала использовали 350 генотипов кукурузы (*Zea mays* L.), полученных из потомства синтетической популяции F₄, сформированной при скрещивании линий – источников генов *R1-nj*, *B1*, *Pl1* (C-221, C-222, C-799, C-905, C-917, C-925) с линиями, характеризующимися различной частотой гаплоиндукции, Института сельского хозяйства – филиала Кабардино-Балкарского научного центра РАН (ИСХ КБНЦ РАН) (селекции Э. Б. Хатефова). В качестве стандартов для сравнения были отобраны линии различных селекционных центров: Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского (СГУ им. Чернышевского) и Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко (НЦЗ им. Лукьяненко).

Растения выращивали в 2024 г. в предгорной зоне Кабардино-Балкарской Республики (ИСХ КБНЦ РАН, г. Нальчик) на селекционном участке площадью 1225 м². Метеорологические условия вегетационного периода представлены в таблице 1.

Для биохимического анализа были отобраны 125 линий-гаплоиндукторов кукурузы (табл. 2).

Зерновки изученных линий имели преимущественно фиолетовую окраску различной интенсивности; также встречались зерновки с красной, белой и желтой окраской (рис. 1). Большинство исследуемых линий (118 из 125, что составляет 94,4% изученного материала) имели фенотип Navajo, контролируемый маркерными генами *R1-nj* и *C1*. Данный фенотип характеризуется наличием локализованной антоциановой окраски в области зародыша и верхушки зерновки. У 7 из 125 линий (5,6%) фенотип Navajo отсутствовал.

Первичный скрининг 125 линий-гаплоиндукторов кукурузы проводили спектрофотометрическим методом

Таблица 1. Метеорологические условия вегетационного периода 2024 г.**Table 1. Meteorological conditions in the 2024 growing season**

Месяц / Month	Средняя температура, °C / Mean temperature, °C	Осадки, мм / Precipitation, mm
Май	27	43,8
Июнь	34,4	15
Июль	33,7	2,7
Август	31,5	28,9
Сумма	126,6	90,4

Таблица 2. Характеристика 125 линий-гаплоиндукторов кукурузы**Table 2. Characterization of 125 haploid inducer lines of maize**

№ / No.	Название линии / Line name	Учреждение-оригинатор/Автор линии / Originator institution/Author of the line
1	ГИ-9244-2 (7335)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
2	ГИ-9171-1 (7343) 8796	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
3	ГИ-91Y119 (8461) 7324	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
4	ГИ-9200-3 (7315) 8795	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
5	ГИ-1 (7344) 7019	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
6	ГИ-9201-2 (7363)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
7	ГИ-9201-5 (7363)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
8	ГИ-9203 (7315)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
9	С-453-4	ВИР / коллекция**
10	ГИ-7334 (7341)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
11	ГИ-317 (7889) 7029	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
12	ГИ-9011-2 (7360)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
13	ГИ-9123-3 (7345)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
14	ГИ-9453-2	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
15	ГИ-9104-5 (7325) 10046	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
16	ГИ-8094-5	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
17	ГИ- 8097-2	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
18	ГИ-97Y172 (8519) 7362	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
19	С-453-9	ВИР / коллекция**
20	ГИ-9413 (7322)-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
21	ГИ-9153-3 (7323)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
22	ГИ (В Сар.) (8102-5) 7041	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
23	ГИ-9001-3 (7364)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
24	ГИ-1 (7345) 7023	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
25	ГИ-1 (7344) 7025	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
26	ГИ-7220 (7309)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*

Таблица 2. Продолжение

Table 2. Continued

№ / No.	Название линии / Line name	Учреждение-оригинатор/Автор линии / Originator institution/Author of the line
27	ГИ-9104-5 (7325) 9970	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
28	ГИ-9171-1 (7345)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
29	ГИ-9171-1 (7343) 8836	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
30	ГИ-7231 (7354)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
31	ГИ-9048-1 (7353) 10013	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
32	ГИ-9392-1 (7365)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
33	ГИ-33 (7922) 7028 10074	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
34	ГИ-9002-2 (7318)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
35	ГИ-9104-5 (7325)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
36	ГИ-1 (7344) 7018	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
37	ГИ-9200-3 (7315)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
38	ГИ-8096-7	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
39	ГИ-8096-11	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
40	ГИ-1 (7345) 7021	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
41	С-832 плен. ант. (7091)	ВИР / коллекция**
42	ГИ-97У180 (8553) 7340	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
43	ГИ-7228 (7366) 8881	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
44	ГИ-9123-3 (7345) Гроздь	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
45	ГИ-7227 (7350)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
46	ГИ-СН	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
47	ГИ-3098-5	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
48	ГИ-8096-9	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
49	ГИ (8102-6) 7040	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
50	ГИ-97У172-2 (8521) 7316 желт.	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
51	ГИ-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
52	ГИ с обратным маркером (7335)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
53	ГИ-97У180 (7075)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
54	С-799-3	ВИР / коллекция**
55	ГИ-97У199 (8461) 7324 желт.	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
56	ГИ-97У119 (8461) 7324	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
57	ГИ-9452-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
58	ГИ-8096-8	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
59	ГИ-9091-1 (7337)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
60	ГИ-9459-2	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
61	ГИ-9171-1 (7343) черн.	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*

Таблица 2. Продолжение

Table 2. Continued

№ / No.	Название линии / Line name	Учреждение-оригинатор/Автор линии / Originator institution/Author of the line
62	ГИ-8095-3	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
63	С-453-6	ВИР / коллекция**
64	ГИ-9476-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
65	ГИ-7225 (7336) 8874	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
66	ГИ-1 (7343) 7026	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
67	ЗМС-П1 Гуторова О.И.	СГУ им. Чернышевского / О. В. Гуторова***
68	ГИ-9171-1 (7343)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
69	ГИ-обрат. Маркер 7048	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
70	ГИ-9460-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
71	ГИ-8096-4	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
72	ГИ-8095-5 без маркера	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
73	ГИ-97Y158 (8471) 7367	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
74	ГИ-9104-5 (7311)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
75	ГИ-8096-12	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
76	Зародыш. Метчик	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
77	ГИ-3074-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
78	ГИ-7354 (7231)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
79	ГИ Матвеевой №5 (7071)	ВИР / Г. В. Матвеева**
80	ГИ-97Y165-4 (8495) 7338 черн.	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
81	ГИ-9456-1 часть 1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
82	ГИ-8096-6	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
83	ГИ-9231-2 (7044)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
84	ГИ-8096-2	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
85	ГИ-1 (7343) 9171-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
86	ЗМС-П1 (8025) 7015	СГУ им. Чернышевского / О. В. Гуторова***
87	ГИ-97Y180	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
88	ГИ-9171-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
89	ГИ-1 (7245)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
90	ГИ-9392-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
91	ЗМС-П1-(8025)	СГУ им. Чернышевского / О. В. Гуторова***
92	ГИ-1 (9086-2)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
93	ГИ-1 (7344)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
94	ГИ-33 (7922)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
95	ГИ-1 (7345)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
96	ГИ-9398-2	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

№ / No.	Название линии / Line name	Учреждение-оригинатор/Автор линии / Originator institution/Author of the line
97	ГИ обратный маркер	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
98	ГИ-8094-6	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
99	R-nj (N637793)	ВИР / коллекция**
100	C-799-4 (8030)	ВИР / коллекция**
101	ГИ-7С	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
102	ГИ-26М	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
103	ГИ-7358 (9293-3)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
104	ГИ-3026-5	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
105	ГИ-97Y17-2 (8521) 7316	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
106	ГИ-в Саратов (8102-5) 7041	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
107	ГИ-9048-1 (7353)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
108	ГИ-87Y180 (8553) 7340	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
109	ГИ-7228 (7366) 8847	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
110	ГИ-7228 (7366)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
111	ГИ-9475-3	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
112	ГИ-7225 (7336)	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
113	ГИ-97Y172-2 (8521) 7316	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
114	ГИ-33 (7922) 7028	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
115	ЗМК1Y	НЦЗ им. Лукьяненко / О. А. Шацкая****
116	ЗМС-8 (8026) № 189	СГУ им. Чернышевского / О. В. Гуторова***
117	C-799-3 (8029) № 199	ВИР / коллекция**
118	ГИ-9244-2	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
119	C-799-1 213	ВИР / коллекция**
120	C-799-3 норм. зерна (8029) № 107	ВИР / коллекция**
121	ГИ Матвеевой Г.В. № 2	ВИР / Г. В. Матвеева**
122	ГИ Матвеевой Г.В. (8018)	ВИР / Г. В. Матвеева**
123	ЗМС-8 (8026) 173	СГУ им. Чернышевского / О. В. Гуторова***
124	A-1	ИСХ КБНЦ РАН / Э. Б. Хатефов*
125	ЗМК-2	НЦЗ им. Лукьяненко / О. А. Шацкая****

Примечание: * – ИСХ КБНЦ РАН (Институт сельского хозяйства – филиал Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Нальчик, Россия), линии селекции Э. Б. Хатефова; ** – ВИР (Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия), Г. В. Матвеева и коллекция; *** – СГУ им. Чернышевского (Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия), линии селекции О. В. Гуторовой; **** – НЦЗ им. Лукьяненко (Национальный центр зерна им. П.П. Лукьяненко, Краснодар, Россия), линии селекции О. А. Шацкой

Note: * – ISX KBNZ RAN is the Institute of Agriculture, branch of the Kabardin-Balkar Scientific Center of the RAS (Nalchik, Russia), breeder: E. B. Khatefov; ** – VIR is the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR, St. Petersburg, Russia), lines from the VIR collection or bred by G. V. Matveeva; *** – SGU im. Chernyshevskogo is Saratov State University (Saratov, Russia), breeder: O. V. Guttorova; **** – NCZ im. Lukyanenko is the P.P. Lukyanenko National Grain Center (Krasnodar, Russia), breeder: O. A. Shatskaya

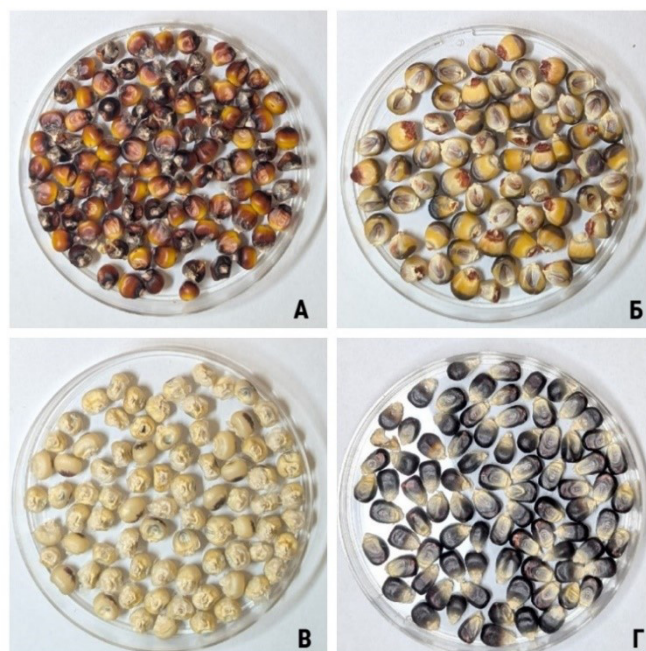


Рис. 1. Внешний вид зерновок линий-гаплоиндукторов кукурузы с различной интенсивностью антоциановой окраски (фиолетовые, красные, белые, желтые образцы): А – ГИ-8097-2 (№ 17); Б – ГИ-97Y165-4 (8495) 7338 черн. (№ 80); В – ЗМК1Y (№ 115); Г – ГИ-9244-2 (№ 118)

Fig. 1. Kernels of maize haploid inducer lines with different intensities of anthocyanin coloration (purple, red, white, and yellow samples). А – GI-8097-2 (No. 17); Б – GI-97Y165-4 (8495) 7338 chern. (No. 80); В – ZMK1Y (No. 115); Г – GI-9244-2 (No. 118)

для определения суммарного содержания антоцианов в каждом образце.

На основании полученных данных была сформирована репрезентативная выборка из 35 линий, охватывающая весь диапазон варьирования признака (от минимальных до максимальных значений), для последующего детального анализа методом ВЭЖХ. Выборка включает в себя линии:

ГИ-91Y119 (8461) 7324 (№ 3), ГИ-1 (7344) 7019 (№ 5), ГИ-9201-2 (7363) (№ 6), ГИ-317 (7889) 7029 (№ 11), ГИ-8097-2 (№ 17), ГИ-97Y172 (8519) 7362 (№ 18), ГИ-9153-3 (7323) (№ 21), ГИ (В Сар.) (8102-5) 7041 (№ 22), ГИ-9001-3 (7364) (№ 23), ГИ-7231 (7354) (№ 30), ГИ-9002-2 (7318) (№ 34), ГИ-9104-5 (7325) (№ 35), С-832 плен. ант. (7091) (№ 41), ГИ-9123-3 (7345) Гроздь (№ 44), ГИ-7227 (7350) (№ 45), ГИ-СН (№ 46), ГИ-97Y180 (7075) (№ 53), ГИ-97Y199 (8461) 7324 желт. (№ 55), ГИ-9171-1 (7343) черн. (№ 61), С-453-6 (№ 63), ГИ-1 (7343) 7026 (№ 66), ГИ-97Y165-4 (8495) 7338 черн. (№ 80), ЗМС-П1- (8025) (№ 91), ГИ-1 (7344) (№ 93), ГИ-33 (7922) (№ 94), ГИ обратный маркер (№ 97), ГИ-8094-6 (№ 98), ГИ-87Y180 (8553) 7340 (№ 108), ЗМК1Y (№ 115), ГИ-9244-2 (№ 118), С-799-1 213 (№ 119), ГИ Матвеевой Г.В. № 2 (№ 121), ЗМС-8 (8026) 173 (№ 123), А-1 (№ 124), ЗМК-2 (№ 125).

Для определения суммарного содержания антоцианов использовали навеску измельченного зерна массой 1,0 г. Зерно измельчали в два этапа: сначала предварительное грубое дробление на мельнице Laboratory Mill 3600, затем окончательное измельчение до состояния муки на мельнице LAB-mill-1 (QC-114). Экстракцию проводили раствором 95-процентного этанола с добавлением 1-процентной соляной кислоты. Объем экстрагирующего раствора составлял 50 мл. Экстракцию осуществляли при температуре 70–80°C в течение 30 мин с использованием обратного холодильника Фридрихса. После

охлаждения до комнатной температуры объем доводили до исходного значения экстрагирующим раствором. Полученный экстракт центрифугировали при 4000 об/мин в течение 10 мин.

Для спектрофотометрического анализа аликвоту экстракта объемом 5 мл переносили в две мерные колбы вместимостью 20 мл. В первой колбе (контроль) объем доводили 95-процентным этанолом. Во вторую колбу (испытуемый раствор) добавляли 95-процентный этанол, содержащий 0,5% аммиака.

Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре Unico 2800 (США) при длине волны 613 нм относительно контрольного раствора. Содержание антоцианов вычисляли в пересчете на абсолютно сухое сырье с использованием стандартного образца Су-3-Glu согласно методике В.А. Куркина и др. (Kurkin et al., 2015).

Все экстракции и измерения проводили в трехкратной аналитической повторности. В работе результаты представляли как среднее арифметическое и стандартное отклонение.

Разделение антоцианов проводили методом обращенно-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Для ВЭЖХ навеску измельченного зерна кукурузы массой 1,0 г помещали в стеклянный флакон, добавляли 10 мл 10-процентной муравьиной кислоты и экстрагировали при комнатной температуре в темноте в течение 16–18 ч. После экстракции образцы гомогенизировали с помощью ступки, фильтровали через бумажный фильтр и центрифугировали при 160 г в течение 15 мин. Для определения индивидуального состава антоцианового комплекса экстракт очищали методом твердофазной экстракции на концентрирующих патронах «Диапак С18» (ЗАО «БиоХимМак СТ», Россия). Патроны активировали пропусканием 5 мл ацетона, кондиционировали пропусканием 15–20 мл 0,1-молярного вод-

ного раствора HCl. Затем на патроне концентрировали экстракт (10–20 мл). Патрон промывали 2 мл 0,1-молярного водного раствора HCl. Экстракцию антоцианов с патрона проводили пропусканием раствора, содержащего по 20 процентов объема муравьиной кислоты и ацетонитрила в воде. Все операции проводили со скоростью 1–2 капли в секунду (Deineka et al., 2016).

Результаты

Спектрофотометрический анализ 125 линий-гаплоиндукторов кукурузы выявил широкий диапазон варьирования суммарного содержания антоцианов – от 14 до 203,6 мг/100 г сухого сырья (в пересчете на Су-3-Glu). Распределение линий по содержанию антоцианов представлено на рисунке 2.

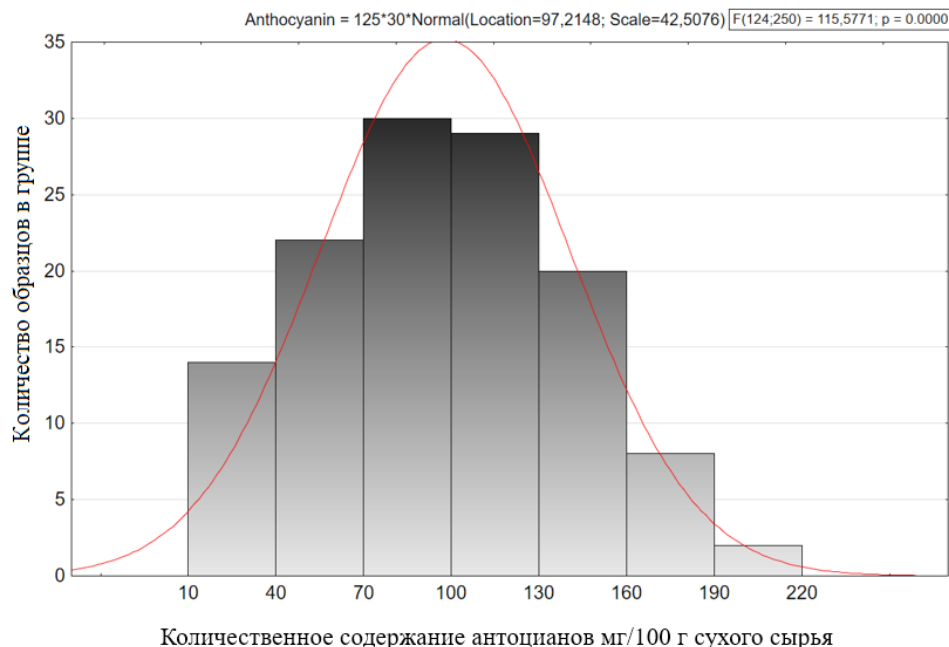


Рис. 2. Гистограмма распределения 125 образцов линий-гаплоиндукторов кукурузы по общему содержанию антоцианов в зерновках

Fig. 2. Histogram showing the distribution of 125 haploid inducer lines of maize according to the total content of anthocyanins in grains

Условия ВЭЖХ-определения

В работе использовали хроматограф Agilent 1260 Infinity II LC (США), включающий 4-канальный насос, вакуумный дегазатор, автосамплер, термостат колонок, спектрофотометрический детектор с записью хроматограмм при 520 нм; колонку Zorbax SB-C18 (3.0 × 100 мм, 1,8 мкм). Температура термостата колонки – 25°C; подвижная фаза: элюент А – 10-процентный объемный раствор муравьиной кислоты, элюент Б – 10-процентный объемный раствор муравьиной кислоты, содержащий 50 процентов объема ацетонитрила (Karbovskaaya, Boris, 2008).

Элюирование проводили в градиентном режиме по следующей программе: 0–26 мин – 12% Б; 26–35 мин – 30% Б; 35–43 мин – 100% Б; 43–50 мин – возврат к 12% Б и уравнивание колонки.

Идентификацию антоцианов проводили по временам удерживания стандартных образцов и с использованием литературных данных (Abdel-Aal et al., 2006; Jing, Giusti, 2007; Paulsmeyer et al., 2017), а также методом добавок. Калибровочные кривые строили по известным концентрациям Су-3-Glu, Пео-3-Glu и Рг-3-Glu (PhytoLab, GmbH). Содержание остальных антоцианов выражали в пересчете на Су-3-Glu.

Статистическую обработку и анализ данных проводили с помощью программного обеспечения STATISTICA 12.0 (StatSoft Inc., США). Средние значения данных сравнивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Кластерный анализ проводили методом UPGMA в программе PAST.

Среднее содержание антоцианов для всех линий составило 97,2 мг/100 г. Линии селекции ИСХ КБНЦ РАН (оригинатор: Э. Б. Хатефов) составляют большинство во всех группах, выделенных по уровню содержания антоцианов (см. рис. 2). Линии других селекционных центров (ВИР, СГУ им. Чернышевского и НЦЗ им. Лукьяненко) встречаются преимущественно в определенных интервалах варьирования.

Большинство изученных линий (59 из 125) накапливают антоцианы в диапазоне от 70 до 130 мг/100 г. Эта группа наряду с доминирующими линиями ИСХ КБНЦ РАН включает уникальные линии из коллекции ВИР – С-453-4 (№ 9), С-453-9 (№ 19), С-832 плен. ант. (7091) (№ 41), С-453-6 (№ 63), а также линии СГУ им. Чернышевского: ЗМС-П1 Гуторова О.И. (№ 67), ЗМС-П1 (8025) 7015 (№ 86), ЗМС-8 (8026) 173 (№ 123) и НЦЗ – ЗМК-2 (№ 125). Примечательно, что линии ЗМС и ЗМК происходят от общей предковой формы, которая в дальнейшем дала начало уникальным линиям-гаплоиндукторам в разных институтах.

Вторыми по численности являются группы с содержанием антоцианов от 40 до 70 мг/100 г (22 линии) и 130–160 мг/100 г (20 линий). Группа от 40 до 70 мг/100 г содержит, помимо линий ИСХ КБНЦ РАН, три линии ВИР, родительская форма которых – С-799: С-799-4 (8030) (№ 100), С-799-1 213 (№ 119), С-799-3 норм. зерна (8029) №107 (№ 120), одну линию – ГИ Матвеевой Г.В. (8018) (№ 122) – селекции ВИР, две линии СГУ им. Чернышевского – ЗМС-П1-(8025) (№ 91), ЗМС-8 (8026) №189

(№ 116) и одну линию из НЦЗ им. Лукьяненко – ЗМК1У (№ 115). Группа от 130 до 160 мг/100 г, напротив, состоит исключительно из линий селекции ИСХ КБНЦ РАН, среди которых четыре образца являются предковыми формами гаплоиндуктора ГИ-1: ГИ-1 (7345) 7021 (№ 40), ГИ-1 (№ 51), ГИ-1 (7343) 9171-1 (№ 85), ГИ-1 (9086-2) (№ 92), а остальные линии являются уникальными генотипами.

Самыми малочисленными были группы с очень низкими и высокими значениями. Образцы с низким содержанием антоцианов от 14 до 40 мг/100 г встречались реже всего и представлены 14 линиями. В эту группу входят четыре линии коллекции ВИР, родительскими формами которых являются С-799: С-799-3 (№ 54), С-799-3 (8029) №199 (№ 117), и ГИ Матвеева Г.В: ГИ Матвеевой № 5 (7071) (№ 79), ГИ Матвеевой № 2 (№ 121), а также девять линий ИСХ КБНЦ РАН. Самые высокие значения (больше 160 мг/100 г) отмечены у 10 образцов, состоящих исключительно из линий селекции ИСХ КБНЦ РАН. Четыре из них являются предковыми формами ГИ-1: ГИ-1 (7344) 7019 (№ 5), ГИ-1 (7344) 7025 (№ 25), ГИ-1 (7343) 7026 (№ 66), ГИ-1 (7344) (№ 93), две линии – предковыми формами ГИ-33: ГИ-33 (7922) (№ 94) и ГИ-33 (7922) 7028 (№ 114); остальные представляют собой уникальные линии.

Как было сказано выше, большинство линий – 118 из 125 (94,4% изученного материала) – имели визуально детектируемый Navajo-фенотип, который контролируется маркерными генами *R1-nj* и *C1*. Линии с фенотипом Navajo относились ко всем полученным группам (см. рис. 2). У 7 линий (5,6%) характерная антоциановая окраска в области зародыша и верхушки зерновки отсутствовала. Эти линии характеризовались низким содержанием антоцианов: от 19 до 70 мг/100 г (см. рис. 2).

Наибольший практический интерес представляют генотипы с высоким содержанием антоцианов (более 170 мг/100 г): ГИ-1 (7343) 7026 (№ 66) – 203,6 мг/100 г, ГИ-33 (7922) (№ 94) – 193,8 мг/100 г, ГИ-9244-2 (№ 118) – 185,3 мг/100 г, ГИ-1 (7344) (№ 93) – 171,2 мг/100 г, ГИ-9104-5 (7325) (№ 35) – 172,6 мг/100 г, ГИ-1(7344) 7025 (№ 25) – 173,6 мг/100 г и ГИ-1 (7344) 7019 (№ 5) – 178,4 мг/100 г.

Таким образом, большой разброс значений и наличие образцов с высокими показателями подтверждают высокий селекционный потенциал изученной коллекции.

Полученные данные легли в основу отбора репрезентативной выборки, которую в дальнейшем мы использовали для более детального анализа методом ВЭЖХ. Нами получены хроматографические профили антоцианов 35 линий-гаплоиндукторов кукурузы. Все эти линии имели видимый фенотип Navajo. В составе антоцианового комплекса обнаружено 16 соединений, 10 из которых удалось идентифицировать, опираясь на литературные данные (Abdel-Aal et al., 2006; Jing, Giusti, 2007; Paulsmeyer et al., 2017), сравнительный анализ со стандартом Су-3-Glu и метод добавок (табл. 3). Неидентифицированные антоцианы были обозначены нами как 1, 2, 3, 4, 8, 14.

Следует отметить, что соединение Су-3-(6-mal)Glu в нашем исследовании присутствует в двух изомерных формах. В изученных нами литературных данных упоминается определение только одного изомера – Су-3-(6-mal)Glu, тогда как всего представлено 4 изомера. Из них в значительных количествах накапливаются только два. При этом параметры спектров этих соединений близки, но не эквивалентны (Tretyakov et al., 2012).

Для оценки степени сходства исследуемых линий на основе их антоцианового профиля применили метод

Таблица 3. Идентифицированные и неидентифицированные антоцианы у изученных линий-гаплоиндукторов кукурузы

Table 3. Identified and unidentified anthocyanins in the studied maize haploid inducer lines

Название соединения / Name of the compound	Статус / Status
1	не идентифицирован
2	не идентифицирован
3	не идентифицирован
4	не идентифицирован
cyanidin-3-glucoside (Cy-3-Glu)	идентифицирован
pelargonidin-3-glucoside (Pg-3-Glu)	идентифицирован
cyanidin-3-(6-malonyl)glucoside (Cy-3-(6-mal)Glu), (изомер 1)	идентифицирован
8	не идентифицирован
peonidin-3-glucoside (Peo-3-Glu)	идентифицирован
cyanidin-3-(6-malonyl)glucoside (Cy-3-(6-mal)Glu), (изомер 2)	идентифицирован
pelargonidin 3-(6-malonyl)-glucoside (Pg-3-(6-mal)Glu)	идентифицирован
cyanidin-3-dimalonil-glucoside (Cy-3-dimal-Glu)	идентифицирован
peonidin-3-(6-malonyl)-glucoside (Peo-3-(6-mal)Glu)	идентифицирован
14	не идентифицирован
pelargonidin 3- dimalonil-glucoside (Pg-3-dimal-Glu)	идентифицирован
peonidin-3- dimalonil-glucoside (Peo-3-dimal-Glu).	идентифицирован

кластерного анализа. Построенная в результате дендрограмма (рис. 3) разделила анализируемые линии на два основных кластера, характеризующихся значительными различиями в качественном составе и количественном соотношении антоцианов. Оба полученных кластера также подверглись дальнейшей кластеризации с разделением каждого из них на три субкластера.

В целом кластер 1 включил в себя линии, содержащие больше неацилированных форм мономерных антоцианов, а в кластере 2 преобладали линии, содержащие их ацилированные производные (малонилированные и дималонилированные).

Образцы, вошедшие в кластер 1, отличаются относительно низким и сбалансированным содержанием антоцианов – от $40,65 \pm 12,70$ до $89,32 \pm 15,39$ мг/100 г (табл. 4). Данные линии характеризуются невысокой внутригрупповой вариабельностью и преобладанием двух антоцианов – Cy-3-Glu и Cy-3(6-mal)Glu (изомер 2). Внутри кластера выделились три субкластера (1А, 1Б, 1В) и линия ГИ-97У165-4 (8495) 7338 черн. (№ 80), обладающая уникальным профилем (см. рис. 3).

Обособленный субкластер 1А формируют образцы ГИ-8097-2 (№ 17); ГИ (В Сар.) (8102-5) 7041 (№ 22) и С-453-6 (№ 63) с суммарным содержанием антоцианов $89,32 \pm 15,39$ мг/100 г (см. рис. 3). Для данного субкластера характерны максимальные относительно всех выделенных групп концентрации антоцианов Cy-3-Glu –

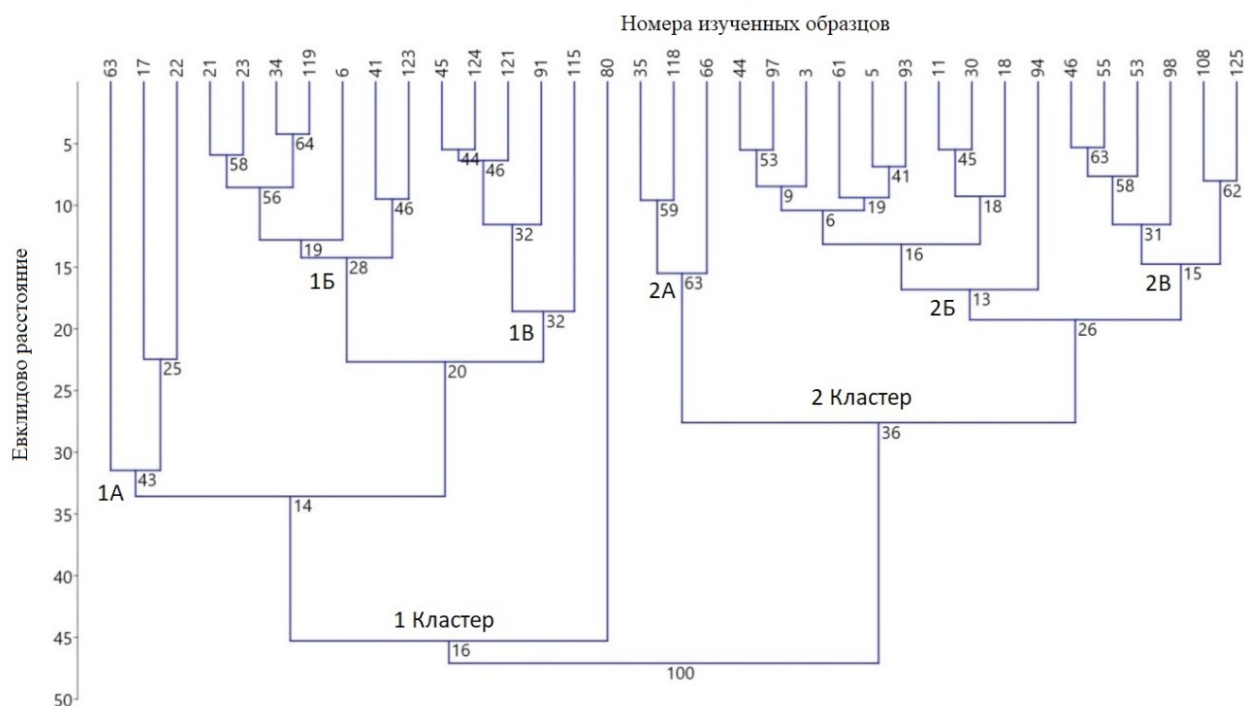
$36,14 \pm 5,72$ мг/100 г и Peo-3-Glu – $8,95 \pm 6,77$ мг/100 г (см. табл. 4).

Субкластер 1Б характеризуется общим низким содержанием антоцианов ($78,16 \pm 14,24$ мг/100 г), в котором преобладают антоцианы Cy-3-Glu – $13,79$ мг/100 г; Cy-3(6-mal)Glu (изомер 2) – $29,47$ мг/100 г и Pg-3-(6-mal)Glu – $10,64$ мг/100 г (см. табл. 4).

Отличительная особенность субкластера 1В состоит в том, что большинство входящих в него образцов имеют минимальные значения основных антоцианов, а суммарное содержание антоцианов является минимальным во всей выборке ($40,65 \pm 12,70$ мг/100 г). В субкластере преобладают антоцианы Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2) – $12,06 \pm 4,02$ мг/100 г и Cy-3-Glu с минимальным средним содержанием среди всех субкластеров – $6,90$ мг/100 г (см. табл. 4).

Кластер 2 является более многочисленным и гетерогенным. Он объединяет линии с более высоким суммарным содержанием антоцианов и значительной вариабельностью их качественного состава. Для большинства линий данного кластера характерно доминирование антоцианов Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2), Pg-3-(6-mal)Glu, Cy-3-dimal-Glu и Peo-3-(6-mal)Glu и Cy-3-Glu.

Линии из субкластера 2А занимают обособленное положение в пределах кластера 2. Все образцы характеризуются максимальным суммарным содержанием антоцианов среди всех образцов ($187,18 \pm 15,60$ мг/100 г).



Дендрограмма выполнена методом UPGMA. Цифры на дендрограмме указывают величину бутстрэпа (в процентах). Значения бутстрэпа отражают статистическую значимость ветвления: чем выше процент, тем более значимо объединение линий в данный кластер/субкластер. По оси X (абсцисс) даны номера линий в соответствии с таблицей 2. По оси Y (ординат) указано евклидово расстояние, рассчитанное на основе количественного и качественного содержания каждого антоцианового соединения.

Чем меньше это расстояние, тем более сходен антоциановый профиль у сравниваемых линий /

The dendrogram was generated using the UPGMA method. The numbers on the dendrogram indicate bootstrap values (as percentages). Bootstrap values reflect the statistical significance of branching: the higher the percentage, the more significant the grouping of lines within a given cluster/subcluster. The X-axis shows line numbers according to Table 2.

The Y-axis shows the Euclidean distance based on the quantitative and qualitative content of each anthocyanin compound.

The smaller this distance, the more similar the anthocyanin profiles of the compared lines

Рис. 3. Дендрограмма образцов линий-гаплоиндукторов кукурузы по компонентному профилю антоцианов

Fig. 3. Dendrogram of maize haploid inducer line samples based on the anthocyanin component profile

Таблица 4. Среднее содержание антоцианов в субкластерах линий-гаплоиндукторов кукурузы, мг/100 г**Table 4. Average anthocyanin content in subclusters of maize haploid inducer lines, mg/100 g**

Антоцианы / Anthocyanins	Кластер / Cluster					
	1А	1Б	1В	2А	2Б	2В
1	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0,05 ± 0,14	0 ± 0
2	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0,05 ± 0,11	0 ± 0
3	0,31 ± 0,54	0,17 ± 0,46	0 ± 0	0 ± 0	0,23 ± 0,64	0,06 ± 0,15
4	0 ± 0	0,06 ± 0,15	0 ± 0	0 ± 0	0,16 ± 0,35	0 ± 0
Cy-3-Glu	36,14 ± 5,72	13,79 ± 3,71	6,90 ± 1,45	21,93 ± 4,64	16,26 ± 2,15	19,29 ± 3,02
Pg-3-Glu	0,97 ± 0,14	2,20 ± 0,96	0,52 ± 0,72	5,30 ± 1,35	4,40 ± 1,40	3,14 ± 0,65
Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 1)	2,53 ± 1,11	1,45 ± 0,48	0,66 ± 0,77	3,80 ± 0,73	2,91 ± 0,45	2,52 ± 0,35
8	0,60 ± 1,03	2,20 ± 0,87	3,96 ± 7,14	6,60 ± 0,66	5,83 ± 0,89	4,42 ± 1,31
Peo-3-Glu	8,95 ± 6,77	3,36 ± 2,53	1,76 ± 2,07	3,19 ± 1,64	3,10 ± 0,81	3,72 ± 1,90
Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2)	26,88 ± 17,58	29,47 ± 4,78	12,06 ± 4,02	78,60 ± 2,94	59,09 ± 4,14	50,23 ± 6,79
Pg-3-(6-mal)Glu	5,24 ± 1,95	10,64 ± 2,29	4,40 ± 1,59	26,34 ± 2,21	24,49 ± 4,18	15,45 ± 1,81
Cy-3-dimal-Glu	1,80 ± 1,71	6,22 ± 1,91	2,97 ± 1,16	24,87 ± 4,42	21,90 ± 4,01	14,44 ± 3,20
Peo-3-(6-mal)Glu	3,96 ± 3,99	6,07 ± 4,28	5,40 ± 3,64	11,81 ± 5,33	12,01 ± 2,13	8,71 ± 2,37
14	0 ± 0	0,20 ± 0,35	0,24 ± 0,55	1,26 ± 2,19	1,19 ± 1,81	0,42 ± 1,02
Pg-3-dimal-Glu	0 ± 0	1,36 ± 1,43	0,92 ± 1,35	1,80 ± 1,56	4,10 ± 3,48	0,39 ± 0,66
Peo-3-dimal-Glu	1,95 ± 3,38	0,98 ± 0,91	0,84 ± 1,14	1,67 ± 0,62	3,26 ± 2,19	0,42 ± 0,42
Общая сумма	89,32 ± 15,39	78,16 ± 14,24	40,65 ± 12,70	187,18 ± 15,60	159,03 ± 19,78	123,21 ± 9,19

Примечание: данные представлены как среднее значение ± стандартное отклонение

Note: the data are presented as the mean ± standard deviation

В этом субкластере отмечено высокое содержание Cy-3-Glu, Pg-3-Glu, Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 1), Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2), Pg-3-(6-mal)Glu, Cy-3-dimal-Glu, Peo-3-(6-mal)Glu и неидентифицированного антоциана 8 (см. табл. 4).

Субкластер 2Б обладает более низким суммарным содержанием антоцианов ($159,03 \pm 19,78$ мг/100 г) по сравнению с субкластером 2А (см. табл. 4). Также в нем наблюдается снижение значений большинства антоцианов, при этом содержание антоцианов Peo-3-(6-mal)Glu, Pg-3-dimal-Glu и Peo-3-dimal-Glu является максимальным из всей выборки. Важно отметить, что в данном субкластере присутствуют все 16 видов антоцианов (см. табл. 4).

Субкластер 2В содержит еще более низкое суммарное количество антоцианов ($123,21 \pm 9,19$ мг/100 г). Однако несмотря на то, что большинство антоцианов имеют тенденцию к уменьшению количества по сравнению с субкластерами 2А и 2Б, содержание Cy-3-Glu в субкластере 2В выше, чем в субкластере 2Б (см. табл. 4).

Из изученных 35 линий-гаплоиндукторов кукурузы нами выделены образцы с уникальными биохимическими характеристиками. Профили линий из кластера 1 представлены в таблице 5, а из кластера 2 – в таблице 6.

Из субкластера 1А можно выделить все три линии (см. рис. 3). Гаплоиндуктор ГИ-8097-2 (№ 17) характеризуется наиболее высоким содержанием Cy-3-Glu ($42,43$ мг/100 г), достигающим 59% от всей суммы антоцианов, тогда как содержание остальных соединений в данной линии было минимальным. Образец С-453-6 (№ 63) отличается повышенным накоплением как Cy-3-Glu ($34,73$ мг/100 г), так и его малонированной формы Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2) – $45,07$ мг/100 г. Линия ГИ (В Сар.) (8102-5) 7041 (№ 22) имеет уникальный профиль, включающий высокое содержание Cy-3-Glu ($31,25$ мг/100 г) и высокое содержание Peo-3-Glu ($15,63$ мг/100 г) относительно других линий (см. табл. 5).

Из субкластера 1Б можно выделить четыре линии. У трех линий – ГИ-9201-2 (7363) (№ 6), С-799-1 213 (№ 119), ЗМС-8 (8026) 173 (№ 123) – повышено содержание Pg-3-(6-mal)Glu; у линии С-832 плен. ант. (7091) (№ 41) повышено содержание антоциана Peo-3-(6-mal)Glu – $14,11$ мг/100 г. Уникальными в этом субкластере являются линии ГИ-9201-2 (7363) (№ 6) и С-799-1 213 (№ 119), так как они имеют в своем составе невысокое содержание Cy-3-Glu относительно других линий этого

Таблица 5. Антоциановый профиль уникальных образцов линий-гаплоиндукторов кукурузы кластера 1, мг/100 г**Table 5. Anthocyanin profiles of the unique maize haploid inducer line samples in Cluster 1, mg/100 g**

Название антоциана / Anthocyanin name	№ линии / Line No.								
	17	63	22	6	119	123	41	115	80
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,88
3	0	0,94	0	0	1,21	0	0	0	0,53
4	0	0	0	0	0,39	0	0	0	16,51
Cy-3-Glu	42,43	34,73	31,25	9,40	9,21	16,76	14,67	8,22	3,09
Pg-3-Glu	0,97	0,82	1,10	2,86	1,25	2,94	3,28	0	1,72
Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 1)	3,73	2,34	1,53	1,73	1,68	1,86	1,40	0	2,31
8	0	1,79	0	2,25	2,10	2,01	3,91	16,72	2,79
Peo-3-Glu	9,14	2,08	15,63	1,00	2,03	3,39	8,34	0	38,31
Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2)	9,99	45,07	25,59	34,74	26,45	35,32	33,48	9,67	14,16
Pg-3-(6-mal)Glu	3,39	7,27	5,06	14,21	10,76	13,31	9,69	3,15	7,80
Cy-3-dimal-Glu	0,84	3,77	0,77	9,50	6,14	4,53	7,22	2,03	9,86
Peo-3-(6-mal)Glu	1,35	1,97	8,55	4,26	3,58	9,74	14,11	10,10	0
14	0	0	0	0	0,53	0,84	0	0	0
Pg-3-dimal-Glu	0	0	0	1,43	2,02	3,61	0	1,60	3,21
Peo-3-dimal-Glu	0	0	5,86	0,32	1,05	2,39	1,60	2,02	1,92
Суммарное содержание антоцианов, мг/100 г сухого сырья / Total anthocyanin content, mg/100 g dry raw material	71,8	100,8	95,3	81,7	68,4	96,7	97,7	53,5	103,1

кластера и высокое содержание его малонированной формы Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2). В линии C-799-1 213 (№ 119) в небольших количествах обнаружены два неидентифицированных антоциана 3 и 4 (см. табл. 5).

Из субкластера 1В можно выделить одну линию – ЗМК1У (№ 115), которая характеризуется самым высоким содержанием неидентифицированного антоциана 8 (16,72 мг/100 г) из всех 35 образцов выборки и повышенным содержанием антоциана Peo-3-(6-mal)Glu (10,10 мг/100 г) (см. табл. 5).

Уникальным профилем обладает линия ГИ-97У165-4 (8495) 7338 черн. (№ 80). Она отличается от всех линий кластера 1 наличием сразу четырех неидентифицированных антоцианов – 2, 3, 4, 8; при этом содержание неидентифицированного антоциана 4 является самым высоким, содержание Cy-3-Glu – самым низким, а содержание Peo-3-Glu – максимальным среди всех изученных линий-гаплоиндукторов кукурузы (см. табл. 5).

Из субкластера 2А можно выделить все три линии (см. рис. 3). Образец ГИ-1 (7343) 7026 (№ 66) содержит самые высокие показатели антоцианов Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 1), Cy-3-dimal-Glu и Peo-3-(6-mal)Glu, и одновременно отличается наиболее высоким суммарным содержанием

антоцианов (203,6 мг/100 г) среди всех изученных образцов. Линии-гаплоиндукторы ГИ-9244-2 (№ 118) и ГИ-9104-5 (7325) (№ 35) обладают самыми высокими значениями антоциана Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2) среди всех изученных линий (см. табл. 6).

Из субкластера 2В можно выделить четыре линии. Линия ГИ-33 (7922) (№ 94) показала максимальные значения среди всех линий по содержанию трех антоцианов: Pg-3-(6-mal)Glu (33,93 мг/100 г), Pg-3-dimal-Glu (11,11 мг/100 г) и неидентифицированного антоциана 14 (4,58 мг/100 г). Линия ГИ-1 (7344) (№ 93) содержит небольшое количество неидентифицированного антоциана 1, тогда как у остальных линий его нет, а линии ГИ-97У172 (8519) 7362 (№ 18) и ГИ обратный маркер (№ 97) содержат небольшое количество неидентифицированных антоцианов 2, 3 и 4, также отсутствующих в профилях других линий (см. табл. 6).

В субкластере 2В фактически все линии схожи друг с другом по качественному составу и суммарному содержанию антоцианов, но можно выделить линию ГИ-8094-6 (№ 98), которая показала максимальное суммарное содержание антоцианов среди этого субкластера – 140,7 мг/100 г.

Таблица 6. Антоциановый профиль уникальных образцов линий-гаплоиндукторов кукурузы кластера 2, мг/100 г**Table 6. Anthocyanin profiles of the unique maize haploid inducer line samples in Cluster 2, mg/100 g**

Название антоциана / Anthocyanin name	№ линии / Line No.							
	66	118	35	94	93	18	97	98
1	0	0	0	0	0,46	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0,22	0,28	0
3	0	0	0	0	0	2,05	0,30	0,38
4	0	0	0	0	0	1,05	0,53	0
Cy-3-Glu	23,82	25,33	16,64	16,57	17,62	11,78	18,65	24,04
Pg-3-Glu	5,88	6,26	3,76	8,15	4,34	3,45	3,41	3,13
Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 1)	4,58	3,70	3,12	3,08	3,33	1,95	2,78	2,85
8	7,20	6,71	5,89	6,77	7,36	4,89	5,34	6,90
Peo-3-Glu	5,07	2,06	2,43	3,73	4,08	3,10	2,11	2,24
Cy-3-(6-mal)Glu (изомер 2)	75,27	79,67	80,86	61,07	63,87	54,49	57,12	59,66
Pg-3-(6-mal)Glu	28,57	26,31	24,15	33,93	21,62	27,39	20,48	15,50
Cy-3-dimal-Glu	29,94	22,89	21,78	23,87	27,45	18,89	21,53	17,80
Peo-3-(6-mal)Glu	17,96	8,60	8,88	15,26	13,14	8,84	11,61	7,17
14	3,79	0	0	4,58	0	0,78	0	0
Pg-3-dimal-Glu	0	2,65	2,75	11,11	4,12	3,26	4,36	0,74
Peo-3-dimal-Glu	1,55	1,12	2,33	5,58	3,79	1,26	4,10	0,29
Суммарное содержание антоцианов, мг/100 г сухого сырья / Total anthocyanin content, mg/100 g dry raw material	203,6	185,3	172,6	193,7	171,2	143,4	152,6	140,7

Обсуждение

В настоящем исследовании впервые был проведен комплексный анализ антоцианового профиля линий кукурузы с гаплоиндуцирующей способностью. Мы обнаружили, что общее количество антоцианов в 125 изученных линиях-гаплоиндукторах кукурузы сильно колеблется – от 14 до 203,6 мг/100 г. Это совпадает с тем, что уже известно о других цветных сортах кукурузы (Abdel-Aal et al., 2006; Cai et al., 2023; García-López et al., 2025), и показывает, что изученные линии-гаплоиндукторы кукурузы очень перспективны для дальнейшего селекционного применения. Несмотря на большой разброс показателей, значимым для дальнейших исследований представляется то, что большинство линий (59 из 125) содержат от 70 до 130 мг/100 г антоцианов, то есть полученные данные свидетельствуют о высоком среднем уровне антоцианов в изученных линиях-гаплоиндукторах кукурузы. Для ДН-технологий это очень важно, ведь от того, насколько равномерно окрашены зерновки, напрямую зависит, насколько точно можно выбрать истинные гаплоидные зерна и снизить частоту ложноположительных зерновок (Chaikam et al., 2019).

Большинство изученных линий, составивших основу всех полученных групп, обнаруживших высокое суммарное содержание антоцианов, принадлежат к селекции ИСХ КБНЦ РАН (оригинатор: Э. Б. Хатефов). В то же время линии из других научных учреждений (ВИР, СГУ им. Чернышевского и НЦЗ им. Лукьяненко) были преимущественно выявлены в группах со средним или низким уровнем антоцианов. Это наблюдение позволяет сделать вывод о том, что в процессе селекции в линиях ИСХ КБНЦ РАН, вероятно, были закреплены гены (аллели), ответственные за повышенную выработку антоцианов. Важно отметить, что линии ЗМС и ЗМК имеют общего предка, что открывает значительные перспективы для дальнейших генетических и биохимических исследований.

С помощью метода ВЭЖХ мы исследовали качественный состав антоцианов и обнаружили 16 соединений, из которых смогли определить 10. Это соответствует литературным данным (Abdel-Aal et al., 2006; Tretyakov et al., 2012). Высокое содержание Cy-3-Glu и его малонированных производных подтверждает важную роль флавоноид-3'-гидроксилазы в биосинтезе данных антоцианов (Sharma et al., 2012). Впервые в нашей работе было обнаружено, что у линий-гаплоиндукторов кукурузы

есть две изомерные формы Су-3-(6-mal)Glu. Однако в цитируемой литературе мы нашли лишь одну такую форму (Tretayakov et al., 2012). Возможно, такое различие связано с генотипическими особенностями гаплоиндукторов кукурузы.

Наиболее важным результатом кластерного анализа является то, что изученная репрезентативная выборка, состоящая из 35 линий, разделилась на две группы, которые отличаются не только количественным, но и качественным составом. В кластере 1 в основном встречаются неацилированные формы антоцианов, а в кластере 2 – ацилированные (малонированные и дималонированные). Так как ацилирование повышает стабильность антоцианов (Salasina et al., 2020; Cai et al., 2023), линии-гаплоиндукторы из кластера 2 наиболее интересны для дальнейшего изучения в ДН-технологиях.

Наши результаты показали, что антоциановая маркерная система, которая работает на основе генов *R1-nj* и *C1*, по своему химическому составу не является однородной. Хотя гены *R1-nj* и *C1* совместно формируют фенотип Navajo, разные линии при этом заметно отличаются по качественному содержанию антоцианов. Маркерные гены *R1-nj* и *C1* выполняют роль регуляторов: они запускают процесс биосинтеза антоцианов, но при этом не определяют, какими эти антоцианы будут по составу (Irani, Grotewold, 2005). Из этого можно сделать вывод, что фенотипическое проявление маркерных генов *R1-nj* и *C1* (Navajo) является результатом регуляторных и метаболических факторов, что следует учитывать при применении данной маркерной системы в ДН-технологиях.

Уникальные профили антоцианов, выявленные в ходе исследования, можно применять как при создании новых линий-гаплоиндукторов кукурузы с более эффективными маркерными признаками, так и для более детального анализа самих антоцианов. Особенно ценны те линии, у которых выявленные показатели отличаются высоким содержанием или уникальным составом.

Линия ГИ-1 (7343) 7026 (№ 66) показала самое высокое суммарное содержание антоцианов среди всех изученных линий – 203,6 мг/100 г. Это выше, чем у большинства окрашенных форм кукурузного зерна, описанных в литературе (Abdel-Aal et al., 2006). Линия ГИ-33 (7922) (№ 94) интересна тем, что она содержит максимальное количество Pg-3-(6-mal)Glu, Pg-3-dimal-Glu, и неидентифицированного антоциана 14. Линия ГИ-97Y165-4 (8495) 7338 черн. (№ 80) выделяется высоким содержанием Peo-3-Glu – 38,3 мг/100 г. Это делает ее потенциальным источником дополнительного визуального маркера наряду с обычным Су-3-Glu. У линии ГИ-8097-2 (№ 17) доминирует одна неацилированная форма – Су-3-Glu, на которую приходится 59% от всех антоцианов, обнаруженных у данной линии. Такой состав антоцианов очень удобен для изучения регуляции отдельных этапов биосинтеза. Линия ЗМК1Y (№ 115) заметно выделяется высоким уровнем неизвестного антоциана 8 – 16,72 мг/100 г. Для установления его химической структуры требуется проведение масс-спектрометрического анализа.

В целом изученные линии могут использоваться как в фундаментальных исследованиях (для анализа механизмов регуляции, путей модификации и устойчивости), так и в прикладной селекции линий-гаплоиндукторов кукурузы с более эффективными маркерными признаками.

В хроматограммах ряда линий (С-799-1 213 (№ 119), ГИ-97Y165-4 (8495) 7338 черн. (№ 80), ЗМК1Y (№ 115) и др.) было найдено шесть пиков, которые нам не уда-

лось идентифицировать. Это может означать, что в данных генотипах присутствуют либо уникальные антоцианы, например ацилированные янтарной или яблочной кислотой, либо продукты неполного биосинтеза. Их идентификация с помощью масс-спектрометрии – первоочередная задача в будущем, так как новые стабильные пигментные системы могут расширить арсенал визуальных маркеров для гаплоидной селекции.

Заключение

Впервые охарактеризован антоциановый профиль линий-гаплоиндукторов кукурузы. Полученные результаты свидетельствуют о высоком биохимическом и селекционном потенциале изученных линий.

В ходе исследования показано, что большинство изученных линий-гаплоиндукторов кукурузы (59 из 125) характеризуются высоким общим содержанием антоцианов – от 70 до 130 мг/100 г в сухом сырье. Максимально высокие значения антоцианов выявлены только у линий селекции ИСХ КБНЦ РАН (оригинатор: Э. Б. Хатефов). Изученный материал представляет ценность для применения его в технологии удвоенных гаплоидов (ДН).

Полученные результаты анализа качественного состава антоцианов в линиях-гаплоиндукторах кукурузы методом ВЭЖХ показали, что основным компонентом антоцианового комплекса был Су-3-Glu и его производные. Во всех исследуемых образцах присутствовал Су-3-Glu, являющийся основным компонентом антоцианового комплекса. Впервые для линий-гаплоиндукторов кукурузы найдены две изомерные формы Су-3-(6-mal)Glu. Также обнаружены антоцианы: Peo-3-Glu и Pg-3-Glu и их ацилированные формы. У отдельных линий обнаружено присутствие неидентифицированных антоцианов (1, 2, 3, 4, 8 и 14).

Кластерный анализ разделил изученную репрезентативную выборку из 35 линий на 2 крупных кластера. В кластере 1 преобладает неацилированный Су-3-Glu, а суммарное содержание антоцианов в линиях является низким. Линии в кластере 2 показывают высокое суммарное содержание антоцианов; также в нем преобладают ацилированные формы антоцианов (малонированные и дималонированные). Поскольку ацилированные формы антоцианов повышают стабильность пигментов и снижают риск ошибок при визуальном отборе гаплоидов, то линии, входящие в кластер 2, представляют собой наибольший интерес для ДН-технологий.

Большинство исследованных линий-гаплоиндукторов кукурузы обладают фенотипическим проявлением Navajo, контролируемым маркерными генами *R1-nj* и *C1*, однако при этом наблюдается значительная вариабельность как по общему содержанию антоцианов, так и по их компонентному составу.

В изученной выборке выделены линии с уникальными антоциановыми профилями – линии ГИ-1 (7343) 7026 (№ 66), ГИ-33 (7922) (№ 94), ГИ-97Y165-4 (8495) 7338 черн. (№ 80), ГИ-8097-2 (№ 17), ЗМК1Y (№ 115). Все эти генотипы представляют собой ценность как для фундаментальных исследований путей биосинтеза антоцианов, так и для улучшения линий-гаплоиндукторов кукурузы.

Из полученных данных можно сделать вывод, что изученные антоциановые профили являются уникальными и химически разнородными; это представляет большую ценность для селекции кукурузы. Выделенные генотипы могут быть рекомендованы в качестве доно-

ров при создании новых линий-гаплоиндукторов кукурузы с улучшенными маркерными свойствами, что будет способствовать повышению эффективности метода удвоенных гаплоидов (DH).

Задачей наших дальнейших исследований является идентификация выявленных неизвестных соединений методом масс-спектрометрии, а также идентификация антоцианов у гибридов линий-гаплоиндукторов с кремнистой и зубовидной подвидов кукурузы.

References / Литература

- Abdel-Aal E.S.M., Young J.C., Rabalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006;54(13):4696-4704. DOI: 10.1021/jf0606609
- Asadova G.M., Ulyanov A.V., Karlov M.V. The prospects for using haploid inducers in maize breeding. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(2):16-29. [in Russian] (Асадова Г.М., Ульянов А.В., Карлов М.В. Перспективы использования гаплоиндукторов в селекции кукурузы. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(2):16-29). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-2-03
- Cai T., Ge-Zhang S., Song M. Anthocyanins in metabolite of purple corn. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1-10. DOI: 10.3389/fpls.2023.1154535
- Chaikam V., Molenaar W., Melchinger A.E., Boddupalli P.M. Doubled haploid technology for line development in maize: technical advances and prospects. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019;132(12):3227-3243. DOI: 10.1007/s00122-019-03433-x
- Deineka V.I., Sidorov A.N., Deineka L.A. Determination of purple corn husk anthocyanins. *Journal of Analytical Chemistry*. 2016;71(11):1145-1150. DOI: 10.1134/S1061934816110034
- García-López J.I., Hernández-Alonso E., Flores-Naveda A., Juanes-Márquez S., Ramírez-Barrón S., Hernández-Juárez A. et al. Comparison of polyphenols, anthocyanins and color analysis in pigmented maize from northeast Mexico. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2025;53(2):14413. DOI: 10.15835/nbha53214413
- Irani N.G., Grotewold E. Light-induced morphological alteration in anthocyanin-accumulating vacuoles of maize cells. *BMC Plant Biology*. 2005;5(1):7. DOI: 10.1186/1471-2229-5-7
- Jing P., Giusti M.M. Effects of extraction conditions on improving the yield and quality of an anthocyanin-rich purple corn (*Zea mays* L.) color extract. *Journal of Food Science*. 2007;72(7):C363-C368. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2007.00441.x
- Karbovskaia R.V., Boris I.I. Identification of anthocyanins by HPLC as a method for confirming the authenticity of fruit and berry raw materials and finished products. *Journal of the Chromatographic Society*. 2008;8(3-4):13-33. [in Russian] (Карбовская Р.В., Борис И.И. Идентификация антоцианов при помощи ВЭЖХ как метод подтверждения аутентичности фруктово-ягодного сырья и готовой продукции. *Журнал Хроматографического товарищества*. 2008;8(3-4):13-33).
- Khoo H.E., Azlan A., Tang S.T., Lim S.M. Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits. *Food and Nutrition Research*. 2017;61(1):1361779. DOI: 10.1080/16546628.2017.1361779
- Kurkin V.A., Ryazanova T.K., Kurkina A.V., Egorova A.V. Method for the quantitative determination of anthocyanins in medicinal plant raw materials (Sposob kolichestvennogo opredeleniya antotsianov v lekarstvennom rastitel'nom syrye). Russian Federation; patent number RU2557953C2; 2015. [in Russian] (Куркин В.А., Рязанова Т.К., Куркина А.В., Егорова А.В. Способ количественного определения антоцианов в лекарственном растительном сырье. Российская Федерация; патент № RU2557953C2; 2015).
- Lone A.A., Dar Z.A., Gull A., Gazal A., Naseer S., Khan M.H., et al. Breeding maize for food and nutritional security In: A.K. Goyal (ed.). *Cereal Grains. Vol. 1*. London: IntechOpen; 2021. p.39-54. DOI: 10.5772/intechopen.98741
- Paulsmeyer M., Chatham L., Becker T., West M., West L., Juvik J. Survey of anthocyanin composition and concentration in diverse maize germplasms. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2017;65(21):4341-4350. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b00771
- Petroni K., Pilu R., Tonelli C. Anthocyanins in corn: a wealth of genes for human health. *Planta*. 2014;240(5): 901-911. DOI: 10.1007/s00425-014-2131-1
- Salasina Y.Yu., Kalinikin D.S., Deineka V.I., Deineka L.A. Some regularities in the process of anthocyanin extraction from vegetable sources. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(4):691-699. [in Russian] (Саласина Я.Ю., Калинин Д.А., Дейнека В.И., Дейнека Л.А. Некоторые закономерности экстракции антоцианов из растительных источников. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020;10(4):691-699). DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-4-691-699
- Sharma M., Chai C., Morohashi K., Grotewold E., Snook M.E., Chopra S. Expression of flavonoid 3'-hydroxylase is controlled by P1, the regulator of 3-deoxyflavonoid biosynthesis in maize. *BMC Plant Biology*. 2012;12:196. DOI: 10.1186/1471-2229-12-196
- Shmaraev G.E., Matveeva G.V. Guidelines for the study and maintenance of maize collection accessions (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i podderzhaniiu obraztsov kollektsii kukuruzy). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Шмараев Г.Е., Матвеева Г.В. Методические указания по изучению и поддержанию образцов коллекции кукурузы. Ленинград: ВИР; 1985).
- Tretyakov M.V., Khoroshilov S.A., Sidorov A.N., Chulkov A.N., Deineka V.I., Deineka L.A. Corn as a source of anthocyanin. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2012;(9):30-32. [in Russian] (Третьяков М.Ю., Хорошилов С.А., Сидоров А.Н., Чулков А.Н., Дейнека В.И., Дейнека Л.А. Кукуруза как источник антоцианов. *Достижения науки и техники АПК*. 2012;(9):30-32).
- Ulyanov A.V., Karlov A.V., Khatefov E.B. The use of maize haploid inducers as a tool in agricultural plant biotechnology. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(7):704-713. [in Russian] (Ульянов А.В., Карлов А.В., Хатефов Э.Б. Использование гаплоиндукторов кукурузы как инструмента в биотехнологии сельскохозяйственных растений. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022;26(7):704-713). DOI: 10.18699/VJGB-22-85

Информация об авторах

Андрей Владиславович Карлов, аспирант, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, dra29399@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9193-9862>

Алексей Владимирович Ульянов, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, krasnixin56@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3960-8288>

Алла Евгеньевна Соловьева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, alsol64@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6201-4294>

Эдуард Балилович Хатефов, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, head1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Анастасия Борисовна Курина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, a.kurina@vir.nw.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3197-4751>

Information about the authors

Andrey V. Karlov, Postgraduate Student, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, dra29399@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9193-9862>

Aleksey V. Ulianov, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, krasnixin56@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-3960-8288>

Alla E. Solovyeva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, alsol64@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6201-4294>

Eduard B. Khatefov, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, head1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Anastasia B. Kurina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Acting Head of a Laboratory, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.kurina@vir.nw.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3197-4751>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.05.2026; одобрена после рецензирования 03.07.2026; принята к публикации 19.08.2026.
The article was submitted on 22.05.2026; approved after reviewing on 03.07.2026; accepted for publication on 19.08.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 634.31/34:581.19
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-03

Видовые особенности компонентного состава эфирного масла
в различных органах редких цитрусовых

Р. В. Кулян, В. Н. Бехтерев, О. Г. Белоус

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», Сочи, Россия

Автор, ответственный за переписку: Оксана Геннадьевна Белоус, oksana191962@mail.ru

Актуальность. Изучение накопления летучих компонентов эфирного масла цитрусовых актуально для выделения источников хозяйственно ценных признаков при проведении направленной селекционной работы.

Материалы и методы. Объекты – вегетативные и генеративные органы 9 форм редких цитрусовых (коллекция Субтропического научного центра, Сочи), объединенных генетическим родством в 4 группы. Состав летучих веществ изучали методом парового анализа. Идентификацию проводили по индивидуальным масс-спектрам на основе электронной базы спектральных данных NIST-2011, а также индексам удерживания в системе n-алканов и индексов удерживания ряда стандартных веществ. Относительное содержание определяли методом внутренней нормализации.

Результаты. Больше всего летучих компонентов содержат листья и цветки группы лимонов, близки к ней группа цитронов и форма ичангензис. Листья группы лаймов содержат больше всего лимонена (в среднем 71,67%), в 2,5–2,9 раз превышая остальные образцы. В цветках лаймов, цитронов и формы ичангензис лидирующим компонентом является лимонен, в группе помпельмуса и грейпфрута – изосильвестрен. Группу помпельмуса и грейпфрута и группу лимонов объединяет наличие в цветках сабинена и β -цис-оцимена. В кожуре группы цитронов выделены изопулегол (0,38%), 4-тринеол (0,38%) и линаил антранилат (0,45%). В образцах группы лимонов присутствуют α -фелландрен и *m*-цимен. В кожуре плодов группы помпельмуса и грейпфрута обнаружен 3-метил-апопинен.

Заключение. Наибольшее количество летучих компонентов определено в листьях, наименьшее – в кожуре. Наиболее богатым качественным составом характеризуется группа лимонов (в листьях 29 компонентов, в цветках – 22). В кожуре больше всего летучих компонентов содержит группа цитронов. Преимущественным компонентом вегетативных органов является лимонен, второй лидирующий компонент – изосильвестрен. В качественном и количественном составе летучих компонентов эфирного масла отмечены различия, обусловленные генетическими особенностями образцов.

Ключевые слова: Rutaceae, редкие цитрусовые, виды, лист, цветки, плоды, летучие компоненты, лидирующий компонент

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий Субтропического научного центра РАН: FGRW-2025-0004 (номер госрегистрации 125021202045-8) и FGRW-2024-0006 (номер госрегистрации 1022040800293-3).

Для цитирования: Кулян Р.В., Бехтерев В.Н., Белоус О.Г. Видовые особенности компонентного состава эфирного масла в различных органах редких цитрусовых. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):60-69. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-03

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o3

Species-specific features in the component composition of essential oil in various organs of rare citrus fruits

Raisa V. Kulyan, Victor N. Bekhterev, Oksana G. Belous

Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

Corresponding author: Oksana G. Belous, oksana191962@mail.ru

Background. Studying the accumulation of essential oil components in citruses is important, as it helps to identify sources of valuable agronomic traits during targeted breeding work.

Materials and methods. Vegetative and generative organs of 9 rare citrus forms (collection of the Subtropical Scientific Center, Sochi), classified into 4 groups based on their genetic kinship, served as the material for the study. Headspace analysis was used to study the composition of volatile compounds. Identification employed individual mass spectra based on the NIST 11 Standard Reference Library, as well as retention indices in the n-alkane system and retention indices of a number of standard compounds.

Results. Leaves and flowers of the lemon group contained the greatest share of volatile components; the citron group and the Ichang papada form were close to it. Lime leaves had the highest content of limonene (on average 71.67%), 2.5–2.9 times higher than the rest of the samples. Limonene was the leading component in flowers from the lime and citron groups, and the Ichang papada form, and isosilvestrene in the pomelo and grapefruit group. The pomelo and grapefruit group was close to the lemon group in the presence of sabinene and β -cis-ocimene in their flowers. Isopulegol (0.38%), 4-terpineol (0.38%), and linalyl anthranilate (0.45%) were identified in the peel of the citron group. The samples of the lemon group contained α -felandren and m-cymene, while 3-methyl-apopinene was found in the peel of the pomelo and grapefruit group.

Conclusion. The lemon group had the richest qualitative composition: there were 29 volatile components in leaves, and 22 in flowers. The citron group contained the most volatile components in the peel. Limonene predominated in vegetative organs, followed by isosilvestrene. There are differences in the qualitative and quantitative composition of volatile essential oil components due to the genetic characteristics of the samples.

Keywords: Rutaceae, rare citruses, species, leaf, flowers, fruits, volatile components, leading component

Acknowledgments: the study was funded in the framework of the state tasks assigned to Subtropical Scientific Center of the RAS: FGRW-2025-0004, Project No. 125021202045-8, and FGRW-2024-0006, Project No. 1022040800293-3.

For citation: Kulyan R.V., Bekhterev V.N., Belous O.G. Species-specific features in the component composition of essential oil in various organs of rare citrus fruits. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):60-69. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o3

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Цитрусовые культуры – широко распространенные плодовые растения, которые имеют большое экономическое значение для развития сельского хозяйства многих стран с субтропическим и тропическим климатом. Цитрусовые относятся к семейству Rutaceae и включают важнейшие плодовые виды, такие как *Citrus sinensis* (L.) Osb. (апельсин), *Citrus limon* (L.) Burm. (лимон), *Citrus reticulata* Blan. var. *unshiu* Tan. (мандарин), *Citrus paradisi* Macf. (грейпфрут), *Citrus maxima* (L.) Osb. (помпельмус), *Citrus medica* (L.) Osb. (цитрон), *Citrus australasica* F. Muell (лайм), а также большое количество гибридных видов (Johnson et al., 2022).

Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук» (ФИЦ СНЦ РАН) является обладателем обширной генетической коллекции цитрусовых культур, которая насчитывает 146 образцов и представлена видами, сортами, межвидовыми гибридами, дикими и полудикими сородичами, многие из которых интродуцированы из различных регионов земного шара. Уникальность коллекция цитрусовых состоит в том, что она содержится в живом виде в самой северной субтропической зоне (Ryndin, Kulyan, 2016; Kulyan, Kuleshov, 2024).

Коллекции растений, в том числе и цитрусовых культур, играют большую роль в сохранении генетического разнообразия и служат базой для фундаментальных исследований в области генетики, селекции, физиологии, биотехнологии и многих других направлений (Ryndin, Kulyan, 2016; Kulyan, Kuleshov, 2024).

В ФИЦ СНЦ РАН идет постоянное изучение биохимического состава различных представителей цитрусовых в зависимости от их генетических особенностей, агротехники выращивания и т. д. (Straka, Belous, 2015; Kuleshov, Belous, 2020; Kulyan, Kuleshov, 2024). Хотя изучение содержания летучих компонентов начато только в 2024 г., нами был частично установлен основной состав эфирного масла коллекционных образцов (Bekhterev et al., 2024).

Целью работы, результаты которой представлены в данной статье, являлось установление особенности накопления летучих компонентов эфирного масла в вегетативных и генеративных органах некоторых редких цитрусовых для отбора наиболее ценных образцов для проведения направленной селекции.

Материалы и методы

Исследования выполнены в 2023–2024 гг. в условиях влажно-субтропической зоны Краснодарского края (Сочи) на базе генетической коллекции лаборатории селекции отдела генетических ресурсов растений (п. Раздольное, г. Сочи, Краснодарский край) и лаборатории физиологии и биохимии растений ФИЦ СНЦ РАН.

Объектами исследований являлись 9 форм редких цитрусовых (листья, цветки и кожура плодов) из коллекции ФИЦ СНЦ РАН, объединенных генетическим родством в 4 группы:

1-я группа – **помпельмус и грейпфрут** (крупноплодные, крупные белые цветки, крупный лист, плотная кожура), включает помпельмус ‘Тулрипшский’ (мякоть оранжевая кислая, присутствует явно выраженная горечь), грейпфрут Г-А-1 (мякоть с розовым оттенком, присутствует легкая горчинка в пленках, кожура гладкая желто-розовая);

2-я группа – **лайм** (листья средние, овальные на коротких черешках, цветки 3–5-лепестковые, иногда встречаются махровые (до 8 шт. лепестков), белые, ароматные, плоды мелкие, овально-продолговатые, тонкокорые, очень кислые без особого аромата): лайм ‘Таити’ и лайм кислый;

3-я группа – **лимон**: ‘Мейер’ (лист тонкий, цветки с антоциановой окраской, плоды оранжевого цвета), ‘Кантонский’ (лист тонкий мелкий, цветки мелкие с антоциановой окраской, плоды мелкие, оранжевого цвета кожура, мякоть и сок), ‘Дель Бразиль’ (лист плотный, крупный, плоды лимонного цвета, мякоть светлая, цветки крупные с антоциановой окраской);

4-я группа – **цитрон** (листья крупные, овальные с короткими черешками, цветки белые с мясистыми лепестками, плоды крупные толстокорые, с тонким ароматом): цитрон и цитрон ‘Рука Будды’ (мякоть отсутствует, кожура ароматная).

В исследование включен *Citrus ichangensis* Sw. (форма ичангензис) (подрод папеда, дикая форма, с хвойным ароматом, плоды несъедобны).

Вегетативные и генеративные органы на анализ брали в фазу активного роста (физиологически зрелые листья) и фазу цветения. Сырые анализировали в год сбора материала. Лабораторные анализы выполнены в лаборатории физиологии и биохимии растений ФИЦ СНЦ РАН. Состав летучих компонентов эфирного масла исследуемых образцов изучали методом парового анализа (Vitenberg, 2003), известного за рубежом, как Headspace Analysis (HSA) (Bekhterev, Malyarovskaya, 2019). В пенициллиновый флакон объемом 15 мл помещали навеску массой 2 г из измельченной путем нарезки средней пробы листьев растения, добавляли 5 мл дистиллированной воды. Далее, прокладывая полиэтиленовой пленкой, герметично закрывали резиновой пробкой, которую фиксировали специальным зажимом. После чего помещали флакон с содержимым в гнездо дозатора равновесного пара ДРП-10 (производства НПФ «Мета-Хром», РФ, Йошкар-Ола), представляющего собой водяную баню (термостат) с дополнительным вибрационным воздействием. Время подготовки пробы – 5 мин, температура – 80°C. По окончании процедуры путем прокола шприцем резиновой пробки из флакона брали нагретым до 60°C стеклянным шприцем 1 мл парогазовой смеси и вводили в инжектор газового хроматографа с масс-спектрометрическим детектором Focus SSL/DSQ II (Thermo Scientific). Режим работы аналитического комплекса был следующим: температура источника – 200°C; режим детектирования – 30–600 Da (positive ion); режим ионизации – 70 эВ; капиллярная разделительная колонка TR-5MS 30 м – 0,25 мм ID – 0,25 мкм; программированный температурный режим хроматографирования: 70°C – 1 мин, затем нагрев со скоростью 30 °C/мин до 280°C; температура инжектора – 230°C; температура интерфейса (transfer-line) – 260°C; газ-носитель – гелий, скорость – 1,2 мл/мин, сброс – 12 мл/мин; деление потока – 12.

Идентификацию проводили по индивидуальным масс-спектрам на основе электронной базы спектральных данных NIST-2011, а также индексам удерживания в системе n-алканов (нормальных алканов, образующих гомологический ряд углеводородов с линейной или разветвленной структурой) и индексов удерживания ряда стандартных веществ (толуол и этилацетат для подтверждения правильности результатов идентификации), имеющихся в арсенале лаборатории, по известному алгоритму (Kolb, 1999). Во внимание принимали химические

соединения, масс-спектры которых более чем на 40% совпадали со стандартными. Относительное содержание компонентов эфирного масла оценивали методом внутренней нормализации (Stolyarov et al., 1988; Bekhterev, Malyarovskaya, 2019).

Результаты и обсуждение

В листовом аппарате исследуемых форм редких цитрусовых нами идентифицировано 30 летучих компонентов, в цветках – 26, а также 20 различных летучих компонентов эфирного масла выделено из кожуры плодов (табл. 1).

В количественном и качественном составе проявляются генетические различия (рис. 1).

Наиболее богатым качественным составом органических летучих веществ в листьях и цветках выделяется 3-я группа (лимон 'Мейер', 'Кантонский' и 'Дель Бразиль'), в листьях которой выявлено 29 компонентов, в цветках – 22. По количеству обнаруженных нами в листьях летучих органических веществ к видам из группы лимонов близки образцы из группы цитронов и форма ичангензис (см. рис. 1). В то же время в кожуре плодов больше всего летучих компонентов выявлено в образцах 3-й группы (лимон), меньше всего веществ содержит кожура плодов ичангензиса.

Таблица 1. Состав летучих компонентов эфирного масла различных органов некоторых редких цитрусовых из 4 групп, объединенных генетическим родством (коллекция ФИЦ СЦ РАН, Сочи)

Table 1. Composition of volatile essential oil components in various organs of some rare citrus fruits from 4 groups united by their genetic kinship (collection of the Subtropical Scientific Center of the RAS)

Летучие компоненты / Volatile components	Содержание, % / Content, %		
	Листья / Leaves	Цветки / Flowers	Плоды / Fruits
α -туйен	0,68	0,01	7,98
1R- α -пинен	2,80	0,63	22,43
3-метил-апопинен	н/о	1,11	3,46
камфен	0,07	0,06	0,20
β -фелландрен	5,14	4,11	20,05
β -туйен	0,71	0,01	0,86
β -пинен	н/о	8,70	108,78
лаево- β -пинен	7,47	2,79	18,45
α -фелландрен	1,12	0,28	0,33
терпинолен	0,43	0,24	4,37
α -терпинен	н/о	0,65	3,01
<i>m</i> -цимен	н/о	0,99	2,67
изосильвестрен	н/о	21,41	556,26
лимонен	38,37	11,93	515,40
эвкалиптол	3,04	3,71	10,89
β -цис-оцимен	3,55	3,59	3,23
γ -терпинен	5,54	4,43	81,85
β -линалоол	9,58	10,14	31,74
β -цитронелаль	н/о	н/о	0,90
изопулегол	н/о	н/о	0,92
4-терпинеол	н/о	0,04	0,51
линалил антранилат	н/о	0,03	0,89
этанол	н/о	21,31	н/о
метилацетат	н/о	0,09	н/о
этилацетат	2,54	0,24	н/о
метилизобутират	н/о	н/о	н/о
этилпропионат	н/о	0,04	н/о
этилизобутират	н/о	0,01	н/о

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Летучие компоненты / Volatile components	Содержание, % / Content, %		
	Листья / Leaves	Цветки / Flowers	Плоды / Fruits
октан	н/о	0,01	н/о
гексанал	н/о	0,08	н/о
этил- α -метилбутират	н/о	0,02	н/о
сабинен	н/о	1,67	н/о
ориганен	н/о	0,51	н/о
1,3-диметил-2-этилбензен	н/о	0,05	н/о
бергамотен	0,07	н/о	н/о
β -фарнезен	н/о	0,02	н/о
β -бисаболен	0,24	0,01	н/о
толуен	0,18	н/о	н/о
мирцен	2,81	н/о	н/о
о-цимол	2,76	н/о	н/о
нонанал	0,03	н/о	н/о
родинал	4,30	н/о	н/о
<i>cis</i> -цитрал	4,70	н/о	н/о
<i>cis,trans</i> -цитрал	0,55	н/о	н/о
δ -элемен	0,20	н/о	н/о
β -кариофиллен	1,46	н/о	н/о
α -кариофиллен	0,20	н/о	н/о
β -кубинен	1,86	н/о	н/о
эликсен	0,56	н/о	н/о

Примечание: н/о – не обнаружено

Note: н/о – not detected

Лидирующим компонентом листьев всех исследуемых образцов является лимонен, причем больше всего его содержат листья лаймов (лайм 'Таити' и лайм кислый) – в среднем 71,67%, что в 2,5–2,9 раза выше, чем накапливают образцы помпельмусов и лимонов, а также форма ичангензис (рис. 2). В листьях 4-й группы (цитрон и цитрон 'Рука Будды') данный компонент не обнаружен. Несмотря на богатый качественный состав, содержание веществ в образцах из группы цитронов невысоко – от 0,01–0,02% (δ -элемен, α -кариофиллен, β -кубенен и эликсен) до 2,86% (эвкалиптол).

Как показал анализ литературных источников, качественный состав летучих компонентов эфирного масла из листьев цитрусовых различных групп мало отличается от наших данных (Waikedre et al., 2010; Jirapakkul et al., 2013; Bozkurt et al., 2017; etc.). Однако количественное содержание и соотношение компонентов несколько иное, что можно объяснить почвенно-климатическими особенностями в регионах возделывания данных культур. Так, рядом исследователей показано, что в листьях цитрусовых из группы лимонов на лимонен приходится от 3,2 до 75,2% в зависимости от видовых особенностей, в то время как в листьях лаймов его меньше – 1,5–63,4%

(Baik et al., 2008; Waikedre et al., 2010; Chahbi et al., 2020; etc.). При этом в листьях каффир-лайма (*Citrus hystrix* DC.), произрастающего в условиях Малайзии, лидирующим компонентом является не лимонен, а цитронеллаль, который не был обнаружен в образцах наших растений (Jirapakkul et al., 2013). Многими исследованиями показано, что в листьях большинства цитрусовых (группа лимонов, группа цитронов, ичангензис и др.) преимущественно представлены *транс*- β -оцимен, линанлил ацетат, α -пинен; лимонен количественно менее представлен по сравнению с этими соединениями (Chahbi et al., 2020; Clery et al., 2022; Christofoli et al., 2023). Однако в листьях ряда цитрусовых, произрастающих на территории Турции (Адан), лимонен занимает лидирующую позицию, составляя 66–93% (Bozkurt et al., 2017).

В цветках анализируемых форм редких цитрусовых, как и в листьях, лидирующими компонентами являются лимонен (22,3–82,6%) и изосильвестрен (6,5–61,0%). Высокое содержание лимонена, являющегося мажорным компонентом в образцах анализируемых нами растений (и листьев, и цветков), считается положительным фактом ввиду его биологической активности в отношении ряда штаммов микроорганизмов (Baik et al., 2008; Singh

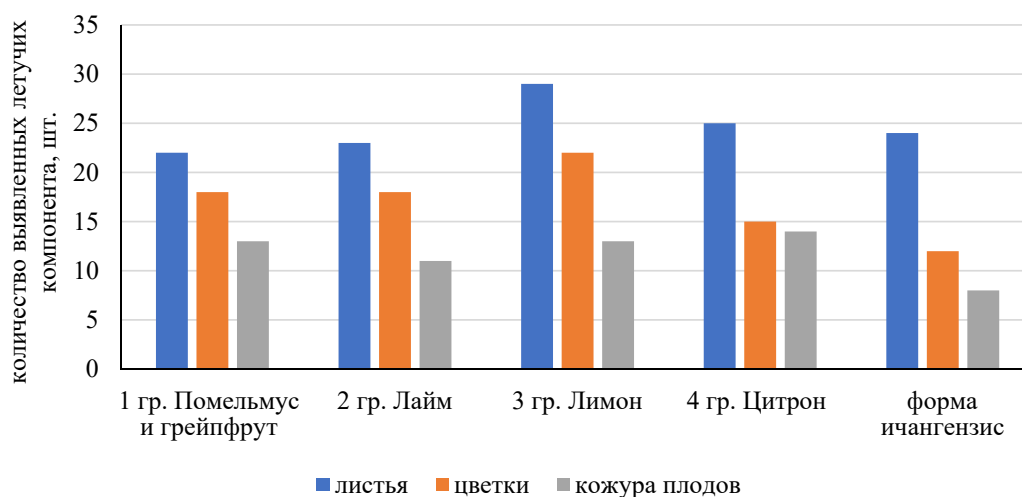


Рис. 1. Количественный состав летучих компонентов образцов некоторых редких цитрусовых из 4 групп, объединенных генетическим родством (коллекция ФИЦ ШЦ РАН, Сочи)

Fig. 1. Quantitative composition of volatile components in samples of some rare citrus fruits from 4 groups united by their genetic kinship (collection of the Subtropical Scientific Center of the RAS, Sochi)

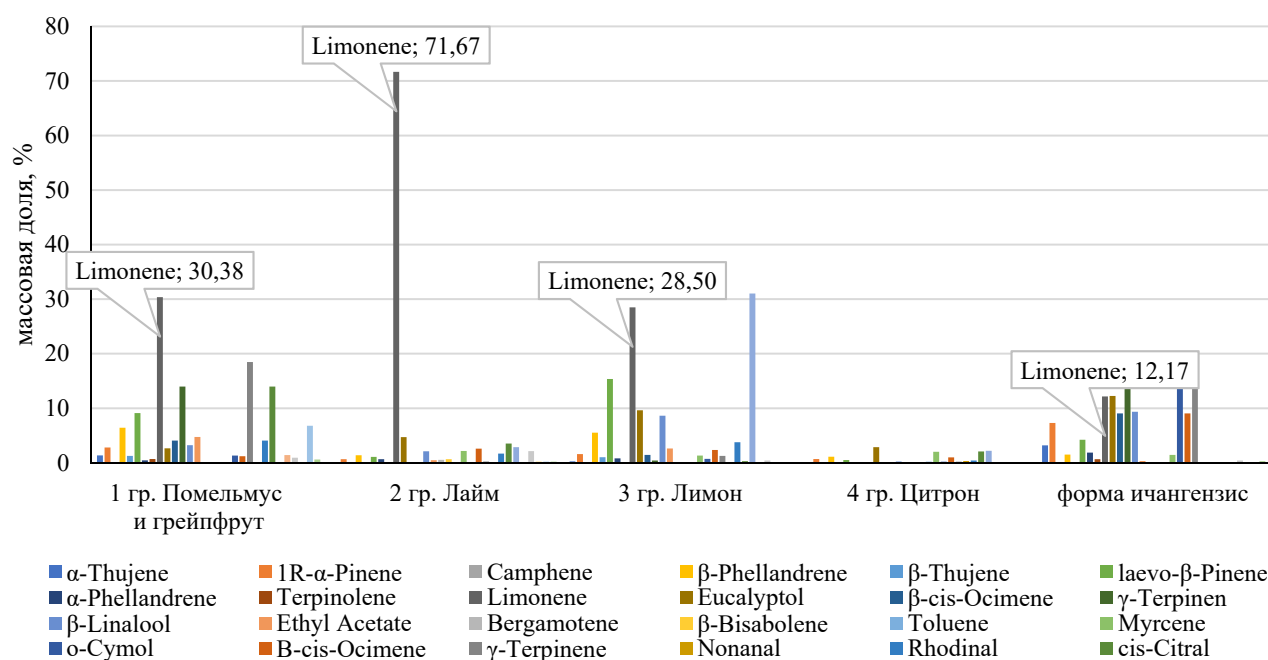


Рис. 2. Содержание органических летучих компонентов в листьях некоторых редких цитрусовых из 4 групп, объединенных генетическим родством (коллекция ФИЦ ШЦ РАН, Сочи)

Fig. 2. The content of organic volatile components in the leaves of some rare citrus fruits from 4 groups united by genetic kinship (collection of the Subtropical Scientific Center of the RAS, Sochi)

et al., 2010; Stepanenko et al., 2014). Не менее важно обнаружение изосильвестрена в образцах цитрусовых, так как это соединение, как и ряд других терпеноидов (лимонен, пинен, мирцен и т. д.), проявляет высокую антиоксидантную и противомикробную активность (Christofoli et al., 2023).

Несмотря на обнаруженные общие закономерности, проявляется и видовое различие (рис. 3): лимонен является лидирующим компонентом в цветках групп лаймов, цитронов и в образцах ичангензиса. В цветках образцов из 1-й группы (помпельмус и грейпфрут) и 3-й группы (лимон) лимонен не обнаружен, лидирующим

компонентом в них является изосильвестрен, его содержание колеблется в пределах 33,04%. В цветках всех рассмотренных групп (кроме формы ичангензис), помимо двух лидирующих компонентов, выделен этанол в количестве от 17,2% (группа лимонов) до 53,1% (группа лаймов). Уникальность качественного состава цветков лимонной группы связана с присутствием в составе летучих компонентов такого вещества, как γ -терпинен (3,80%), который не выявлен в цветках образцов других групп и ичангензиса. Как показал анализ литературных данных, в листьях некоторых видов, в том числе и цитрусовых, этот монотерпен является ведущим компонен-

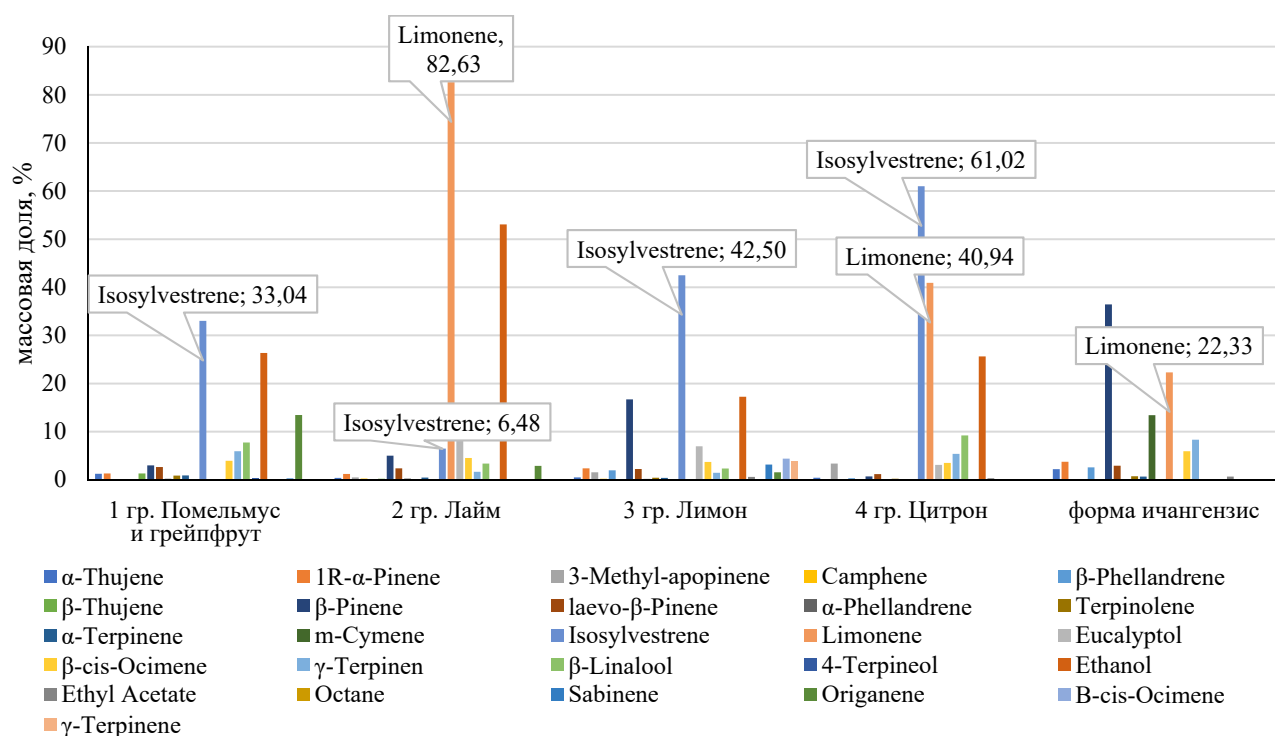


Рис. 3. Содержание органических летучих компонентов в цветках некоторых редких цитрусовых из 4 групп, объединенных генетическим родством (коллекция ФИЦ ШЦ РАН, Сочи)

Fig. 3. The content of organic volatile components in the flowers of some rare citrus fruits from 4 groups united by their genetic kinship (collection of the Subtropical Scientific Center of the RAS, Sochi)

том эфирного масла, определяя цитрусово-лимонный аромат, однако в образцах лимонной группы массовая доля γ -терпинена невелика (Tighe et al., 2013; Bekhterev et al., 2024).

Группу помпельмуса и грейпфрута и группу лимонов объединяет содержание в их цветках сабинена (0,30–3,17%) и β -цис-оцимена (0,15–4,41%), которых нет в остальных образцах. Сабинен, относящийся к бициклическим монотерпенам с молекулярной формулой $C_{10}H_{16}$, содержится в эфирных маслах различных растений, в том числе и цитрусовых. Причем, как показывает литературный обзор ряда источников, этот компонент активно реагирует на световые условия, изменяя количество в том или ином органе (Bazaka et al., 2016; Park et al., 2019). Учитывая, что сабинен обладает широким спектром биологической активности, он является достаточно перспективным, в том числе и в направлении корректировки условий выращивания культуры.

В свою очередь, такой летучий компонент, как β -цис-оцимен, играет роль в защите растений от биотических стрессов, что также является ценным в проведении направленной селекционной работы (Bazaka et al., 2016; Farré-Armengol et al., 2017).

В кожуре плодов, как и в остальных органах анализируемых образцов, накапливаются преимущественно лимонен и изосильвестрен (рис. 4). Однако если в образцах из групп лаймов и лимонов отмечено высокое содержание этих лидирующих компонентов, в среднем от 88,63% (изосильвестрен) до 90,59% (лимонен), то в кожуре плодов остальных образцов из лидирующих присутствует или лимонен (группа цитронов и ичангензис), или только изосильвестрен (группа помпельмуса и грейпфрута). В кожуре образцов из группы цитронов выделены три органических летучих компонента, не встречающиеся в составе эфирного масла остальных образцов: изопу-

легол (0,38%), 4-терпинеол (0,38%) и линалил антранилат (0,45%). Как известно, изопулегол представляет интерес, благодаря своим ароматическим и анестезирующим свойствам (Ivshina et al., 2022). Монотерпеновый спирт 4-терпинеол встречается в эфирных маслах многих видов растений и широко используется в качестве ароматизатора в косметической и пищевой промышленности (Tighe et al., 2013; Jing et al., 2015; Khaleel et al., 2018). Кроме того, это соединение обладает антимикробными и противовоспалительными свойствами, что делает ценным селекцию видов из группы цитронов на повышенное содержание данного компонента. Линалил антранилат (антраниловая кислота) был идентифицирован в ряде растительных экстрактов и эфирных масел различными авторами. Показано, что данное соединение обладает ярким цветочным, виноградным запахом, что делает его привлекательным в качестве ароматизатора (Pokaiewicz et al., 2024). Кроме того, линалил антранилат характеризуется потенциальной биологической активностью, включая антиоксидантные свойства (Yang et al., 2021). Таким образом, содержание этих трех летучих компонентов в кожуре образцов из группы цитронов – важный факт в проведении направленной селекционной работы на повышенное содержание органических летучих компонентов.

В образцах 3-й группы (лимон) присутствуют в небольших количествах α -фелландрен и m -цимен (0,13–1,34%). Как известно, α -фелландрен является монотерпеном, распространенным в эфирных маслах многих растений. Первоначально его выделили из эвкалипта фелландра (*Eucalyptus phellandra* R.T. Baker & H.G. Sm.), от которого соединение и получило свое название. В свою очередь, m -цимен относится к органическим соединениям из класса кумеенов. Оба вещества обладают антимикробной, противовоспалительной, анальгезирующей

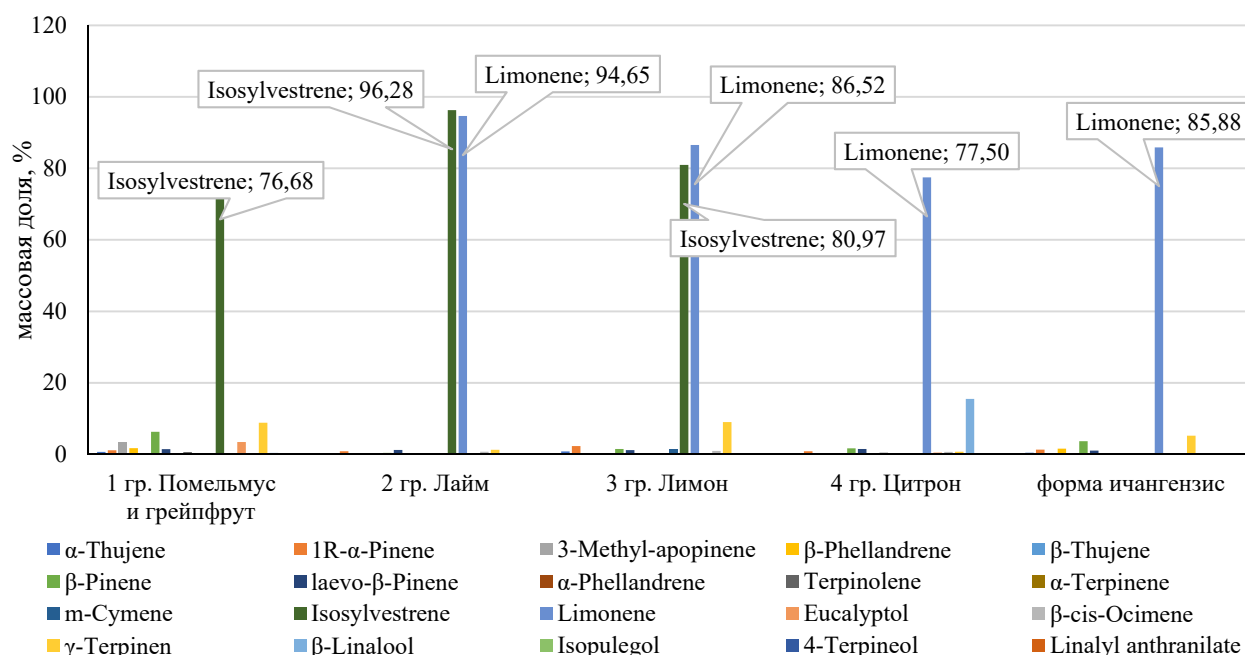


Рис. 4. Содержание органических летучих компонентов в кожуре плодов некоторых редких цитрусовых из 4 групп, объединенных генетическим родством (коллекция ФИЦ СНЦ РАН, Сочи)

Fig. 4. The content of organic volatile components in the peel of some rare citrus fruits from 4 groups united by their genetic kinship (collection of the Subtropical Scientific Center of the RAS, Sochi)

и противоопухолевой активностью, что делает привлекательным их содержание в кожуре образцов группы лимонов и проведение направленной селекции на их повышенное содержание (Clery et al., 2022).

Еще одно соединение, 3-метил-апопинен (содержание составляет около 3,46%), представляющий собой тритерпеновый сапонин, несмотря на его широкую распространенность в различных органах растений (Ibrahim et al., 2018; Chahbi et al., 2020), обнаружен нами только в кожуре плодов из группы помпельмуса и грейпфрута. Из остальных образцов его выделить не удалось. Причем это соединение выделено нами только из цветков и кожуры плодов, в листьях данного компонента нет.

Заключение

Таким образом, проведено определение компонентного состава вегетативных и генеративных органов ряда редких цитрусовых, объединенных на основании генетического родства в четыре группы. Анализ показал, что больше всего компонентов выделено из листьев – 29 веществ, в цветках – 25, и меньше всего их содержится в кожуре – 20 компонентов. Наиболее богатым качественным составом характеризуется группа лимонов, в листьях которой выявлено 29 компонентов, в цветках – 22. По количеству обнаруженных летучих органических веществ к видам из группы лимонов близки образцы из группы цитронов и дикая форма ичангензис. В кожуре плодов больше всего летучих компонентов выявлено в образцах из группы цитронов, меньше всего веществ содержит кожура плодов ичангензиса. Лидирующим компонентом вегетативных и генеративных органов исследуемых образцов является лимонен, причем больше всего его в листьях группы лаймов (в среднем 71,67%). В цветках и кожуре вторым лидирующим компонентом после лимонена является изосильвестрен (6,5–61,0%). Однако проявляется видовое различие. Так, лимонен обнаружен только в цветках формы ичангензис и образцов

из групп лаймов, цитронов. Образцы из группы помпельмуса и грейпфрута, а также группы лимонов объединяет содержание в их цветках сабинена (0,30–3,17%) и β -цис-оцимена (0,15–4,41%), которых нет в остальных образцах. В кожуре плодов из групп лаймов и лимонов отмечено высокое содержание обоих лидирующих компонентов (изосильвестрен в среднем – $88,63 \pm 10,83\%$; лимонен – $90,59 \pm 5,74\%$). В кожуре плодов остальных образцов из лидирующих присутствует или лимонен (группа цитронов и форма ичангензис), или только изосильвестрен (группа помпельмуса и грейпфрута). В кожуре образцов из группы цитронов среди летучих компонентов выделены три органических вещества, не встречающиеся в остальных образцах: изопулегол (0,38%), 4-терпинел (0,38%) и линалил антранилат (0,45%). В кожуре плодов из группы помпельмуса и грейпфрута обнаружен 3-метил-апопинен (около 3,46%), из остальных образцов его выделить не удалось.

References / Литература

- Baik J.S., Kim S.S., Lee J.A., Oh T.H., Kim J.Y. Lee N.H. et al. Chemical composition and biological activities of essential oils extracted from Korean endemic citrus species. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2008;18(1):74-79.
- Bazaka K., Destefani R., Jacob M.V. Plant-derived cis- β -ocimene as a precursor for biocompatible, transparent, thermally-stable dielectric and encapsulating layers for organic electronics. *Scientific Reports*. 2016;6:38571. DOI: 10.1038/srep38571
- Bekhterev V.N., Kulyan R.V., Belous O.G. The composition of volatile substances of essential oil in the leaves of some citrus species. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2024;(4):325-332. [in Russian] (Бехтерев В.Н., Кулян Р.В., Белоус О.Г. Состав летучих веществ эфирного масла в листьях некоторых видов цитрусовых. *Химия растительного сырья*. 2024;(4):325-332). DOI: 10.14258/jcprgm.20240412859

- Bekhterev V.N., Malyarovskaya V.I. Rapid HPLC method of scopoletine determination in *Weigela* leaves based on one-step sample preparation by extractive freezing-out. *Mendeleev Communications*. 2019;29(5):592-594. DOI: 10.1016/j.mencom.2019.09.039
- Bozkurt T., Gülnaz O., Kaçar Y.A. Chemical composition of the essential oils from some citrus species and evaluation of the antimicrobial activity. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*. 2017;11(10):29-33. DOI: 10.9790/2402-1110032933
- Chahbi A., Nassik S., El Amri H., Douaik A., El Maadoudi E.H., Boukharta M. et al. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oils of two aromatic plants cultivated in Morocco (*Cinnamomum cassia* and *Origanum compactum*). *Journal of Chemistry*. 2020;2020:1628710. DOI: 10.1155/2020/1628710
- Christofoli M., da Silva W.J., da Silva N.F., Bonifácio N.P., Souza C.S., Silva F.G. et al. Diet of broilers with essential oil from *Citrus sinensis* and *Xylopi aromaticum* fruits. *Animals (Basel)*. 2023;13(21):3326. DOI: 10.3390/ani13213326
- Clery R.A., Armendi A., Franco V., Furrer S., Genereux J.C., Kahn T.L. et al. Chemical diversity of citrus leaf essential oils. *Chemistry and Biodiversity*. 2022;19(3):e202100963. DOI: 10.1002/cbdv.202100963
- Farré-Armengol G., Filella I., Llusà J., Peñuelas J. β -Ocimene, a key floral and foliar volatile involved in multiple interactions between plants and other organisms. *Molecules*. 2017;22(7):1148. DOI: 10.3390/molecules22071148
- Ibrahim M., Du X., Agarwal M., Hardy G., Abdulhussein M., Ren Y. Influence of benzyladenine on metabolic changes in different rose tissues. *Plants (Basel)*. 2018;7(4):95. DOI: 10.3390/plants7040095
- Ivshina I.B., Luchnikova N.A., Maltseva P.Yu., Ilyina I.V., Volcho K.P., Gatilov Yu.V. et al. Biotransformation of (-)-isopulegol by *Rhodococcus rhodochrous*. *Pharmaceuticals (Basel)*. 2022;15(8):964. DOI: 10.3390/ph15080964
- Jing G.X., Tao N., Jia L., Zhou H.E. Influence of α -terpineol on the growth and morphogenesis of *Penicillium digitatum*. *Botanical Studies*. 2015;56:35. DOI: 10.1186/s40529-015-0116-4
- Jirapakkul W., Tinchin P., Chaiseri S. Effect of drying temperature on key odourants in kaffir lime (*Citrus hystrix* D.C., Rutaceae) leaves. *International Journal of Food Science and Technology*. 2013;48(1):143-149. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2012.03170.x
- Johnson J.B., Batley R., Manson D., White S., Naiker M., White S. et al. Volatile compounds, phenolic acid profiles and phytochemical content of five Australian finger lime (*Citrus australasica*) cultivars. *LWT – Food Science and Technology*. 2022;154:112640. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112640
- Khaleel C., Tabanca N., Buchbauer G. α -Terpineol, a natural monoterpene: A review of its biological properties. *Open Chemistry*. 2018;16(1):349-361. DOI: 10.1515/chem-2018-0040
- Kolb B. Headspace sampling with capillary columns. *Journal of Chromatography A*. 1999;842(1-2):163-205.
- Kuleshov A.S., Belous O.G. Chemical composition of citrus representatives (Literature review). *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2020;(72):108-116. [in Russian] (Кулешов А.С., Белоус О.Г. Химический состав представителей рода *Citrus* (литературный обзор). *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2020;(72):108-116). DOI: 10.31360/2225-3068-2020-72-108-116
- Kulyan R.V., Kuleshov A.S. Study and practical use of biore-sources of citrus crops collection. *The Agrarian Scientific Journal*. 2024;(1):17-23. [in Russian] (Кулян Р.В., Кулешов А.С. Изучение и практическое использование биоресурсной коллекции цитрусовых культур. *Аграрный научный журнал*. 2024;(1):17-23). DOI: 10.28983/asj.y2024i1pp17-23
- Park B.I., Kim B.S., Kim K.J., You Y.O. Sabinene suppresses growth, biofilm formation, and adhesion of *Streptococcus mutans* by inhibiting cariogenic virulence factors. *Journal of Oral Microbiology*. 2019;11(1):1632101. DOI: 10.1080/20002297.2019.1632101
- Pokajewicz K., Biernat T., Wiczorek P.P. Is linalyl anthranilate indeed found in plant samples? GC-MS misidentifications in the scientific literature. *Journal of Natural Products*. 2024;87(12):2839-2846. DOI: 10.1021/acs.jnatprod.4c01118
- Ryndin A.V., Kulyan R.V. Collection of citrus culture in the humid subtropics of Russian Federation. *Horticulture and Viticulture*. 2016;(5):24-30. [in Russian] (Рындин А.В., Кулян Р.В. Коллекция цитрусовых культур во влажных субтропиках России, *Садоводство и виноградарство*. 2016;(5):24-30). DOI: 10.18454/VSTISP.2016.5.3445
- Singh P., Shukla R., Prakash B., Kumar A., Singh S., Mishra P.K. et al. Chemical profile, antifungal, antiaflatoxigenic and antioxidant activity of *Citrus maxima* Burm. and *Citrus sinensis* (L.) Osbeck essential oils and their cyclic monoterpene, DL-limonene. *Food and Chemical Toxicology*. 2010;48(6):1734-1740. DOI: 10.1016/j.fct.2010.04.001
- Stepanenko I., Syatkin S., Akulina I., Nikitina L., Garayev R. Antimicrobial activity of (+)-limonene and of its derivative (+)-1,2-oxide limonene. *Bulletin of the Chuvash University*. 2014;(2):368-374. [in Russian] (Степаненко И.С., Сяткин С.В., Акулина И.В., Никитина Л.Е., Гараев Р.С. Анти-микробная активность (+)-лимонена и его производного (+)-1,2-оксида лимонена. *Вестник Чувашского университета*. 2014;(2):368-374).
- Stolyarov B.V., Savinov I.M., Vitenberg A.G. A guide to practical work on gas chromatography (Rukovodstvo k prakticheskim rabotam po gazovoy khromatografii). B.V. Ioffe (ed.). Leningrad: Khimiya; 1988. [in Russian] (Столяров Б.В., Савинов И.М., Витенберг А.Г. Руководство к практическим работам по газовой хроматографии / под ред. Б.В. Иоффе. Ленинград: Химия; 1988).
- Straka I., Belous O.G. Chemical composition of grapefruit fruitage (*Citrus paradise* Macf.) in terms of its nutritional value. *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2015;(54):153-160.
- Tighe S., Gao Y.Y., Tseng S.C.G. Terpinen-4-ol is the most active ingredient of tea tree oil to kill *Demodex* mites. *Translational Vision Science and Technology*. 2013;2(7):2. DOI: 10.1167/tvst.2.7.2
- Vitenberg A.G. Equilibrium model in the description of gas extraction and headspace analysis. *Journal of Analytical Chemistry*. 2003;58(1):2-15. DOI: 10.1023/A:1021873828994
- Waikedre J., Dugay A., Barrachina I., Herrenknecht C., Cabalion P., Fournet A. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oils from New Caledonian *Citrus macroptera* and *Citrus hystrix*. *Chemistry and Biodiversity*. 2010;7(4):871-877. DOI: 10.1002/cbdv.200900196
- Yang S.K., Yusoff K., Ajat M., Yap W.S., Lim S.H.E., Lai K.S. Antimicrobial activity and mode of action of terpene linalyl anthranilate against carbapenemase-producing *Klebsiella pneumoniae*. *Journal of Pharmaceutical Analysis*. 2021;11(2):210-219. DOI: 10.1016/j.jpha.2020.05.014

Информация об авторах

Раиса Васильевна Кулян, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией, Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», 354002 Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, raisa.kulyan22@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8406-8197>

Виктор Николаевич Бехтерев, доктор химических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», 354002 Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, vic-bekhterev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5816-9624>

Оксана Геннадьевна Белоус, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией, Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук», 354002 Россия, Сочи, ул. Яна Фабрициуса, 2/28, oksana191962@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5613-7215>

Information about the authors

Raisa V. Kulyan, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of a Laboratory, Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabritsiusa St., Sochi 354002, Russia, raisa.kulyan22@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8406-8197>

Victor N. Bekhterev, Dr. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabritsiusa St., Sochi 354002, Russia, vic-bekhterev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5816-9624>

Oksana G. Belous, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Head of a Laboratory, Subtropical Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2/28 Yana Fabritsiusa St., Sochi 354002, Russia, oksana191962@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5613-7215>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.10.2025; одобрена после рецензирования 20.05.2026; принята к публикации 25.06.2026.
The article was submitted on 10.10.2025; approved after reviewing on 20.05.2026; accepted for publication on 25.06.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.811:581.132:57.033:58.032.3
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-022



Диагностика устойчивости к засухе сортов винограда

Н. Г. Нилов, И. И. Рыфф, С. П. Березовская, В. Ю. Стаматиди, М. С. Попова, В. А. Волынкин, В. В. Лиховской

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач», Ялта, Россия

Автор, ответственный за переписку: Владимир Александрович Волынкин, vvolynkin@mail.ru

Актуальность. Последствия изменения климата становятся одной из важнейших проблем, влияя на урожай и качество винограда и получаемых вин. Актуальным становится поиск и выведение сортов, устойчивых к засухе.

Материалы и методы. Объектами исследования были 5 сортов винограда – один местный и четыре гибрида местных сортов с сортами селекции института «Магарач». Исследования проводили на Южном берегу Крыма в 2023–2024 гг.

Результаты. Проведен сравнительный анализ сортов винограда к условиям засухи *in vivo* в вегетационных сосудах и в культуре *in vitro*, полученные данные сопоставлены. Реакции растений винограда на стресс проявились в снижении длины побегов, площади листьев и продуктивности. Выяснено, что сорта 'Кок Пандас', 'Янтарный Магарача' и 'Кефесия Магарача' являются засухоустойчивыми.

Заключение. Для повышения объективности оценки устойчивости сортов винограда к засухе рекомендуется использование комплексного подхода, сочетающего вегетационный метод *in vivo* и биотехнологический метод *in vitro*. Установлено, что сорта 'Кок Пандас', 'Янтарный Магарача' и 'Кефесия Магарача' могут быть использованы в селекции для получения засухоустойчивых форм.

Ключевые слова: стресс, устойчивость к засухе, водный режим, площадь листьев, длина побегов, урожай

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания 5Ф-МАГАРАЧ.3.

Для цитирования: Нилов Н.Г., Рыфф И.И., Березовская С.П., Стаматиди В.Ю., Попова М.С., Волынкин В.А., Лиховской В.В. Диагностика устойчивости к засухе сортов винограда. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):70–83. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-022

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o22

Diagnostics of drought resistance in grapevine cultivars

Nikolay G. Nilov, Irina. I. Ryff, Svetlana P. Berezovskaya, Vladimir Yu. Stamatidi, Marina S. Popova,
Vladimir A. Volynkin, Vladimir V. Likhovskoi

*National Research Center "Kurchatov Institute", All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking
"Magarach", Yalta, Moscow, Russia*

Corresponding author: Vladimir A. Volynkin, v.volynkin@mail.ru

Background. The consequences of climate change have become one of the most important problems, affecting the yield and quality of grapes and wines. A relevant solution is searching for and breeding drought-resistant grapevine cultivars.

Materials and methods. Five grapevine genotypes served as the material for the study: one local cultivar, and four hybrids of local cultivars with those developed by the Magarach Institute. The experiments were conducted on the Southern Coast of Crimea in 2023–2024.

Results. The grapevine genotypes were analyzed for their responses to drought conditions *in vivo* (cultivation vessels) and *in vitro*, and the obtained data were compared. In response to stress, grapevine plants manifested a decrease in the length of shoots, leaf area, and yield. Drought resistance was shown by 'Kok Pandas', 'Yantarny Magaracha', and 'Kefesiya Magaracha'.

Conclusion. An integrated approach, combining the *in vivo* cultivation technique and the *in vitro* culture method, was used to improve the objectivity of assessing drought resistance in grapevines. As a result, cvs. 'Kok Pandas', 'Yantarny Magaracha' and 'Kefesia Magaracha' were identified as promising for breeding drought-resistant grapevine forms.

Keywords: stress, resistance to drought, water regime, leaf area, shoot length, yield

Acknowledgments: the work was performed under State Task 5F-MAGARACH.3.

For citation: Nilov N.G., Ryff I.I., Berezovskaya S.P., Stamatidi V.Yu., Popova M.S., Volynkin V.A., Likhovskoi V.V. Diagnostics of drought resistance in grapevine cultivars. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):70-83. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o22

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Современная теория глобального потепления доказывает изменения режима осадков и температурного режима по всему миру. Глобальное потепление вызывает увеличение периодов засух, неравномерное выпадение осадков и уменьшение их количества.

Засуха оказывает влияние на работу систем и органов растения, становясь причиной угнетения роста, снижения тургора листьев и водного обмена (Shumilina et al., 2018). Эти последствия изменения климата влияют на сельское хозяйство, в том числе на виноградарство, становясь одной из важнейших проблем. Происходят морфологические и физиолого-биохимические изменения, ингибируются метаболические процессы, что отрицательно влияет на продуктивность и качество винограда. Засуха является одним из наиболее значимых факторов, влияющих на продуктивность растений и, вероятно, приводящих к наибольшим потерям (Seleiman et al., 2023).

В настоящее время высокие температуры смещают фазы созревания у винограда, влияя на его состав. В работе Л. Ю. Новиковой и Л. Г. Наумовой (Novikova, Naumova, 2020) показана климатически обусловленная тенденция дегустационных оценок свежих ягод и вина.

Решение проблемы за счет увеличения орошения не всегда возможно, поэтому актуальным становится определение и выведение сортов сельскохозяйственных культур, устойчивых к засухе (Gambetta et al., 2020). Выбор устойчивых сортов винограда является ценным ресурсом для реализации этих стратегий. Представители рода *Vitis* L., как и другие растения, разработали стратегии поддержания гомеостаза и преодоления стресса. Эти механизмы включают физиологическую адаптацию. Одним из основных направлений селекционных программ является отбор растений на высокую урожайность и устойчивость к стрессам. Актуальным вопросом остается поиск генетических источников для селекционной работы, скрининг и внедрение перспективных сортов.

Возрастает значение комплексного подхода, основанного на синтезе различных методов. В предлагаемой работе проведена оценка устойчивости растений винограда к стрессу, вызванному засухой, с использованием методов физиологии и биотехнологии растений. Экспресс-диагностика с определением дифференцирующих концентраций веществ или температур, создающих условия стресса (солей, осмотиков, тяжелых металлов), и последующей оценкой устойчивости остается актуальной для сортов культурных растений, селекционных форм и диких видов (Becker, 2015).

Осмотический стресс при засухе вызывает изменения в водном режиме растений, приводит к их обезвоживанию. В связи с этим интерес представляют изменения водных потенциалов растений, вызванные стрессом. Водный потенциал является общепринятым параметром, используемым для оценки содержания воды в тканях растений. При дефиците воды водный потенциал листьев снижается, поэтому этот параметр используется в качестве показателя устойчивости растений к дегидратации тканей (Shumilina et al., 2018). Об изменении водного дефицита у растений винограда предлагается судить по изменениям водных потенциалов (Nilov, 2007; Gambetta et al., 2020; Stamatidi, Ryff, 2022; Nilov et al., 2024).

В ряде исследований для диагностики стрессоустойчивости растений используется метод культуры *in vitro*, позволяющий контролировать действие факторов внеш-

ней среды (Nosov, 1999). Наблюдалась прямая корреляция устойчивости к стрессам у растений *in vivo* и изолированных культур *in vitro* (Balnokin, 2012). Имитация условий засухи в среде создается путем введения полиэтиленгликоля (ПЭГ), который не оказывал токсического воздействия и не поглощался растениями. Стресс от засухи, вызванный ПЭГ, подавлял рост и развитие различных растений в условиях *in vitro* (Bigdeloo et al., 2018).

Устойчивость к стрессорам у растений складывается в процессе эволюции как интегральный результат взаимодействия всех его органов и структур, различающихся пороговой реакцией на воздействия (Shmalgauzen, 1982). Модельная система по действию стресса на растения *in vitro* наиболее близка по организации к целому растению, у которого функционируют клеточные и организменные механизмы устойчивости (Stamatidi, Ryff, 2017; Levchenko et al., 2021; Atak, 2022).

В представленной работе растения сортов винограда культивируются *in vivo* и *in vitro* в стрессовых условиях, являясь моделями происходящих при стрессе процессов.

Цель данной работы – оценка устойчивости к условиям засухи местных сортов винограда. Новизна состоит в поиске закономерностей в изменении ростовых параметров, водных потенциалов и урожая при действии засухи *in vivo* и *in vitro*.

Материалы и методы

Исследования проведены на Южном берегу Крыма в период 2023–2024 гг.

Объекты исследований: местный сорт 'Кок Пандас', сорта 'Янтарный Магарача' ('Кок Пандас' × 'Спартанец'), 'Кефесия Магарача' ('Кефесия' × 'Ифигения'), 'Крымская Весна' ('Сары Пандас' × 'Цитронный Магарача') и селекционная форма 'Кок Пандас' × 'Зейбель 6357 М. № 8-08-8-4'. Сорта и селекционная форма – гибриды местных сортов винограда и сортов селекции института «Магарач».

В вегетационном опыте эксперименты проводили по двум вариантам орошения: 100% от МЭТ (максимальная эвапотранспирация) – контроль и 60% от МЭТ – засуха (опыт). Исследуемые растения выращивались в вегетационных сосудах объемом 35 л, субстратом являлся диоритовый щебень в смеси с черноземом в соотношении 1 : 1. Полив растений осуществляли питательным раствором (Drboglav et al., 1973).

Водный режим растений в условиях *in vivo* изучали по методу P. F. Scholander с соавторами (Scholander et al., 1965). Площадь листовой поверхности растений определяли амперометрическим методом по Мельник-Щегловской (Bondarev, Zakharova, 1978). Длину побегов определяли прямым измерением всех побегов. Учет урожая производили взвешиванием всех гроздей на кусте (Amirdzhanov, Suleymanov, 1986). Определение параметров качества сока ягод осуществляли в соответствии с методами биохимического контроля в виноделии (Gerzhikova, 2009).

Экспланты культивировали в условиях *in vitro* на модифицированной питательной среде Мурасиге – Скуга. Микроклональное размножение осуществлялось в ламинарном боксе БП4-00. pH среды доводили до 5,6–5,7 (pH-метр Hanna HI98128). Культивирование *in vitro* происходило при освещении 2000 люкс с фотопериодом 16 часов в сутки и температуре +25°C.

Для стимуляции побегообразования *in vitro* в среду вводили 6-бензиламинопури́н (БАП) в концентрации 0,4 мг/л. В следующем пассаже для укоренения образо-

вавшихся эксплантов в агаризованную среду добавляли α -нафтилуксусную кислоту (НУК) с концентрацией 0,05 мг/л. Полученные экспланты размножали микроочисткой. После культивирования в течение 5 недель побеги подвергали действию искусственно созданного стресса путем введения осмотика. В контрольных условиях культивирование эксплантов проводили на агаризованной питательной среде без стрессора.

Среда для диагностики реакции на стресс сортов винограда *in vitro* была смоделирована ранее (Ryff, Nilov, 2006). Условия стресса создавали введением в среду осмотика полиэтиленгликоля (ПЭГ-8000) в концентрации 2%. Аналогичные данные по концентрации ПЭГ (2%) были приведены в исследовании по определению устойчивости к засухе винограда *in vitro* (Shirazi et al., 2020; Alebidi et al., 2024). По завершении периода воздействия стрессора побеги извлекали из питательной среды, после чего проводили измерения параметров роста. Контрольный и опытный варианты включали по 10 растений *in vivo* и 10 эксплантов *in vitro* каждого из исследуемых сортов. Данные были подвергнуты дисперсионному анализу (ANOVA). Однофакторный дисперсионный анализ проводился по фактору сорта.

Результаты и обсуждение

В период проведения исследований учитывались климатические условия 2023–2024 гг. на Южном берегу Крыма (рис. 1).

Наблюдалось значительное превышение среднемесячных температур воздуха по сравнению со средними многолетними значениями.

В 2023 г. в июне, июле, августе и сентябре превышение по месяцам соответственно составило: 1,6; 1,1; 2,9; 4,2°C. Незначительное превышение было в апреле – на

0,2°C. В 2024 г. в апреле, мае, июне, июле, августе и сентябре превышение по месяцам было более значительным и соответственно составило: 4,3; 0,6; 4,0; 4,6; 2,1; 4,7°C. Ранее не наблюдалось значительного превышения среднемесячной температуры в апреле.

Количество выпавших осадков за вегетационный период 2023 г. несколько превышало среднюю многолетнюю величину (206,4 мм) и составило 219,6 мм. Количество осадков в 2024 г. за период с апреля по сентябрь составило 115,0 мм, что на 47,6% меньше средней многолетней величины.

Следует отметить неравномерность выпадения осадков в вегетационные периоды в годы проведения исследований. В 2023 г. хозяйственно полезных осадков не наблюдалось ни в августе, ни в сентябре – соответственно: 5,5 и 2,1 мм, а в 2024 г. в июле и августе выпало 13,6 и 4,1 мм. Такие погодные условия не могли не отразиться на водном статусе растений.

Анализ значений водного потенциала листьев за два года исследований показал (табл. 1), что в период до цветения и во время цветения винограда опытные растения не испытывали водный стресс как в предрассветные, так и в послеполуденные часы.

Предрассветные значения водного потенциала листьев находились в пределах от –0,12 до –0,25 МПа, а послеполуденные – от –0,85 до –1,05 МПа. В период роста ягод в контрольном варианте у растений сортов 'Кок Пандас', 'Кефесия Магарача', 'Янтарный Магарача' и 'Крымская Весна' предрассветные значения водного потенциала листьев снижались в пределах от –0,28 до –0,32 МПа, а послеполуденные – от –1,2 до –1,28 МПа. Таким образом, растения испытывали легкий водный стресс. И только у селекционной формы ('Кок Пандас' × 'Зейбель 6357 М. № 8-08-8-4') снижение водного потенциала листьев было несколько значительней: –0,35 МПа

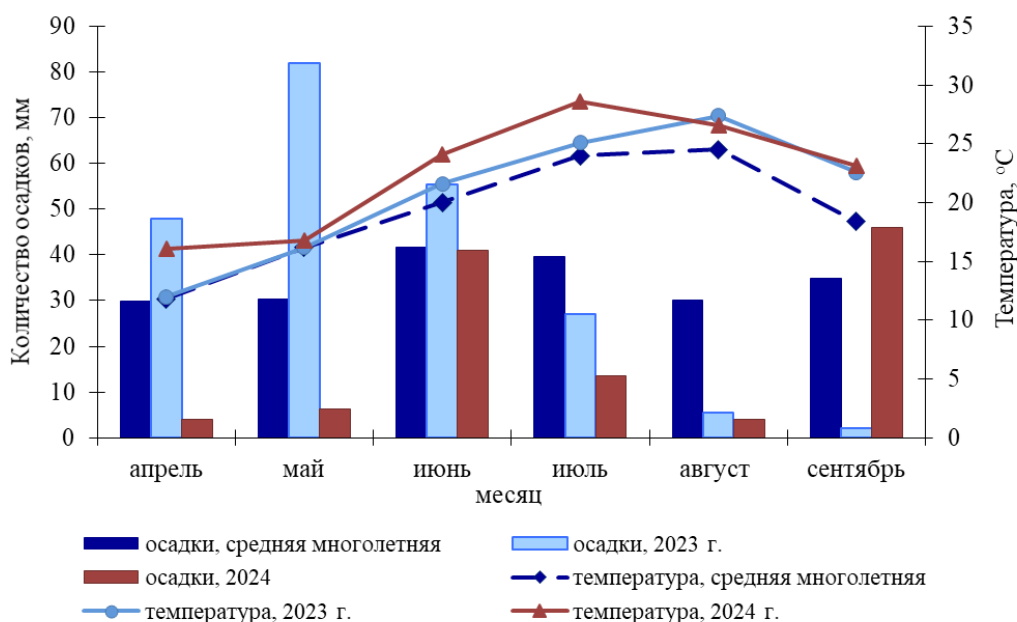


Рис. 1. Климатограмма Южного берега Крыма, 2023–2024 гг.

Fig. 1. Climate graph for the Southern Coast of Crimea, 2023–2024

Таблица 1. Средние значения водных потенциалов листьев (МПа) исследуемых сортов винограда *in vivo*, 2023–2024 гг.
Table 1. Mean values of leaf water potential (MPa) in the studied grapevine genotypes *in vivo*, 2023–2024

Варианты опыта		Вегетационные периоды							
		цветение		рост ягод		начало созревания ягод		созревание ягод	
		5 ⁰⁰	13 ³⁰	5 ⁰⁰	13 ³⁰	5 ⁰⁰	13 ³⁰	5 ⁰⁰	13 ³⁰
‘Крымская Весна’									
Контроль		-0,22 ± 0,01	-0,9 ± 0,01	-0,32 ± 0,01	-1,25 ± 0,02	-0,35 ± 0,01	-1,3 ± 0,02	-0,37 ± 0,02	-1,38 ± 0,01
Засуха		-0,23 ± 0,02	-0,92 ± 0,02	-0,38 ± 0,02	-1,32 ± 0,02	-0,45 ± 0,01	-1,42 ± 0,02	-0,55 ± 0,02	-1,48 ± 0,01
Селекционная форма									
Контроль		-0,23 ± 0,01	-0,92 ± 0,07	-0,35 ± 0,02	-1,35 ± 0,02	-0,42 ± 0,02	-1,38 ± 0,02	-0,4 ± 0,02	-1,45 ± 0,02
Засуха		-0,25 ± 0,01	-0,93 ± 0,02	-0,45 ± 0,02	-1,38 ± 0,03	-0,55 ± 0,02	-1,5 ± 0,03	-0,62 ± 0,02	-1,55 ± 0,02
‘Кефесия Магарача’									
Контроль		-0,21 ± 0,01	-0,85 ± 0,02	-0,32 ± 0,02	-1,28 ± 0,02	-0,35 ± 0,02	-1,32 ± 0,01	-0,37 ± 0,02	-1,3 ± 0,02
Засуха		-0,22 ± 0,01	-0,9 ± 0,02	-0,4 ± 0,02	-1,38 ± 0,02	-0,45 ± 0,02	-1,4 ± 0,02	-0,5 ± 0,02	-1,35 ± 0,02
‘Янтарный Магарача’									
Контроль		-0,22 ± 0,01	-0,85 ± 0,02	-0,32 ± 0,02	-1,2 ± 0,02	-0,35 ± 0,01	-1,3 ± 0,02	-0,38 ± 0,02	-1,4 ± 0,02
Засуха		-0,23 ± 0,02	-0,9 ± 0,02	-0,35 ± 0,02	-1,3 ± 0,03	-0,42 ± 0,01	-1,38 ± 0,02	-0,42 ± 0,02	-1,4 ± 0,02
‘Кок Пандас’									
Контроль		-0,12 ± 0,01	-0,95 ± 0,01	-0,28 ± 0,01	-1,23 ± 0,02	-0,32 ± 0,02	-1,3 ± 0,02	-0,38 ± 0,02	-1,35 ± 0,02
Засуха		-0,18 ± 0,01	-1,05 ± 0,02	-0,32 ± 0,02	-1,35 ± 0,02	-0,38 ± 0,02	-1,4 ± 0,02	-0,42 ± 0,02	-1,42 ± 0,01
сбор урожая									
		5 ⁰⁰	13 ³⁰			5 ⁰⁰	13 ³⁰	5 ⁰⁰	13 ³⁰

в предрассветные и –1,35 МПа в послеполуденные часы. У этих растений наблюдался стресс средней глубины.

В опытном варианте все растения испытывали стресс средней глубины. Значения предрассветного водного потенциала листьев находились в пределах от –0,32 до –0,45 МПа, а послеполуденные – от –1,3 до –1,38 МПа. В период от начала созревания до сбора урожая, по мере усугубления жары и длительности засухи, у растений наблюдалось дальнейшее снижение значений водного потенциала листьев, особенно в варианте с засухой. У растений сорта 'Крымская Весна' и селекционной формы предрассветные значения водного потенциала листьев соответственно снижались до –0,55...–0,62 МПа, а послеполуденные – до –1,48...–1,55 МПа. Эти растения испытывали сильный водный стресс, что говорит об их меньшей устойчивости к совместному действию жары и засухи. Средние значения предрассветного и послеполуденного водного потенциала листьев за данный период соответственно составили: –0,5 и –1,5 ('Крымская Весна'); –0,6 и –1,5 (селекционная форма); –0,5 и –1,4 ('Кефесия Магарача'); –0,4 и –1,4 ('Янтарный Магарача' и 'Кок Пандас'). Полученные данные указывают на то, что сорта винограда 'Кок Пандас' и 'Янтарный Магарача' имеют лучшую способность регулировать свой водный баланс, что характеризует их как более устойчивые к обезвоживанию. Несколько меньшая способность к регуляции была у сорта 'Кефесия Магарача', а селекционную форму можно характеризовать как наименее устойчивую к засухе.

Г. А. Gambetta с соавторами отмечают параметры, которые наиболее точно характеризуют засухоустойчивость винограда: более низкая транспирация, более жесткий контроль за закрытием устьиц, более высокая устойчивость к эмболии и более низкие показатели минимальной потери воды (Gambetta et al., 2024).

Нами были изучены показатели водоудерживающей способности исследуемых сортов винограда по величине водоотдачи листьев. Потерю влаги листьями определяли по значениям изменения их веса при обезвоживании и одновременно фиксировали соответствующие им водные потенциалы (табл. 2).

При этом большей водоотдаче листьев соответствовала меньшая водоудерживающая способность и наоборот. Снижение водных потенциалов листьев происходило быстрее у тех генотипов, у которых при обезвоживании процент водоотдачи был выше: соответственно 4,3 и 3,9% у селекционной формы и 'Крымской Весны'. Несколько ниже процент водоотдачи был у сорта 'Кефесия Магарача' – 3,2%. Низкие значения водоотдачи отмечены у сортов 'Кок Пандас' (1,8%) и 'Янтарный Магарача' (2,3%), что характеризует их водный статус как более стабильный и позволяет этим сортам быть более устойчивыми к условиям обезвоживания и высоким температурам. Полученные данные по величине водоудерживающей способности подтверждают показатели водных потенциалов листьев, которые использовались для характеристики водного режима исследуемых сортов винограда во время стресса.

Устойчивость исследуемых сортов к жаре и засухе в условиях вегетационного опыта *in vivo* и в условиях *in vitro* рассматривалась путем сравнения агробиологических показателей, таких как длина побега и площадь листьев. О том, что факторы роста могут служить критериями отбора для обеспечения устойчивости к засухе, указано в исследовании (Asfere et al., 2020).

Высокие значения показателей длины побегов (рис. 2) определены у сортов 'Кок Пандас' (242,4 см), 'Янтарный Магарача' (228,0 см), 'Кефесия Магарача' (232,8 см), 'Крымская Весна' (239,7 см), а у селекционной формы они были ниже – 188,2 см.

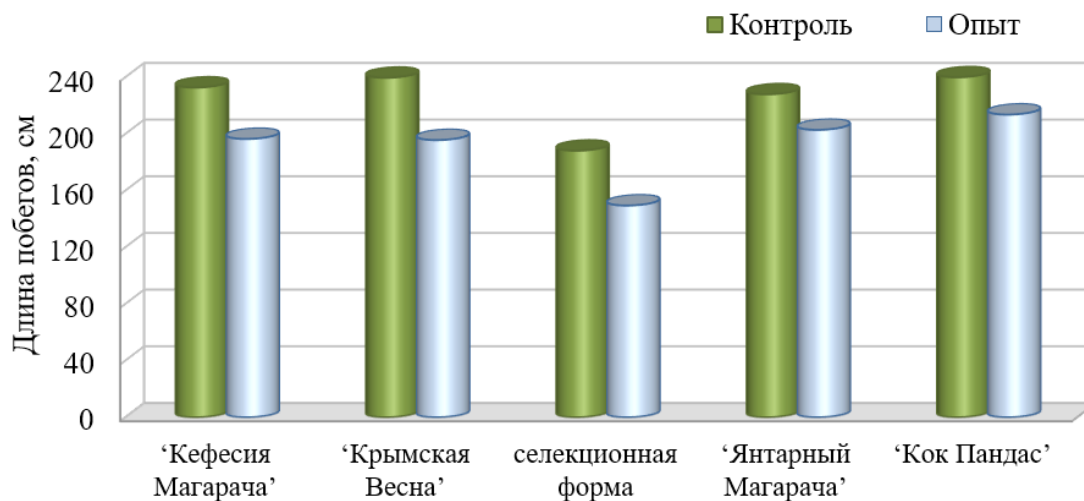
Процент снижения длины побегов в варианте с засухой при сравнении с контролем *in vivo* составил 11,8 ('Кок Пандас'), 11,0 ('Янтарный Магарача'), 15,6 ('Кефесия Магарача'), 18,4 ('Крымская Весна') и 20,6% (селекционная форма) (табл. 3).

Развитая листовая поверхность установлена у сортов 'Кок Пандас', 'Янтарный Магарача' и 'Кефесия Магарача' (рис. 3) со следующими показателями значений площади листьев соответственно: 13323, 13752 и 12126 см². Эти показатели были ниже у сорта 'Крымская Весна' и селекционной формы и соответственно составили 11813 и 11528 см².

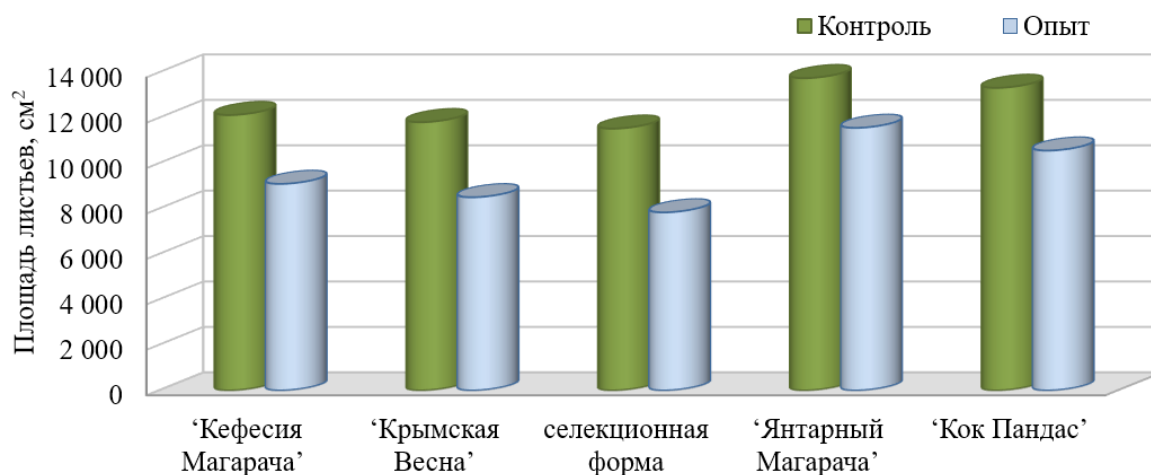
Таблица 2. Средние значения водного потенциала (МПа) и водоотдачи (г, %) листьев исследуемых сортов винограда при обезвоживании *in vivo*, 2023–2024 гг.

Table 2. Mean values of leaf water potential (MPa) and water loss (g, %) in the studied grapevine genotypes during dehydration *in vivo*, 2023–2024

Сорт винограда	Параметр	Время, t (мин)				Потери веса	
		0	30	60	90	г	%
'Кок Пандас'	вес, г	5,6	5,56	5,54	5,5	0,1	1,8
	У	–0,1	–0,52	–0,73	–0,95		
'Янтарный Магарача'	вес, г	4,8	4,76	4,72	4,69	0,12	2,3
	У	–0,1	–0,8	–1,0	–1,12		
'Кефесия Магарача'	вес, г	4,49	4,4	4,38	4,35	0,14	3,2
	У	–0,1	–0,95	–1,2	–1,35		
'Крымская Весна'	вес, г	3,82	3,75	3,72	3,67	0,15	3,9
	У	–0,1	–0,95	–1,2	–1,4		
Селекционная форма	вес, г	3,68	3,61	3,56	3,52	0,16	4,3
	У	–0,1	–1,0	–1,2	–1,45		

Рис. 2. Снижение длины побегов *in vivo*, 2023–2024 гг.Fig. 2. Shoot length decrease *in vivo*, 2023–2024Таблица 3. Снижение длины побегов винограда (см) *in vivo* при стрессеTable 3. Shoot length decrease (cm) in grapevines under stress *in vivo*

Параметры	Сорта и селекционная форма винограда				
	'Кок Пандас'	'Кефесия Магарача'	'Янтарный Магарача'	'Крымская Весна'	Селекционная форма
Контроль	242,4 ± 5,64	232,8 ± 5,40	228,0 ± 6,33	239,7 ± 5,51	188,2 ± 4,16
Опыт	213,7 ± 2,88	196,5 ± 4,58	202,9 ± 5,32	196,2 ± 3,19	149,5 ± 5,01
% к контролю	88,2	84,4	89,0	81,6	79,4
Снижение к контролю, %	11,8	15,6	11,0	18,4	20,6

Рис. 3. Снижение площади листьев винограда *in vivo*, 2023–2024 гг.Fig. 3. Grapevine leaf area decrease *in vivo*, 2023–2024

Самый низкий процент снижения площади листьев в опыте *in vivo* в варианте с засухой при сравнении с контролем был определен у сортов 'Янтарный Магарача' и 'Кок Пандас': 17,2 и 20,7% соответственно. У сортов 'Кефесия Магарача' и 'Крымская Весна' этот показатель со-

ставлял 25,0 и 28,0% соответственно. Самый высокий процент снижения площади листьев был у селекционной формы – 32,3% (табл. 4).

В результате сравнительного анализа значений длины побегов, площади листьев и процента снижения этих

Таблица 4. Снижение площади листьев (см²) *in vivo* при стрессе
Table 4. Leaf area decrease (cm²) in grapevines under stress *in vivo*

Параметры	Селекционные сорта и форма винограда				
	‘Кок Пандас’	‘Кефесия Магарача’	‘Янтарный Магарача’	‘Крымская Весна’	Селекционная форма
Контроль	13323	12126	13752	11813	11528
Опыт	10562	9095	11398	8506	7840
% к контролю	79,3	75,0	82,8	72,0	67,3
Снижение к контролю, %	20,7	25,0	17,2	28,0	32,3

показателей от контроля были выделены более устойчивые к жаре и засухе следующие сорта винограда: ‘Кок Пандас’, ‘Янтарный Магарача’, ‘Кефесия Магарача’.

Рост винограда наиболее тесно связан с устойчивостью растений к стрессорам. Ростовая реакция растений является интегральным показателем изменения их метаболизма. Данный показатель проявляет обратную зависимость от степени засухи, действия температур у всех сосудистых растений (Genkel, 1982).

В условиях культуры *in vitro*, так же как *in vivo*, наблюдалось снижение ростовых процессов (рис. 4).

Обработка ПЭГ привела к снижению длины побегов, что было связано с подавлением потребления воды под

влиянием ПЭГ. Как видно из таблицы 5, при водном дефиците наименьшее снижение длины побега наблюдалось у местного сорта ‘Кок Пандас’ (–25%). У селекционных сортов снижение длины побегов составляло –21% (‘Янтарный Магарача’) и –26% (‘Кефесия Магарача’). У сорта ‘Крымская Весна’ и селекционной формы снижение длины побегов составляло –33 % и –39% соответственно. Таким образом, при 2% ПЭГ длина побега эксплантов значительно уменьшилась у сорта ‘Крымская Весна’ и селекционной формы по сравнению с контролем.

При искусственной засухе определены различия в снижении площади листьев *in vitro* (рис. 5).

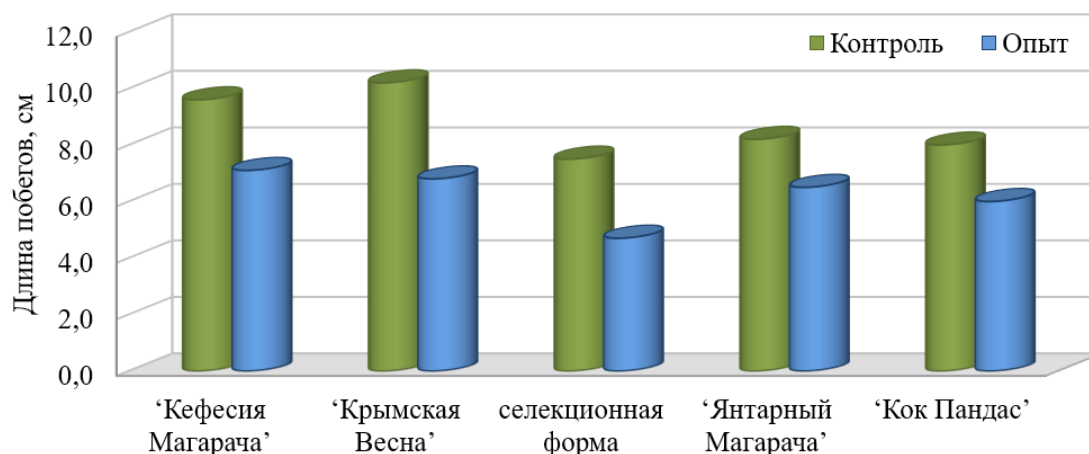


Рис. 4. Снижение длины побегов в *in vitro*, 2023–2024 гг.

Fig. 4. *In vitro* shoot length decrease in the experimental variant compared to the control, 2023–2024

Таблица 5. Снижение длины побегов (см) в культуре *in vitro* при стрессе
Table 5. Shoot length decrease (cm) in grapevines under stress *in vitro*

Параметры	Сорта и селекционная форма винограда				
	‘Кок Пандас’	‘Кефесия Магарача’	‘Янтарный Магарача’	‘Крымская Весна’	Селекционная форма
Контроль	8,0 ± 0,13	9,6 ± 0,13	8,2 ± 0,07	10,2 ± 0,3	7,5 ± 0,12
Опыт	6,0 ± 0,16	7,1 ± 0,18	6,5 ± 0,21	6,8 ± 0,22	4,7 ± 0,06
% к контролю	75	74	79	67	61
Снижение к контролю, %	25	26	21	33	39

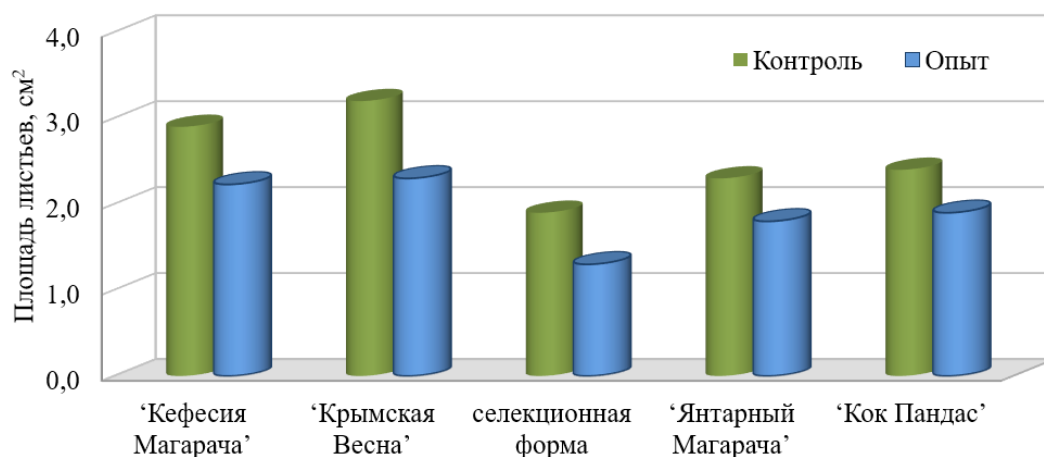


Рис. 5. Снижение площади листьев в опытном варианте по сравнению с контролем *in vitro*, 2023–2024 гг.

Fig. 5. *In vitro* leaf area decrease in the experimental variant compared to the control, 2023–2024

Из данных таблицы 6 очевидно, что наименьшее снижение площади листьев при стрессе происходит у местного сорта винограда 'Кок Пандас' (–20,7%). Близкие значения снижения площади листьев наблюдаются у сортов 'Янтарный Магарача' (–22%) и 'Кефесия Магарача' (–23%). За ними следует сорт 'Крымская Весна', площадь которого падает на 28%, и последнее место занимает селекционная форма – снижение площади на 32%.

площади листьев растений в свою очередь приводит к снижению результатов фотосинтеза.

В условиях засухи отмечена тенденция к снижению роста побегов и листьев растений как *in vivo*, так и *in vitro*. Определено, что изучаемые генотипы отличались по реакции сортов на абиотический стресс. Из рисунков 2–5 видно, что у растений наблюдаются сортовые различия на стресс, вызванный засухой. Опытные данные по устойчивости сортов винограда к засухе, полученные метода-

Таблица 6. Снижение площади листьев (см²) в культуре *in vitro* при стрессе

Table 6. Leaf area decrease (cm²) in grapevines under stress *in vitro*

Параметры	Сорта и селекционная форма винограда				
	'Кок Пандас'	'Кефесия Магарача'	'Янтарный Магарача'	'Крымская Весна'	Селекционная форма
Контроль	2,4 ± 0,42	2,9 ± 0,59	2,3 ± 0,35	3,2 ± 0,90	1,9 ± 0,27
Опыт	1,65 ± 0,04	2,26 ± 0,12	1,8 ± 0,12	2,3 ± 0,21	1,3 ± 0,19
% к контролю	79	77	78	72	68
Снижение к контролю, %	21	23	22	28	32

Проведенные эксперименты показали снижение ростовых характеристик в условиях осмотического стресса *in vitro*. Это снижение проявлялось в уменьшении длины побегов и площади зеленых листьев на побеге. Реакция растений при обработке ПЭГ варьировала в зависимости от сорта. Аналогичные данные получены на иных сортах винограда *in vitro* и приведены в исследовании (Torcu Altinci, Cangi, 2019).

Снижение роста листьев и побегов является одним из признаков дефицита воды в виноградной лозе (Vuerich et al., 2021). В условиях стресса, вызванного засухой, дефицит воды может препятствовать росту клеток растяжением, прерывая поступление воды из ксилемы в формирующиеся клетки. Вызванное засухой сокращение

ми *in vivo* и *in vitro*, подтверждают друг друга и позволяют выявить различия в реакции сортов, то есть сортовую специфику устойчивости к засухе.

С агрономической точки зрения засухоустойчивость не только должна включать в себя способность справляться со стрессовым фактором, но и поддерживать продуктивность, то есть достижение стабильного урожая хорошего качества в перспективе (Gambetta et al., 2020).

Учет продуктивности (кг/куст) был проведен в 2023 и 2024 г. (табл. 7).

Сравнивая полученные данные, установили, что у сортов 'Кок Пандас', 'Янтарный Магарача' и 'Кефесия Магарача' был более низкий процент снижения продуктивности в условиях засухи по сравнению с контролем

Таблица 7. Продуктивность (кг/куст) исследуемых сортов винограда, *in vivo*, 2023–2024 гг.

Table 7. Productivity (kg/bush) of the studied grapevine genotypes *in vivo*, 2023–2024

Сорт винограда	Варианты опыта		Снижение по сравнению с контролем, %
	контроль	опыт	
‘Кок Пандас’	1,185 ± 0,105	0,945 ± 0,086	20,3
‘Крымская Весна’	1,075 ± 0,077	0,724 ± 0,088	32,7
‘Кефесия Магарача’	1,154 ± 0,065	0,860 ± 0,071	25,5
‘Янтарный Магарача’	1,175 ± 0,029	0,915 ± 0,101	22,1
Селекционная форма	0,876 ± 0,063	0,580 ± 0,050	33,8

и соответственно составил: 20,3; 22,1; 25,5%. У сорта ‘Крымская Весна’ и селекционной формы процент снижения урожая по сравнению с контролем был более существенным (32,7 и 33,8%).

Анализируя параметры качества сока ягод (табл. 8), отмечено, что у сортов ‘Кок Пандас’, ‘Янтарный Магарача’ и ‘Кефесия Магарача’ в опытном варианте наблюдалось более интенсивное накопление массовой концентрации сахаров (г/100 см³) и общих фенольных веществ (мг/л): 23,0 и 449; 22,5 и 358; 23,0 и 703 соответственно по сравнению с сортом ‘Крымская Весна’ и селекционной формой (19,2 и 207; 21,5 и 150 соответственно). Снижение массовой концентрации титруемых кислот в большей степени было у сорта ‘Кок Пандас’ и селекционной формы. Таким образом, у сортов ‘Кок Пандас’, ‘Янтарный Магарача’ и ‘Кефесия Магарача’ наблюдалось более интенсивное накопление сахаров и общих фенольных веществ наряду с более высокой продуктивностью по сравнению с сортом ‘Крымская Весна’ и селекционной формой.

Фенольные соединения выполняют многие биологические функции, защищая листья и плоды от фотоокислительного повреждения УФ-излучением, действуя как поглотители свободных радикалов, снижая влияние биотических и абиотических стрессов на растение (Teixeira et al., 2013; Oguz et al., 2022) и способствуя адаптации растений к засухе.

Таким образом, сорта ‘Кок Пандас’, ‘Янтарный Магарача’ и ‘Кефесия Магарача’, накапливая большее количество фенольных веществ, могут в большей степени противостоять абиотическим стрессам: жаре и засухе.

Между продуктивностью исследуемых сортов выявлены достоверные различия, установлено влияние фактора сорта. Достоверные различия выявлены также между водными потенциалами листьев, при этом также установлено влияние фактора сорта. Наблюдается отрицательная корреляция между значениями продуктивности и водными потенциалами листьев исследуемых сортов: чем больше снижался водный потенциал листьев, тем меньше была продуктивность (рис. 6, 7). Такие же отрицательные корреляции между водным потенциалом листьев и урожайностью у разных сортов винограда были отмечены в работе Г. А. Гамбетта с соавторами (Gambetta et al., 2020).

Полученные данные позволяют составить убывающий ранжированный ряд среди исследуемых сортов: ‘Кок Пандас’ > ‘Янтарный Магарача’ > ‘Кефесия Магарача’ > ‘Крымская Весна’ > селекционная форма. Лучшие характеристики при стрессе обнаружены у местного сорта винограда ‘Кок Пандас’ и новых сортов селекции института «Магарач» ‘Янтарный Магарача’ и ‘Кефесия Магарача’.

Таблица 8. Качество сока ягод исследуемых сортов винограда, вегетационный опыт, 2023–2024 гг.

Table 8. Berry juice quality of the studied grapevines (potted plants), 2023–2024

Сорт винограда	Параметры качества					
	массовая концентрация				общие фенольные вещества, мг/л	
	сахаров, г/100 см³		титруемых кислот, г/дм³			
	контроль	опыт	контроль	опыт	контроль	опыт
‘Кок Пандас’	20,0	23,0	6,8	5,9	335	449
‘Крымская Весна’	18,0	19,2	8,2	7,5	207	287
‘Кефесия Магарача’	19,5	23,0	8,9	7,8	590	703
‘Янтарный Магарача’	20,0	22,5	8,5	7,9	250	358
Селекционная форма	20,0	21,50	8,7	7,4	150	190

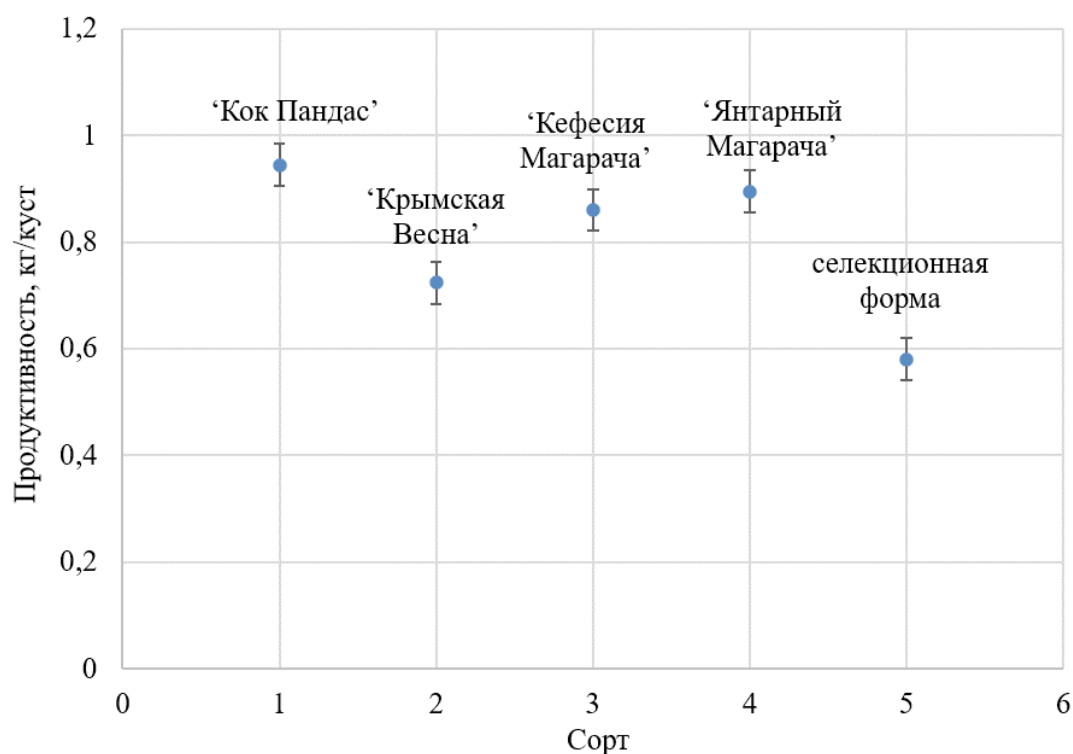


Рис. 6. Влияние фактора сорта винограда на продуктивность

Fig. 6. The effect of the grapevine cultivar factor on productivity

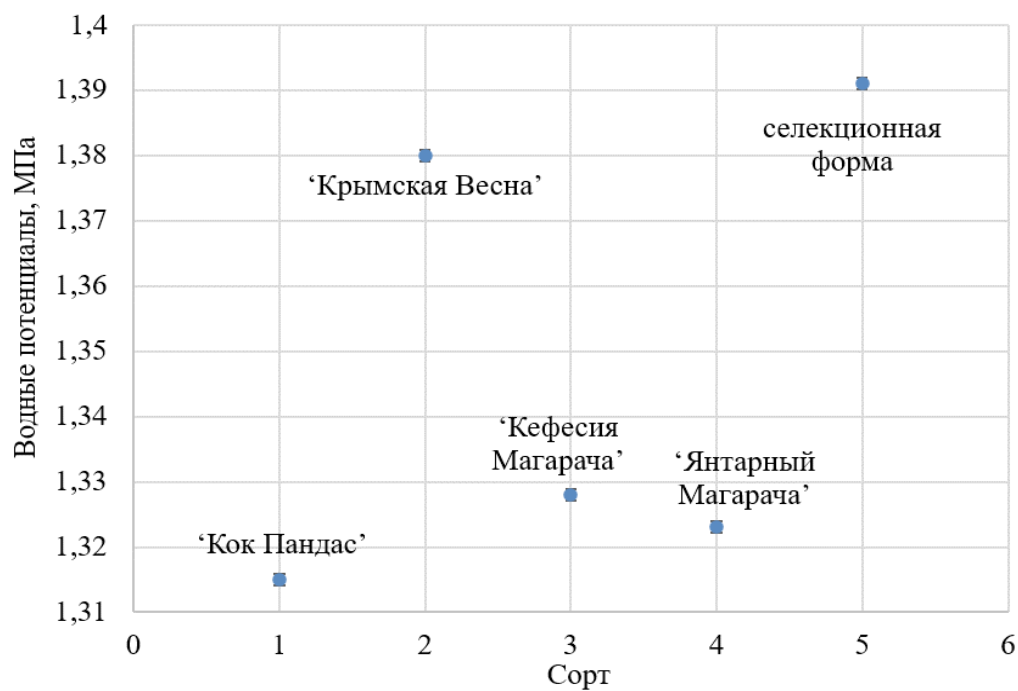


Рис. 7. Влияние фактора сорта винограда на водные потенциалы

Fig. 7. The effect of the grapevine genotype factor on water potentials

Заключение

Проведенные эксперименты позволяют провести диагностику изучаемых сортов винограда и выявить их устойчивость к засухе. В опытах *in vivo* и *in vitro* проявились сортоспецифичные реакции, таким образом определена сортовая дифференциация.

На основе представленных результатов показано, что засуха способствовала снижению ростовых процессов у всех сортов и селекционной формы. В более высокой степени процесс был выражен у селекционной формы 'Кок Пандас' × 'Зейбель 6357 М. № 8-08-8-4' и сорта 'Крымская Весна'. Из изменений в показателях роста и водных потенциалов следует, что сорта винограда 'Кок Пандас', 'Янтарный Магарача' и 'Кефесия Магарача' проявили лучшие способности противостоять обезвоживанию. Таким образом, характеристики роста эксплантов винограда и изменения водных потенциалов зависели от происхождения сорта.

Сопоставление результатов оценки устойчивости растений *in vivo* и *in vitro* выявило аналогичные реакции в изменении ростовых параметров сортов.

Для объективности оценки устойчивости сортов винограда к засухе рекомендуется использование комплексного подхода, сочетающего вегетационный и биотехнологический методы исследования. Предлагаемый для внедрения подход в условиях *in vivo* и *in vitro* является перспективным и может быть использован в качестве альтернативы традиционным методам отбора стрессоустойчивых растений благодаря повышению надежности скрининга.

Устойчивые к засухе генотипы являются важным средством борьбы со стрессовыми факторами. При разработке селекционных программ необходимо изначально определять статус толерантности имеющихся сортов к условиям стрессовых факторов.

В условиях засухи сорта 'Кок Пандас', 'Янтарный Магарача' и 'Кефесия Магарача' продемонстрировали лучшую продуктивность, поддерживая ростовые параметры (длина побегов, площадь листьев), по сравнению с селекционной формой 'Кок Пандас' × 'Зейбель 6357 М. № 8-08-8-4' и сортом 'Крымская Весна'.

Следует отметить, что сорта 'Кок Пандас', 'Янтарный Магарача' и 'Кефесия Магарача' могут быть использованы при скрещивании сортов с целью получения засухоустойчивых форм винограда. Данные сорта рекомендуются для использования в селекционном процессе.

Исследование расширяет знания о физиологии водного стресса, способствует развитию селекции сортов винограда, устойчивых к засухе.

References / Литература

Alebbidi A.I., Al-Saif A.M., Abdel Aziz H.F., Abdrabbah G.A., Elnagar I.A., Abd El-wahed N. et al. *In vitro* drought tolerance of some grape rootstocks. *Journal of Ecological Engineering*. 2024;25(4):184-202. DOI: 10.12911/22998993/184183

Amirdzhanov A.G., Suleymanov D.S. Assessment of the productivity of grape cultivars and vineyards (Otsenka produktivnosti sortov vinograda i vinogradnikov). Baku: Academy of Sciences of Azerbaijan SSR; 1986. [in Russian] (Амирджанов А.Г., Сулейманов Д.С. Оценка продуктивности сортов винограда и виноградников. Баку: АН Азербайджанской ССР; 1986).

Asfere Y., Zenabu D., Kassahu E., Adam A., Kebede A., Gasha A. et al. *In vitro* screening of selected accessions of wheat

(*Triticum aestivum* L.) variety for drought tolerance in Ethiopia. *Journal of Plant Sciences*. 2020;8(5):123-133. DOI: 10.11648/j.jps.20200805.14

Atak A. New perspectives in grapevine (*Vitis* spp.) breeding. In: *Plant Breeding – New Perspectives*. London: IntechOpen; 2022. p.1-35. DOI: 10.5772/intechopen.105194

Balnokin Yu.V. Timiryazev readings. Issue LXX. Ionic homeostasis and salt tolerance of plants (Timiryazevskie chteniya. Vypusk LXX. Ionny gomeostaz i soleustoychivost rasteniy). Moscow: Nauka; 2012. [in Russian] (Балнокин Ю.В. Тимирязевские чтения. Выпуск LXX. Ионный гомеостаз и солеустойчивость растений. Москва: Наука; 2012).

Becker H. Plant breeding (Selektsiya rasteniy). Moscow: KMK; 2015. [in Russian] (Беккер Х. Селекция растений. Москва: КМК; 2015).

Bigdeloo V., Soleimani A., Abdollahi H., Bahari A. Comparative study of two pear cultivars to PEG-induced osmotic stress. *Journal of Plant Physiology and Breeding*. 2018;8(1):89-99. DOI: 10.22034/jppb.2018.9501

Bondarev V.P., Zakharova E.I. (eds). Agrotechnical research on the establishment of intensive vineyards on an industrial scale (Agrotekhnicheskiye issledovaniya po sozdaniyu intensivnykh vinogradnykh nasazhdeniy na promyshlennoy osnove). Voroshilovgrad; 1978. [in Russian] (Агротехнические исследования по созданию интенсивных виноградных насаждений на промышленной основе / под ред. В.П. Бондарева, Е.И. Захаровой. Ворошиловград; 1978).

Drboglav M.A., Arbuzova Z.M., Davydova M.V., Shcherbatyuk L.K. Composition of nutrient solution for grapes (Sostav pitatel'nogo rastvora dlya vinograda). In: *Effective Application of Fertilizers in Horticulture and Viticulture (Effektivnoye primeneniye udobreniy v sadovodstve i vinogradarstve)*. Chisinau; 1973. p.116-120. [in Russian] (Дрбоглав М.А., Арбузова З.М., Давыдова М.В., Щербатюк Л.К. Состав питательного раствора для винограда. В кн.: Эффективное применение удобрений в садоводстве и виноградарстве. Кишинев; 1973. С.116-120).

Gambetta G.A., Delmas C.E.L., Marguerit E., Ollat N., Cast C.S., Leeuwen C. et al. Drought tolerance in grapevine involves multiple interacting physiological mechanisms. *IVES Technical Reviews: Vine and Wine*. 2024;2024:8354. DOI: 10.20870/IVES-TR.2024.8354

Gambetta G.A., Herrera J.C., Dayer S., Feng Q., Hochberg U., Castellarin S.D. The physiology of drought stress in grapevine: towards an integrative definition of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*. 2020;71(16):4658-4676. DOI: 10.1093/jxb/eraa245

Genkel P.A. Physiology of heat and drought resistance of plants (Fiziologiya zharo- i zasukhoustoychivosti rasteniy). Moscow: Nauka; 1982. [in Russian] (Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. Москва: Наука; 1982).

Gerzhikova V.G. (ed.). Methods of technochemical control in winemaking (Metody tekhnokhimicheskogo kontrolya v vinodelii). Simferopol: Tavrida; 2009. [in Russian] (Методы технокимического контроля в виноделии / под ред. В.Г. Гержиковой. Симферополь: Таврида; 2009).

Levchenko S., Volynkin V., Likhovskoi V., Vasylyk I., Ostroukhova E., Vasylyk A. et al. The profile of the phenolic components of grape cultivars of a complex genetic structure. *Acta Horticulturae*. 2021;1307:391-398. DOI: 10.17660/ActaHortic.2021.1307.59

- Mohsen A.T., Stino R.G., Abd Allatif A.M., Zaid N.M. *In vitro* evaluation of some grapevine rootstocks grown under drought stress. *Plant Archives*. 2020;20 Suppl 1:1029-1034.
- Nilov N.G. Organization of a service for monitoring the water regime in vineyards (Organizatsiya sluzhby monitoringa vodnogo rezhima vinogradnikov). In: *Viticulture and Winemaking: Collection of Scientific Papers of the Magarach National Institute of Grape and Wine*. Vol. 37 (*Vinogradarstvo i vinodeliye: Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnogo instituta vinograda i vina "Magarach"*. T. 37). Yalta; 2007. p.46-52. [in Russian] (Нилов Н.Г. Организация службы мониторинга водного режима виноградников. В кн.: *Виноградарство и виноделие: Сборник научных трудов Национального института винограда и вина «Магарач»*. Т. 37. Ялта; 2007. С.46-52).
- Nilov N.G., Ryff I.I., Berezovskaya S.P., Stamatidi V.Yu., Popova M.S., Volynkin V.A., Likhovskoi V.V. Responses of grapevine genotypes to abiotic stress. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(2):69-81. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-2-69-81
- Nosov A.M. Cell culture of higher plants: a unique system, model, and tool (Kultura kletok vysshikh rasteniy – unikalnaya sistema, model, instrument). *Russian Journal of Plant Physiology*. 1999;46(6):837-844. [in Russian] (Носов А.М. Культура клеток высших растений – уникальная система, модель, инструмент. *Физиология растений*. 1999;46(6):837-844).
- Novikova L.Yu., Naumova L.G. Dependence of fresh grapes and wine taste scores on the origin of varieties and weather conditions of the harvest year in the northern zone of industrial viticulture in Russia. *Agronomy*. 2020;10(10):1613. DOI: 10.3390/agronomy10101613
- Oguz M.C., Aycan M., Oguz M.A.E., Poyraz I., Yildiz M. Drought stress tolerance in plants: Interplay of molecular, biochemical and physiological responses in important development stages. *Physiologia*. 2022;2(4):180-197. DOI: 10.3390/physiologia2040015
- Ryff I.I., Nilov N.G. Method for diagnosing grape resistance to abiotic environmental factors (Sposib diahnostryky stiykosti vynohradu do abiotychnykh faktoriv seredovyshcha). Ukraine; patent number: 172080; 2006. [in Ukrainian] (Рыфф И.И., Нилов Н.Г. Спосіб діагностики стійкості винограду до абіотичних факторів середовища. Україна; патент № 172080; 2006).
- Scholander P.F., Bradstreet E.T., Hemmingsen E.A., Hammel H.T. Sap pressure in vascular plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*. 1965;148(3668):339-346. DOI: 10.1126/science.148.3668.339
- Seleiman M.F., Ahmad A., Battaglia M.L., Bilal H.M., Alhammad B.A., Khan N. Zinc oxide nanoparticles: A unique saline stress mitigator with the potential to increase future crop production. *South African Journal of Botany*. 2023;159:208-218. DOI: 10.1016/j.sajb.2023.06.009
- Shirazi F., Gholami M., Sarikhani H. *In vitro* evaluation of drought tolerance in two grape (*Vitis vinifera* L.) cultivars. *Journal of Plant Physiology and Breeding*. 2020;10(2):133-145. DOI: 10.22034/jppb.2020.14302
- Shmalgauzen I.I. Selected works. The organism as a whole in individual and historical development (Izbrannye trudy. Organizm kak tseloye v individualnom i istoricheskom razvitii). Moscow: Nauka; 1982. [in Russian] (Шмальгаузен И.И. Избранные труды. Организм как целое в индивидуальном и историческом развитии. Москва: Наука; 1982).
- Shumilina J.S., Kuznetsova A.V., Frolov A.A., Grishina T.V. Drought as a form of abiotic stress and physiological markers of drought stress. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*. 2018;14(4):5-15.
- Stamatidi V.Yu., Ryff I.I. Biotechnological evaluation of the heat resistance degree in some grapevine cultivars. *Ekosystemy = Ecosystems*. 2017;11(41):68-72. [in Russian] (Стаматиди В.Ю., Рыфф И.И. Тестирование жаростойкости сортов винограда *in vitro*. *Экосистемы*. 2017;11(41):68-72).
- Stamatidi V.Yu., Ryff I.I., Features of changes in water potentials in the grape cultivars Muscat belii and Tsitronnyi Magarach in the conditions of the Southern coast of Crimea under various hydrothermal factors. *Contemporary Horticulture*. 2022;(4):1-12. [in Russian] (Стаматиди В.Ю., Рыфф И.И. Особенности изменения водных потенциалов у сортов винограда Мускат белый и Цитронный Магарача в условиях Южного берега Крыма при различных гидротермических факторах. *Современное садоводство*. 2022;(4):1-12). DOI: 10.52415/23126701_2022_0401
- Teixeira A., Eiras-Dias J., Castellarin S., Geròs H. Berry phenolics of grapevine under challenging environments. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013;14(9):18711-18739. DOI: 10.3390/ijms140918711
- Topçu Altinci N.T., Cangi R. Drought tolerance of some wine grape cultivars under *in vitro* conditions. *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*. 2019;36(2):145-152. DOI: 10.13002/jafag4633
- Vuerich M., Braidotti R., Sivilotti P., Alberti G., Casolo V., Braidotti E. et al. Response of Merlot grapevine to drought is associated to adjustments of growth and nonstructural carbohydrates allocation in above and underground organs. *Water*. 2021;13(17):2336. DOI: 10.3390/w13172336

Информация об авторах

Николай Геннадьевич Нилов, кандидат сельскохозяйственных наук, консультант, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» – структурное подразделение НИЦ «Курчатовский институт», 298600 Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31

Ирина Ильинична Рыфф, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» – структурное подразделение НИЦ «Курчатовский институт», 298600 Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31, i.riff2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4445-0367>

Светлана Петровна Березовская, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» – структурное подразделение НИЦ «Курчатовский институт», 298600 Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31, vada_fotimia@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9166-4341>

Владимир Юрьевич Стаматиди, младший научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» – структурное подразделение НИЦ «Курчатовский институт», 298600 Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31, stamatidi777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4727-2703>

Марина Сергеевна Попова, младший научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» – структурное подразделение НИЦ «Курчатовский институт», 298600 Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31, darlik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9526-4153>

Владимир Александрович Волюнкин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» – структурное подразделение НИЦ «Курчатовский институт», 298600 Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31, v.volynkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8799-1163>

Владимир Владимирович Лиховской, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, директор, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» – структурное подразделение НИЦ «Курчатовский институт», 298600 Россия, Республика Крым, Ялта, ул. Кирова, 31, director@magarach-institut.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3879-0485>

Information about the authors

Nikolay G. Nilov, Cand. Sci. (Agriculture), Consultant, National Research Center “Kurchatov Institute”, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” – subdivision of the Kurchatov Institute, 31 Kirova St., Yalta 298600, Republic of Crimea, Russia

Irina I. Ryff, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of a Laboratory, National Research Center “Kurchatov Institute”, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” – subdivision of the Kurchatov Institute, 31 Kirova St., Yalta 298600, Republic of Crimea, Russia, i.riff2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4445-0367>

Svetlana P. Berezovskaya, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, National Research Center “Kurchatov Institute”, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” – subdivision of the Kurchatov Institute, 31 Kirova St., Yalta 298600, Republic of Crimea, Russia, vada_fotimia@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9166-4341>

Vladimir Yu. Stamatidi, Associate Researcher, National Research Center “Kurchatov Institute”, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” – subdivision of the Kurchatov Institute, 31 Kirova St., Yalta 298600, Republic of Crimea, Russia, stamatidi777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4727-2703>

Marina S. Popova, Associate Researcher, National Research Center “Kurchatov Institute”, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” – subdivision of the Kurchatov Institute, 31 Kirova St., Yalta 298600, Republic of Crimea, Russia, darlik@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9526-4153>

Vladimir A. Volynkin, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Chief Researcher, National Research Center “Kurchatov Institute”, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” – subdivision of the Kurchatov Institute, 31 Kirova St., Yalta 298600, Republic of Crimea, Russia, v.volynkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8799-1163>

Vladimir V. Likhovskoi, Dr. Sci. (Agriculture), Assistant Professor, Director, National Research Center “Kurchatov Institute”, All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” – subdivision of the Kurchatov Institute, 31 Kirova St., Yalta 298600, Republic of Crimea, Russia, director@magarach-institut.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3879-0485>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.10.2025; одобрена после рецензирования 06.07.2026; принята к публикации 14.09.2026.
The article was submitted on 06.10.2025; approved after reviewing on 06.07.2026; accepted for publication on 14.09.2026.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.2:633.262 (571.12)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-о5

Урожайность костреца безостого (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) при выращивании на сено в условиях Тюменской области

Н. А. Феоктистова

Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья, Тюменская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Наталья Александровна Феоктистова, nata_feo@mail.ru

Актуальность. Многолетние травы в виде сена и сенажа входят в рацион кормления жвачных животных в зимнее время и поэтому необходимы в регионах с холодным климатом. Для продуктивности сенокосных угодий требуются сорта трав, созданные для конкретных климатических условий.

Материалы и методы. Объектом исследования являлся кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub), выращиваемый для сенокосного использования. Посев опытов 18 образцов, включая 7 отечественных сортов, проводили в 2019 г., данные получали в 2020–2023 гг., в течение четырех лет пользования травостоя. Определяли урожайность вегетативной массы в сухом виде (сено) и ее структуру – высоту, облиственность, вес и количество побегов, влажность в зависимости от погодных условий и возраста травостоя; рассчитывали направление и тесноту корреляционных связей между признаками.

Результаты. Лучшую урожайность сена (7,14–8,31 т/га) отмечали у образцов ('Степаша', 'Тобол', 10-1-15, 1-11) в условиях достаточного и избыточного увлажнения в 1-й и 3-й годы пользования, низкую (1,9–2,88 т/га) – на 4-й год пользования в сочетании со слабозасушливыми погодными условиями. За весь 4-летний цикл наблюдений урожайность сена была положительно связана с высотой растений ($r = 0,866$), количеством побегов ($r = 0,794$), массой побегов ($r = 0,683$); отрицательно – с облиственностью побегов ($r = -0,834$).

Заключение. В условиях Тюменской области без применения удобрений урожайность сена костреца безостого в травостоях с 1-го по 3-й год пользования составляла 4,3–8,31 т/га. Использование травостоя на сено с 4-го года пользования было малоэффективным из-за сильного снижения урожайности более чем в 2–3 раза по сравнению с 1-м годом пользования. Выбор сорта существенно влиял на продуктивность: за весь 4-летний цикл отдельные селекционные образцы превосходили урожайность сена сорта-стандарта 'Лангепас' (4,58 т/га) на 1,3–1,7 т/га (10-1-15, 1-11, 'Тобол'), а в отдельные годы – на 3,0 т/га.

Ключевые слова: сорт, урожайность вегетативной массы (сена), гидротермический коэффициент (ГТК), вариация, корреляция

Благодарности: работа выполнялась Научно-исследовательским институтом сельского хозяйства Северного Зауралья – филиалом Тюменского научного центра СО РАН в рамках государственного задания по теме № 126022618028-4 (FWRZ-2026-0028) за счет бюджетного финансирования Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Для цитирования: Феоктистова Н.А. Урожайность костреца безостого (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) при выращивании на сено в условиях Тюменской области. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):84-93. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-о5

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, автору и ее/его месту работы.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o5

Yield of awnless brome grass (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) when grown for hay in Tyumen Province

Natalia A. Feoktistova

Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region, Tyumen Province, Russia

Corresponding author: Natalya A. Feoktistova, nata_feo@mail.ru

Background. Perennial grasses in the form of hay and haylage are included in the winter diet of ruminants and are therefore essential in regions with cold climates. Productive hayfields require cultivars developed for specific climate conditions.

Materials and methods. The study was conducted on awnless brome grass (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) grown for hay. Experimental sowing of 18 accessions, including 7 domestic cultivars, was performed in 2019, and data were collected from 2020 to 2023, over 4 years. The yield of dry herbage (hay), and plant structure (height, leafiness, shoot weight, shoot number, and moisture), depending on weather conditions and the grass-stand age, were analyzed. Directions and strength of correlations among the characters were calculated.

Results. The best hay yield (7.14–8.31 t/ha) was recorded for a group of accessions ('Stepasha', 'Tobol', 10-1-15, and 1-11) under sufficient and excessive moisture conditions in the 1st and 3rd years of utilization, while the lowest (1.9–2.88 t/ha) in the 4th year with its weakly dry weather. Over the entire 4-year cycle, hay yield was positively correlated with plant height ($r = 0.866$), number of shoots ($r = 0.794$), and shoot weight ($r = 0.683$), and negatively with shoot leafiness ($r = -0.834$).

Conclusion. In Tyumen Province, without the use of fertilizers, hay yield of awnless brome in the grass stands from the 1st through the 3rd year of exploitation was 4.3–8.31 t/ha. Beginning from the 4th year, the use of grass stands for hay proved ineffective due to a strong two- or threefold decrease in yield compared to the 1st year of utilization. The choice of the cultivar had a significant effect on productivity: over the entire 4-year cycle, a number of accessions (10-1-15, 1-11, and 'Tobol') exceeded the hay yield of the reference cv. 'Langepas' (4.58 t/ha) by 1.3–1.7 t/ha, and in some years by 3.0 t/ha.

Keywords: cultivar, herbage biomass (hay) yield, hydrothermal coefficient (HTC), variation, correlation

Acknowledgments: the work was carried out by the Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region, branch of Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, under the assigned state task, Topic No. 126022618028-4 (FWRZ-2026-0028), with budgetary funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Feoktistova N.A. Yield of awnless brome grass (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub) when grown for hay in Tyumen Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):84-93. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o5

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the author or her/his employers.

Введение

Увеличение молочной продуктивности, исходя из отечественного и мирового опыта, на 60% обусловлено полноценностью кормления. В рационах дойных коров большое значение имеет сено, так как в зимний период оно является одним из главных источников белка и сахара. Годовая потребность сена на одну корову составляет 25–30 ц (Volgin et al., 2018). В России, при численности поголовья жвачных животных 18,0 млн голов КРС и 21,7 млн голов овец и коз (на 2020 г.), необходимы продуктивные сенокосно-пастбищные угодья из адаптивных к условиям произрастания кормовых культур с их лучшими сортами (Kosolapov et al., 2022).

Многолетние травы сенокосного типа должны быть быстрорастущими, высокостебельными и равномерно облиственными. Это характерно для верховых или промежуточных по типу кущения злаков, наиболее известным и распространенным представителем которых является костре́ц безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub). Многолетние травостои агроценозов с доминированием костре́ца безостого (72%) представляют собой высококачественный источник растительного сырья, что обусловлено большим содержанием в нем хорошо облиственных вегетативных удлиненных побегов (Zhezmer, 2023). Практически все сорта костре́ца безостого предназначены для заготовки кормов в виде сена и сенажа (Kosolapov et al., 2018).

Урожайность вегетативной массы кормовых культур, как известно, зависит от погодных условий, возраста травостоя и сорта; костре́ц безостый – не исключение, его развитие имеет сильные колебания в связи с природными факторами и генотипом (Feoktistova, 2019; Baikalova, Serebrennikov, 2022). В экстремальных погодных условиях Якутии урожайность сена обеспечивается за счет высокой зимостойкости, в степных условиях Центрального Черноземья России рост и развитие травостоя костре́ца безостого зависит от засухоустойчивости (Alexeeva, Platonova, 2021; Ivanov et al., 2021). По данным Н. В. Жезмер, костре́ц безостый способен сохранять продуктивное долголетие травостоя (до 27 лет) благодаря хорошему возобновлению корневой системы (Zhezmer, 2022). Целенаправленная селекционная работа с культурой привела к появлению новых современных сортов, превосходящих родительские формы и сорта-стандарты на 1,5–6,1 т/га (Feoktistova, Leonidov, 2022; Yusova et al., 2022).

Целью исследования являлось определение максимально возможного уровня урожайности вегетативной массы у образцов костре́ца безостого без применения удобрений в условиях Тюменской области. В задачу входило сравнение их генетического потенциала урожайности вегетативной массы в сухом виде (сена), полученной за 4-летний период пользования, с учетом влияния погодных условий и возраста травостоя.

Материалы и методы

Опытное поле для проведения наблюдений, принадлежащее Научно-исследовательскому институту сельского хозяйства Северного Зауралья – филиалу ТюмНЦ СО РАН, территориально находится в границах г. Тюмени. Особенностью климатических условий здесь являются холодная и продолжительная зима, жаркое и короткое лето с самой теплой погодой в июле. Период

с $t \geq 15^{\circ}\text{C}$ длится в среднем 74 дня, а освещенность солнцем вполне достаточна для роста и развития всех сельскохозяйственных культур (Ivanenko, 2019). Почва опытного поля темно-серая лесная; предшественник – чистый пар, основная обработка почвы – отвальная вспашка, фон – без удобрений. По шкале обеспеченности основными элементами питания содержание нитратного азота 3,0–3,5 мг/100 г почвы – низкое, фосфора (6,0–6,5 мг) и калия 8,5–9,0 мг/100 г почвы – среднее (Abramov, 2019).

Объектом изучения являлись 18 образцов костре́ца безостого, из них 17 собственной селекции – это 6 сортов из реестров Госсорткомиссии в списках допущенных и охраняемых ('Лангепас', 'Аргонавт', 'Степаша', 'Зауралец', 'Гвардеец', 'Тобол') и 12 селекционных номеров, а также сорт 'Свердловский 38', включенный в исследование как наиболее известный в регионе (с 1971 г.) (<https://gossortrf.ru>; Sharapova, 2025).

Наблюдения проводили в питомнике конкурсного сортоиспытания (КСИ) с 1-го по 4-й год пользования травостоя в 2020–2023 гг. по методическим рекомендациям для опытов с многолетними травами, разработанным во ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса. Год посева – 2019, повторность 4-кратная, площадь делянок – 20 м². Посев семян рядовой, норма высева – 2,5 г/м². Скашивание вегетативной массы с учетной площадки (1 м²) проводили вручную один раз за сезон при наступлении укосной спелости во II–III декаде июня. Пробные снопы скошенной зеленой массы весом 500 г высушивали до постоянного веса в проветриваемом помещении, после чего определяли влажность и выход сухого вещества (сена). Структурные показатели травостоя – высоту и количество побегов – определяли в поле непосредственно перед скашиванием; мощность растений определяли по массе 100 побегов, отобранных из растений пробного снопа перед сушкой; процент облиственности – путем разбора сухих растений пробного снопа (Smurugin et al., 1985).

Информацию о температуре и осадках за период исследований получали на специализированном интернет-сайте (<http://www.pogodaiklimat.ru>), гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) рассчитывали по формуле Селянинова (Gulinova, 1974). Статистическую обработку данных ($\bar{x}$ – средняя арифметическая, R – размах варьирования, НСР₀₅ – наименьшая существенная разность, V – коэффициент вариации, r – коэффициент корреляции) проводили в программе Excel в соответствии с известными формулами (Dospekhov, 1985).

Весеннее возобновление вегетации костре́ца безостого в течение 4 лет наблюдений отмечалось после 15 апреля, укосная спелость наступала после 16 июня; длительность периода активного роста вегетативной массы у растений по годам составляла 59–65 дней. Погодные условия за этот период по количеству тепла, характеризующие суммой активных температур ($t > 10^{\circ}\text{C}$), имели незначительную степень изменчивости ($V = 8,3\%$) – от 791 $^{\circ}\text{C}$ (2022 г.) до 950 $^{\circ}\text{C}$ (2021 г.). Условия влагообеспеченности, характеризующиеся по сумме выпавших осадков за обозначенный период, существенно отличались в 2022 г. (165 мм), тогда как в остальные годы составляли 73–99 мм. В целом погодные условия, характеризующиеся по ГТК, в течение 2 лет были слабозасушливыми – 0,77 и 0,95 в 2021 и 2023 г., один год достаточно увлажненными – 1,22 в 2020 г. и один год избыточно увлажненными – 2,09 в 2022 г. (табл. 1).

Таблица 1. Метеорологические условия в период роста вегетативной массы костреца безостого (апрель – июнь), г. Тюмень, 2020–2023 гг.**Table 1.** Meteorological conditions during the period of herbage biomass growth for awnless brome grass (April through June), Tyumen, 2020–2023

Климатический показатель / Climate indicator	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Период* / Period*	15.04. – 16.06.	17.04. – 22.06.	25.04. – 27.06	24.04. – 23.06
Продолжительность, дней / Duration, days	61	65	62	59
Сумма $t > 10^{\circ}\text{C}$ / Sum of $t > 10^{\circ}\text{C}$	813	950	791	850
Сумма осадков, мм / Total precipitation, mm	99	73	165	81
ГТК Селянинова / Selyaninov's HTC	1,22	0,77	2,09	0,95

Примечание: * – дата весеннего отрастания – дата укоса

Note: * – from the spring regrowth date to the mowing date

Результаты и обсуждение

В период укосной спелости (2020–2023 гг.) травостой 18 образцов костреца безостого формировался полупрямостоячими и прямостоячими побегами высотой 92–141 см, облиственность 36–62%, влажностью 50–65% (рисунок). Количество побегов на 1 м^2 в разные годы было от 205 до 750 шт.; мощность растений составляла от 138 до 564 г (табл. 2).

Высота растений в выборке из 18 образцов в течение 4 лет наблюдений имела существенные колебания – от 96,6 и 112,4 см в слабозасушливых условиях 2023 и 2021 г. до 129,2 и 134,4 см в условиях избыточно-

го и достаточного увлажнения (2022 и 2020 г). Разница между средними значениями 4 вегетационных периодов составляла от 16 до 39%, а в течение каждого отдельного периода вегетации вариация была незначительной ($< 10\%$). Погодные условия влияли на размах значений в выборке: в слабозасушливые годы интервал между минимальной и максимальной высотой составлял 6–8 см, а в условиях достаточного увлажнения был в 2 раза больше – 14–15 см. За весь 4-летний период образцы существенно отличались по высоте, о чем свидетельствует низкая итоговая вариация ($V = 1,5\%$).

Влияние погодных условий на признак оценивали по расчету корреляции между высотой 18 образцов (сред-

**Рисунок.** Сорта костреца безостого 'Гвардеец' и 'Аргонавт' в период укосной спелости, 2022 г.**Figure.** Awnless brome grass cvs. 'Gvardeets' and 'Argonavt' during the mowing ripeness period, 2022

Таблица 2. Морфобиологические показатели образцов костреца безостого в период укоса, г. Тюмень, 2020–2023 гг.
Table 2. Morphobiological indicators of awnless brome grass accessions during the mowing period, Tyumen, 2020–2023

Статистический показатель / Statistical indicator	Год урожая, пользования / Year of harvest (utilization)				$\bar{x}$ 1–4-е г. п.
	2020	2021	2022	2023	
	1-й г. п.	2-й г. п.	3-й г. п.	4-й г. п.	
Высота растений, см / Plant height, cm					
Min–max, см	126–141	109–115	121–135	92–100	116–121
R, см	15	6	14	8	5
$\bar{x}$, см	134,4	112,4	129,2	96,6	118,1
V, %	2,7	1,6	3,3	2,4	1,5
r					0,598*
Облиственность, % / Leafiness, %					
Min–max, %	36–46	43–50	38–48	46–62	44,2–49,5
R, %	10	7	10	16	5,3
$\bar{x}$, %	39,5	47,0	44,5	53,5	46,1
V, %	6,9	3,6	6,9	7,6	3,1
r					-0,372*
Масса 100 побегов, г / Hundred-shoot weight, g					
Min–max, г	227–564	162–306	226–407	138–262	222,5–344,2
R, г	337	144	181	124	121,7
$\bar{x}$, г	347,6	214,4	314,7	175,6	263,1
V, %	22,9	17,3	15,8	17,2	12,3
r					0,634*
Количество побегов на 1 м², шт. / Shoot number per 1 m², pcs.					
min-max, шт./м²	400–750	390–750	450–800	205–383	408,7–603
R, шт.	350	360	350	178	194,3
$\bar{x}$, шт./м²	551,7	579,4	547,8	293,3	493,0
V, %	21,3	17,9	16,7	16,9	10,4
r					0,267*
Влажность, % / Moisture, %					
Min–max, %	61–64	50–55	60–65	54–59	57,7–60,0
R, %	3	5	5	5	2,3
$\bar{x}$, %	62,3	52,8	63,2	56,6	58,7
V, %	1,5	2,7	1,9	2,6	1,1
r					0,827*

Примечание: здесь и далее (таблицы 3 и 4) min–max – диапазон всех значений; R – размах варьирования; $\bar{x}$ – средняя арифметическая; V – коэффициент вариации; r – коэффициент корреляции; * – корреляция с ГТК (см. табл. 1); г. п. – год пользования

Note: here and hereafter (Tables 3 and 4), min–max is the range of all values; R is the scope of variation; $\bar{x}$ is the arithmetic mean; V is the coefficient of variation; r is the correlation coefficient; * shows the correlation with HTC (see Table 1); г. п. means the year of utilization

нее значение по опыту) и ГТК за каждый год. Ввиду того, что число наблюдений составляет 4, этого недостаточно для подтверждения достоверности, поэтому полученные выводы являются предварительными, проверить которые можно только в будущем, когда увеличится число лет наблюдений. На данном этапе, исходя из полученного результата ($r = 0,598$), между высотой растений и ГТК за период от весеннего отрастания до укосной спелости отмечена тенденция к средней положительной связи. Самые низкие значения признака за время наблюдений (92–100 см) отмечали в 2023 г. на 4-й год пользования травостоя. Условия вегетационного периода в этот год характеризовались как слабозасушливые (ГТК = 0,95) и могли отрицательно влиять на рост вегетативной массы. В сравнении с данными 2021 г., когда ГТК был еще ниже (0,77), а высота при этом превышала 100 см, можно заключить, что на изменение признака в большей степени повлиял возраст травостоя.

Облиственность побегов у растений в течение 3 лет подряд (2020–2022) не превышала 50%, с размахом значений среди образцов выборки ($R = 7–10\%$) и незначительной вариацией ($V = 3,6–6,9\%$). Изменения признака появились на 4-й год пользования, когда облиственность стала составлять 46–62%, с разницей между отдельными значениями в 16%, однако коэффициент вариации при этом также остался незначительным ($V = 7,6\%$). Повышение облиственности в возрастных травостоях обусловлено появлением большего числа удлинённых вегетативных побегов, с большим количеством листьев, чем на генеративных побегах. По данным 4 лет наблюдений, связь между средними значениями показателя «облиственность» и ГТК была слабой отрицательной ($r = -0,372$) (табл. 2).

Мощность растений. Значения признака определяли по весу 100 шт. свежескошенных побегов, которые сильно варьировали в выборке в 1-й год пользования ($V = 22,9\%$) и средние в последующие 3 года ($V = 15,8–17,3\%$). Наибольший вес побегов (226–564 г) отмечали в условиях достаточного увлажнения (2020, 2022 г.), наименьший – 138–262 г на 4-й год пользования в сочетании с недостаточным увлажнением. Корреляционная связь с ГТК за 4 года была положительная, средняя ($r = 0,634$).

Побегообразующая способность является сортовым признаком, что косвенно подтверждалось слабой связью с погодными условиями ($r = 0,267$). В течение 3 лет пользования подряд количество побегов у 18 образцов выборки составляло в среднем 548–579 шт./м², но снизилось в 1,9 раз на 4-й год пользования (до 293 шт./м²). Сильное варьирование между образцами было в 1-й год пользования травостоя ($V = 21,3\%$), а в последующие 3 года опустилось до среднего – $V = 16,7–17,9\%$. Интервал между максимальными и минимальными значениями с 1-го по 3-й год пользования был практически одинаковым – 350–360 шт., снизившись на 4-й год пользования до 178 шт.

Влажность. Содержание влаги в растениях во время скашивания закономерно зависело от условий влагообеспеченности в период роста, о чем свидетельствует коэффициент корреляции ($r = 0,827$), показывающий сильную прямую связь. В годы с достаточным увлажнением (ГТК = 1,22–2,09) влажность растительного сырья во время укоса была на 6–10% выше (60–65%), чем в слабозасушливые годы (50–59%) с ГТК = 0,77–0,95. Влажность травостоя разных образцов в течение всего периода опытов имела несущественные колебания ($R = 3–5\%$) между собой и слабую вариацию, не превышающую 3%.

Урожайность сена. Вышеприведенная структура травостоя обеспечила стабильный урожай вегетативной массы в течение 3 вегетационных периодов подряд, с существенным снижением на 4-й год пользования – в 2,3–4,1 раза к 1-му году пользования. Наибольшая урожайность – 7,14–8,31 т/га – отмечалась у отдельных образцов ('Степаша', 'Тобол', 5-3-8 и др.) в условиях достаточного и избыточного увлажнения в 1-й и 3-й год пользования, самая низкая – 1,9–2,88 т/га – в слабозасушливых условиях на 4-й год пользования. Во влажные годы (2020 и 2022 г.) размах варьирования в выборках составлял 3,99 и 3,11 т, а в слабозасушливые (2021 и 2023 г.) – 2,68 и 0,98 т соответственно. По результатам 4-годичных опытов, максимальная продуктивность отмечена у сорта 'Тобол' (6,26 т/га), с прибавкой к стандарту 'Лангепас' (4,58 т/га) в разные годы 0,19–3,1 т/га. Хорошую продуктивность показали селекционные образцы 10-1-15 – 5,96 т/га и 1-11 – 5,87 т/га, перспективные для передачи на государственное сортоиспытание (табл. 3).

Таблица 3. Урожайность сена кострца безостого, т/га, г. Тюмень, 2020–2023 гг.

Table 3. Hay yield of awnless brome grass, t/ha, Tyumen, 2020–2023

Образец / Accession	Год урожая, пользования / Year of harvest (utilization)				Кратность снижения к 1-му г. п., раз	$\bar{x}$, т/га
	2020	2021	2022	2023		
	1-й г. п.	2-й г. п.	3-й г. п.	4-й г. п.		
'Лангепас' (стандарт) / 'Langepas' (reference)	5,15	6,03	4,97	2,17	2,4	4,58
'Свердловский 38' / 'Sverdlovskiy 38'	6,03	5,79	5,95	1,90	3,2	4,91
'Аргонавт' / 'Argonavt'	4,32	4,70	5,07	1,91	2,3	4,00
'Гвардеец' / 'Gvardeets'	6,08	5,15	5,40	2,05	2,9	4,67
'Зауралец' / 'Zauralets'	6,92	4,88	4,96	2,27	3,0	4,76
'Степаша' / 'Stepasha'	7,14	6,12	5,95	2,37	3,0	5,39
'Тобол' / 'Tobol'	7,87	6,22	8,07	2,88	2,7	6,26

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Образец / Accession	Год урожая, пользования/ Year of harvest (utilization)				Кратность снижения к 1-му г. п., раз	$\bar{x}$, т/га
	2020	2021	2022	2023		
	1-й г. п.	2-й г. п.	3-й г. п.	4-й г. п.		
1-11	7,14	6,35	7,22	2,76	2,6	5,87
4-4-17	6,66	6,57	6,95	2,47	2,7	5,66
5-3-8	8,31	6,38	6,36	2,04	4,1	5,77
6-3-13	7,60	5,45	6,10	2,20	3,4	5,34
7-1-67	6,84	5,90	6,37	1,95	3,5	5,26
7-4-49	7,83	5,38	6,55	2,69	2,9	5,61
10-1-15	7,92	7,35	6,29	2,29	3,4	5,96
15-2-45	6,46	5,40	7,45	1,96	3,3	5,32
15-2-63	7,53	5,90	6,66	2,45	3,1	5,63
19-3-37	5,93	5,03	6,12	2,54	2,3	4,90
20-3-13	6,75	5,78	6,30	2,49	2,7	5,33
$\bar{x}$, га	6,80	5,79	6,26	2,29		
Min-max, т/га	4,32–8,31	4,70–7,35	4,96–8,07	1,90–2,88		4,00–6,26
R, т/га	3,99	2,65	3,11	0,98		2,26
HCP ₀₅ , т / LSD ₀₅ , т	1,8	1,0	1,5	0,45		

Влияние отдельных элементов структуры на урожайность вегетативной массы определяли по тесноте корреляционных связей. Существенность коэффициента корреляции проверяли по граничным значениям для числа наблюдений выборки. При расчете за отдельный год и по средней арифметической за 4 года выборка состояла из 18 пар значений, поэтому граничное значение на 5-процентном уровне значимости для 16 степеней свободы ($n - 2 = 16$) составило $\geq 0,468$. Дополнительно произведен расчет корреляции всего массива данных за весь период, при котором размер выборки состоял из 72 пар значений, а граничное значение на 5-процентном уровне значимости для 70 степеней свободы ($n - 2 = 70$) составило $\geq 0,232$ (Dospikhov, 1985).

Однозначно определить главный признак, влияющий на урожайность вегетативной массы, не удалось, так как они все взаимосвязаны. Результаты расчета некоторых показателей за разные годы сильно варьировали, что затруднило их интерпретацию. Расчет корреляции по средней арифметической в опыте показал среднюю положительную связь урожайности с высотой растений ($r = 0,622$), среднюю отрицательную – с облиственностью ($r = -0,589$), слабую – с массой и количеством побегов ($r = 0,411$ и $0,449$ соответственно). Наиболее информативным и приближенным по результатам к расчету по средней арифметической оказался расчет корреляции всех полученных за 4 года опытов индивидуальных значений. Исходя из него, урожайность сена была сильно связана с высотой растений – $r = 0,866$ и количеством побегов – $r = 0,794$; среднее с массой побегов – $r = 0,683$ (табл. 4).

Корреляция урожайности с облиственностью побегов была сильная отрицательная – $r = -834$, что подтверждалось морфологическим разбором. С 1-го по 3-й год пользования травостой костреца состоял в основном из генеративных побегов, с мощным стеблем, что влияло на общий вес кормовой массы, а на 4-й год пользования их количество и мощность значительно снижались, появлялись мягкие удлинённые вегетативные побеги, более облиственные, но и более легкие, чем генеративные.

Заключение

Природно-климатические условия Тюменской области позволяют получать урожайность сена костреца безостого в посевах с 1-го по 3-й год пользования на уровне 4,3–8,31 т/га. Сенокосное использование посевов с 4-го года пользования без применения дополнительных агроприемов, в частности применения удобрений, будет малоэффективным из-за сильного (в 2,3–4,1 раза к 1-му году пользования) снижения урожайности.

Выбор сорта существенно влияет на продуктивность травостоя; за весь цикл наблюдений отдельные селекционные образцы превосходили урожайность сорта-стандарта 'Лангепас' (4,58 т/га) на 1,3–1,7 т/га (10-1-15, 1,11, 'Тобол'), а в отдельные годы – на 3,0 т/га. Известные в регионе сорта 'Степаша' (2009 г.), 'Свердловский 38' (1971 г.), 'Лангепас' (1998 г.), несмотря на длительный период сельскохозяйственного использования, сохраняют лучшие качества своих популяций и по-прежнему показывают приемлемый уровень продуктивности – 4,6–5,4 т/га (среднее за 4 года пользования). Современный

Таблица 4. Корреляционные связи между урожайностью сена и морфологическими показателями травостоя костреца безостого**Table 4. Correlation links between hay yield and morphological parameters of awnless brome grass stands**

Показатель / Indicator	r					
	2020	2021	2022	2023	$\bar{x}$	2020–2023
	1-й г. п.	2-й г. п.	3-й г. п.	4-й г. п.	1–4-е г. п.	
Высота растений, см / Plant height, cm	0,414	0,088	0,560	0,371	0,622	0,866
Облиственность, % / Leafiness, %	–0,629	–0,430	–0,544	–0,389	–0,589	–0,834
Масса 100 побегов, г / Hundred-shoot weight, g	0,209	–0,008	0,497	0,424	0,411	0,683
Количество побегов, шт./м ² / Shoot number per 1 m ² , pcs.	0,458	0,495	0,324	0,373	0,449	0,794

сорт 'Тобол' (2025 г.) с урожайностью сена 6,3 т/га (среднее за 4 года) доказывает возможность увеличения вегетативной массы костреца безостого путем селекции.

В селекционной работе можно принять во внимание предварительные расчеты корреляционных связей между признаками – за 4-летний цикл наблюдений урожайность сена была положительно связана с высотой растений ($r = 0,62; 0,87$), количеством побегов ($r = 0,45; 0,79$), массой побегов ($r = 0,41; 0,68$); отрицательно – с облиственностью побегов ($r = -0,59; -0,83$).

References / Литература

- Abramov N.V. Fertilizer application system (Sistema primeneniya udobreniy). In: *Adaptive Landscape Farming System in the Natural Climatic Zones of Tyumen Province: Monograph (Sistema adaptivno-landshaftnogo zemledeliya v prirodno-klimaticheskikh zonakh Tyumenskoy oblasti: monografiya)*. Tyumen: Tyumen Publishing House; 2019. p.135-153. [in Russian] (Абрамов Н.В. Система применения удобрений. В кн.: Система адаптивно-ландшафтного земледелия в природно-климатических зонах Тюменской области: монография. Тюмень: Тюменский издательский дом; 2019. С.135-153).
- Alexeeva V.I., Platonova A.Z. Biological evaluation of awnless brome grass in different agro-climatic zones of Yakutia. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2021;51(6):22-30. [in Russian] (Алексеева В.И., Платонова А.З. Биологическая оценка костреца безостого в различных агроклиматических зонах Якутии. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2021;51(6):22-30). DOI: 10.26898/0370-8799-2021-6-3
- Baikalova L.P., Serebrennikov Yu.I. Awnless brome varieties fodder productivity and nutritional value in the Krasnoyarsk Region. *The Bulletin of KrasGAU*. 2022;184(7):176-185. [in Russian] (Байкалова Л.П., Серебренников Ю.И. Кормовая продуктивность и питательная ценность сортов костреца безостого в Красноярском крае. *Вестник КрасГАУ*. 2022;184(7):176-185). DOI: 10.36718/1819-4036-2022-7-176-185
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Агропромиздат; 1985).
- Feoktistova N.A. The effect of the age of smooth brome (*Bromopsis inermis*) stands on their herbage yield in Tyumen Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(2):30-37. [in Russian] (Феоктистова Н.А. Влияние возраста травостоя на урожайность зеленой массы костреца безостого (*Bromopsis inermis*) в Тюменской области. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(2):30-37). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-30-37
- Feoktistova N.A., Leonidov Yu.E. 'Gvardeets': a new awnless brome (*Bromopsis inermis*) cultivar developed in Tyumen Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(3):140-148. [in Russian] (Феоктистова Н.А., Леонидов Ю.Е. Новый сорт костреца безостого 'Гвардеец' Тюменской селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(3):140-148). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-140-148
- Gulinova N.V. Methods for agroclimatic processing of observations (Metody agroklimaticheskoy obrabotki nablyudeniya). Leningrad: Gidrometeoizdat; 1974. [in Russian] (Гулинова Н.В. Методы агроклиматической обработки наблюдений. Ленинград: Гидрометеиздат; 1974).
- Ivanenko A.S. Natural resource potential of Tyumen Province (Prirodno-resursnyy potentsial Tyumenskoy oblasti). In: *Adaptive Landscape Farming System in the Natural Climatic Zones of Tyumen Province: Monograph (Sistema adaptivno-landshaftnogo zemledeliya v prirodno-klimaticheskikh zonakh Tyumenskoy oblasti: monografiya)*. Tyumen: Tyumen Publishing House; 2019. p.44-51. [in Russian] (Иваненко А.С. Природно-ресурсный потенциал Тюменской области. В кн.: Система адаптивно-ландшафтного земледелия в природно-климатических зонах Тюменской области: монография. Тюмень: Тюменский издательский дом; 2019. С.44-51).

- Ivanov J.S., Zolotarev V.N., Obraztsov V.N. Productivity of awnless brome in steppe conditions of the Central Chernozem Region of Russia. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021;14(4):58-64. [in Russian] (Иванов И.С., Золотарев В.Н., Образцов В.Н. Продуктивность кострца безостого в степных условиях Центрального Черноземья России. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021;14(4):58-64). DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_4_58
- Kosolapov V.M., Chernyavskikh V.I., Kostenko S.I. Current state and challenges of forage production in Russia. *Fodder Production*. 2022;(10):3-8. [in Russian] (Косолапов В.М., Черныавских В.И., Костенко С.И. Современное состояние и вызовы для отрасли кормопроизводства в России. *Кормопроизводство*. 2022;(10):3-8).
- Kosolapov V.M., Kostenko S.I., Pilipko S.V., Klochkova V.S. Application of genetic resources of cereal grasses in breeding of specialized varieties. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018;32(2):12-16. [in Russian] (Косолапов В.М., Костенко С.И., Пилипко С.В., Клочкова В.С. Использование генетических ресурсов злаковых трав в селекции специализированных сортов. *Достижения науки и техники АПК*. 2018;32(2):12-16). DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10203
- Sharapova N.V. (ed.). Catalogue of crop cultivars of the Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region (Katalog sortov selskohozyaystvennykh kultur nauchno-issledovatel'skogo instituta selskogo khozyaystva Severnogo Zauralya). Tyumen: Pechatnik; 2025. [in Russian] (Каталог сортов сельскохозяйственных культур научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зуралья / под ред. Н.В. Шараповой. Тюмень: Печатник; 2025).
- Smurygin M.A., Novoselova A.S., Konstantinova A.M., Rubtsov M.I., Filimonov M.A., Bekhtin N.S., Voshinin P.A., Ezhakova O.F., Katkov V.A., Kuleshov G.F., Malashenko V.S., Mel'nikova T.E., Morugina M.P., Nenarokov Yu.M., Novoselov M.Yu., Piskovatskaya R.G., Piskovatskiy Yu.M., Yartiev A.G., Kremnina A.N., Mazur K.K., Prishhep E.G., Putsa N.M., Surkova T.A., Kashmanova O.I., Komkova T.N., Kositsina-Pinegina E.A., Makarenkov M.A., Mityurova T.F., Pogorelova T.F., Podgrusha V.M., Razgulyaeva N.V., Cheprasova S.N. Guidelines for breeding perennial grasses (Metodicheskiye ukazaniya po selektsii mnogoletnikh trav). Moscow: V.R. Williams All-Union Research Institute of Perennial Grass Breeding; 1985. [in Russian] (Смурыгин М.А., Новоселова А.С., Константинова А.М., Рубцов М.И., Филимонов М.А., Бехтин Н.С., Вошинин П.А., Ежакова О.Ф., Катков В.А., Кулешов Г.Ф., Малащенко В.С., Мельникова Т.Е., Моругина М.П., Ненарокров Ю.М., Новоселов М.Ю., Писковацкая Р.Г., Писковацкий Ю.М., Яртиев А.Г., Кремнина А.Н., Мазур К.К., Прищеп Е.Г., Пуца Н.М., Суркова Т.А., Кашманова О.И., Комкова Т.Н., Косицина-Пинегина Е.А., Макаренков М.А., Митюрова Т.Ф., Погорелова Т.Ф., Подгруша В.М., Разгуляева Н.В., Чепрасова С.Н. Методические указания по селекции многолетних трав. Москва: Всесоюзный научно-исследовательский институт кормов имени В.Р. Вильямса; 1985).
- State Register of Varieties and Hybrids of Agricultural Plants Admitted for Usage: [website]. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: [сайт]). URL: <https://gossortrf.ru> [дата обращения: 16.03.2026].
- Volgin V.I., Romanenko L.V., Prokhorenko P.N., Fedorova Z.L., Korochkina E.A. Proper feeding of dairy cattle is the basis for implementing the genetic potential of productivity (Polnotsennoe kormleniye molochnogo skota – osnova realizatsii geneticheskogo potentsiala produktivnosti). Moscow: Russian Academy of Sciences; 2018. [in Russian] (Волгин В.И., Романенко Л.В., Прохоренко П.Н., Федорова З.Л., Корочкина Е.А. Полноценное кормление молочного скота – основа реализации генетического потенциала продуктивности). Москва: Российская академия наук; 2018).
- Weather and Climate (Pogoda i klimat): [website]. [in Russian] (Погода и климат: [сайт]). URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> [дата обращения: 15.03.2026].
- Yusova O.A., Puzikov A.N., Momonov A.Kh. New promising variety Effect of awnless brome. *Zemledelie = Crop Farming*. 2022;(5):32-34. [in Russian] (Юсова О.А., Пузииков А.Н., Момонов А.Х. Новый перспективный сорт кострца безостого Эффект. *Земледелие*. 2022;(5):32-34). DOI: 10.24412/0044-3913-2022-5-32-34
- Zhezmer N.V. Productive longevity and quality of herbal raw material in grass stands with brome grass and reed canary grass. In: *Agricultural Science at the Current Stage: Status, Problems, and Prospects (Agrarnaya nauka na sovremennoy etape: sostoyaniye, problemy, perspektivy): Proceedings of the V Scientific and Practical Conference with International Participation (Molochnoye, Vologda; February 21–25, 2022)*. Vologda: Vologda Research Center of the RAS; 2022. p.238-242. [in Russian] (Жезмер Н.В. Продуктивное долголетие и качество травяного сырья укосных травостоев с кострцом безостым и двукосточником тростниковым. В кн.: *Аграрная наука на современном этапе: состояние, проблемы, перспективы: материалы V научно-практической конференции с международным участием (Вологда, Молочное; 21–25 февраля 2022 г.)*. Вологда: Вологодский научный центр РАН; 2022. С.238-242).
- Zhezmer N.V. Quality of raw mass of early and mid-maturing grass stands for hay production. In: *Multifunctional Adaptive Forage Production: Collection of Scientific Papers. Issue 30(78). Proceedings of the International Conference "Scientific Support of Fodder Production in Russia", dedicated to the 100th Anniversary of the Federal Scientific Center "VIK named after V.R. Williams" (Lobnya, Moscow Region, September 13–15, 2022)*. Moscow; 2023. p.58-65. [in Russian] (Жезмер Н.В. Качество сырьевой массы ранних и среднеспелых злаковых травостоев для производства сена. В кн.: *Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сборник научных трудов. Выпуск 30(78). Материалы Международной конференции «Научное обеспечение кормопроизводства в России», посвященной 100-летию ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» (г. Лобня Московской области, 13–15 сентября 2022 г.)*. Москва; 2023. С.58-65). DOI: 10.33814/МАК-2023-30-78-58-65

Информация об авторе

Наталья Александровна Феоктистова, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал ТюмНЦ СО РАН, 625501 Россия, Тюменская обл., Тюменский р-н, п. Московский, ул. Бурлаки, 2, nata_feo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9418-6218>

Information about the author

Natalya A. Feoktistova, Researcher, Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region – branch of the TSC SB RAS, 2 Burlaki St., Moskovsky Settle., Tyumensky District, Tyumen Province 625501, Russia, nata_feo@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9418-6218>

Статья поступила в редакцию 04.04.2026; одобрена после рецензирования 08.06.2026; принята к публикации 30.06.2026.
The article was submitted on 04.04.2026; approved after reviewing on 08.06.2026; accepted for publication on 30.06.2026.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

UDC: 633.913.322:631.53.02

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o20



Effects of seed size on seed germination, plant growth, and yield of kok-saghyz

Guang Shen¹, Lin Zhou¹, Wentian Zhang¹, Fuyun Zeng¹, Zhang Yu², Yihua Yang¹, Nina G. Kon'kova³¹ Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China² Northeast Forestry University, College of Landscape Architecture, Harbin, China³ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Автор, ответственный за переписку: Yihua Yang, 363929932@163.com

Background. Kok-saghyz is an emerging promising natural rubber crop plant, but there is still no economical and convenient seed-quality grading or screening method for production.

Materials and methods. We took accession k-445 of kok-saghyz from Russia as the study object, using four sieves with different meshes to screen its seeds into four grades, and studied the effects of seed size on seed germination, plant growth, and yield. The study was carried out in 2020–2022 under the conditions of a field experiment at the experiment station in Harbin (45.592729°N, 126.581668°E).

Results. It was established that sieves No. 28 and No. 30 with mesh sizes of 0.83 mm and 0.60 mm retained about 90% of the total seed mass. The germination capacity of seeds selected with sieves No. 28 and No. 30 was significantly higher compared to seeds selected with sieves No. 32 and No. 35 with mesh sizes of 0.50 mm and 0.43 mm. No significant differences in germination energy or germination uniformity were found among seeds of different fractions. The duration of growth stages of kok-saghyz plants sorted with sieves having different mesh sizes generally increased as the seed size decreased (with increasing sieve number) and was prolonged by one to four days. With an increase in the sieve number, rubber yield in kok-saghyz plants gradually decreased.

Conclusions. Thus, in production practice, sieves No. 30 and No. 35 can be directly used to improve operational efficiency by separating kok-saghyz seeds into two fractions. The use of sieves No. 30 and No. 35 for two-fraction seed sorting is a convenient and cost-effective method for grading and selecting kok-saghyz seeds according to quality.

Keywords: *Taraxacum kok-saghyz*, natural rubber plant, seed grading, rubber yield, rubber content

Acknowledgments: the work was supported by the Scientific Research Fund of the Heilongjiang Academy of Sciences, Projects No. KY2023ZR04, and within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0005.

For citation: Shen G., Zhou L., Zhang W., Zheng F., Yu Z., Yang Y., Kon'kova N.G. Effects of seed size on seed germination, plant growth, and yield of kok-saghyz. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):94-101. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o20

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o20

Влияние размеров семян на прорастание, рост растений и урожайность кок-сагыза

Г. Шень¹, Л. Чжоу¹, В. Чжан¹, Ф. Чжэн¹, Ч. Юй², И. Ян¹, Н. Г. Конькова³

¹ Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Харбин, Китай

² Северо-Восточный лесотехнический университет, Колледж ландшафтной архитектуры, Харбин, Китай

³ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Corresponding author: Ихуа Ян, 363929932@163.com

Актуальность. Кок-сагыз является перспективным растением – источником натурального каучука, однако в настоящее время для его производства по-прежнему отсутствует экономичный и удобный метод градации и отбора семян по качеству.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования использовали образец кок-сагыза k-445 из России. Семена с помощью четырех сит с различным размером ячеек были разделены на четыре фракции, после чего изучали влияние размера семян на их всхожесть, рост растений и урожайность. Исследования проводились в 2020–2022 гг. в условиях полевого эксперимента на опытной станции в Харбине (45,592729° с. ш., 126,581668° в. д.).

Результаты. Установлено, что сита № 28 и № 30 с размером ячеек 0,83 мм и 0,60 мм задерживали около 90% общей массы семян. Всхожесть семян, отобранных ситами № 28 и № 30, была достоверно выше по сравнению с семенами, отобранными ситами № 32 и № 35 с размером ячеек 0,50 мм и 0,43 мм. Существенных различий по энергии прорастания и равномерности прорастания между семенами различных фракций не выявлено. Продолжительность фаз роста растений кок-сагыза, отсортированных ситами с различным размером ячеек, в целом увеличивалась с уменьшением размера семян (увеличением номера сита) и удлинялась на 1–4 дня. С увеличением номера сита урожай каучука у растений кок-сагыза постепенно снижался.

Заключение. Таким образом, в производственной практике для повышения эффективности работ можно непосредственно использовать сита № 30 и № 35 для разделения семян кок-сагыза на две фракции. Применение сит № 30 и № 35 для двухфракционной сортировки семян является удобным и экономичным способом градации и отбора семян кок-сагыза по качеству.

Ключевые слова: *Taraxacum kok-saghyz*, источник природного каучука, сортировка семян, урожайность каучука, содержание каучука

Благодарности: работа выполнена при поддержке Фонда научных исследований Академии наук провинции Хэйлунцзян, проект № KY2023ZR04, а также в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР, проект № FGEM-2022-0005.

Для цитирования: Шень Г., Чжоу Л., Чжан В., Чжэн Ф., Юй Ч., Ян И., Конькова Н.Г. Влияние размеров семян на прорастание, рост растений и урожайность кок-сагыза. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):94–101. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o20

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

Introduction

Seed quality plays a vital role in the progress of crop production, as it ensures the purity of seeds, provides the desired plant stand, and contributes to uniform growth and maturation. High seed quality enhances the crop's ability to withstand adverse conditions, respond well to fertilizer and other inputs, produce vigorous, fast-growing seedlings that can endure pest and disease incidence to a certain extent, and establish a well-developed root system that will make the uptake of nutrients more efficient (Singh, 2011).

Seed quality includes physical quality, genetic purity, physiological quality, and seed health. Seeds with good physical quality should have uniform size, weight, and color, and are expected to be free from undesired materials like stones, debris, dust, etc. (Dadlani, Yadava, 2023). Seed size, as an aspect of seed physical quality characterizing each plant species, is central to the regeneration and establishment of seeds (Sharma et al., 2013), and also is one of the most important components that determine final yield and quality during crop production (Kavita, Yogeesh, 2022). As a rule, seed-grading sieves are used to differentiate among different seed sizes in order to obtain high-quality seeds.

Kok-saghyz, or Russian dandelion (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin), belongs to the Asteraceae family. Kok-saghyz seeds are small, with one seed basket (achene head) producing from 50 to 100 seeds. The absolute weight of 1000 seeds is 0.40–0.45 grams, meaning that there are between 2,000 and 2,500 seeds in a single gram (Vakhrusheva, 1992). Kok-saghyz roots contain 2.89–27.89% (Whaley, Bowen, 1947; Luo, 1951; Arias et al., 2016; Ramirez et al., 2017) of natural rubber, making this crop one of the best natural rubber plants in the world. Due to its advantages of being harvestable in the same year, easiness for mechanized harvesting, and high rubber quality, it is favored by major rubber tire companies and has attracted substantial investment to promote its industrialization (Polhamus, 1962; Ramirez et al., 2017) around the world.

Since kok-saghyz is an emerging crop, there is no economical and convenient seed-quality grading and screening method for production. In order to improve the performance of field seedlings and rubber yield of kok-saghyz, we used ordinary sieves to screen and grade its seeds, and then studied the effects of sieve-screened seeds on germination indicators, plant growth, and yield, so as to provide a convenient and practical seed-screening and grading method for kok-saghyz production.

Materials and methods

The seeds of a kok-saghyz accession (k-445 of Ukrainian origin) from Russia served as the material for this study. We weighed 2.5 g of seeds randomly as one sample and repeated this procedure three times for each experiment. Seed sorting was performed using sieves with different aperture sizes: No. 28 (0.83 mm), No. 30 (0.60 mm), No. 32 (0.50 mm), and No. 35 (0.43 mm). The seeds were sifted sequentially; 2.5 g of seeds were sifted first through sieve No. 28, then No. 30, then No. 32, and finally No. 35. The material that fell out of sieve No. 35 was an impurity consisting of empty seed shells. With four sieves of different diameters, the seeds were divided into four size grades (seeds detained by sieves were studied). Each grade was weighed separately, so that the specific weight and thousand-seed weight were determined for each grade. We randomly selected 30 seeds from each grade, measured the length and width of the seeds, and analyzed whether the differences between them were significant. Next, we ran-

domly selected 30 seeds from each grade for germination tests to analyze the differences in germination percentage, germination rate, and germination consistency among them. Finally, 100 seeds were randomly selected from each grade to produce seedlings, which were transplanted to the field, and the differences in the phenological period and yield among them were analyzed.

Index calculation method:

Germination percentage: germinated seeds/total number of seeds $\times 100\%$;

Germination rate: $\text{CVG} = (\sum_{i=1}^K f_i / x_i) 100$, where f_i is the number of seeds germinated on day i , x_i is the number of days from the start of seed germination, and K is the number of days when the seeds finished germination;

Germination consistency: $\text{CVt} = (\text{St}/\bar{t}) 100$, St is the standard deviation of germination time, $\bar{t}$ is the average germination time – $\sum_{i=1}^K n_i t_i / \sum_{i=1}^K n_i$

where t_i is the time from the start of the experiment to the count on the i -th day, n_i is the number of seeds germinated on the i -th day, and K is the end of the experiment.

The number of germinating seeds was recorded at a fixed time every day.

Growth period:

Seedling stage: from the appearance of real leaves to 6–7 leaves;

Leaf expansion stage: from 6–7 leaves to the beginning of flowering;

Beginning of flowering: from flowering to 10% of flowers blooming;

Full flowering stage: from 15% of flowers blooming to 50% of flowers blooming;

Fruit stage: from the ripening of the first fruit to the last fruit.

Thirty plants were randomly selected from each grade to observe the phenological period. When about 10% of the plants reached the standard of a certain phenological period, it was defined as the beginning of this phenological period; when more than 50% of the plants reached the standard, it was defined as the peak period; when more than 80% of the plants reached the standard, it was defined as the end period.

The climatic conditions of the year were favorable for the growth and development of plants. The experiment station where the research was conducted is characterized by a temperate continental monsoon climate, with a short and cool summer, and a long cold winter. The average annual precipitation ranges from 494 to 651 mm, with most rainfall occurring in July and August. The soils at the experiment are dark-brown, with relatively high humus content. The mean summer temperature from June to August was $+22^\circ\text{C}$. The hottest month was July, with the mean minimum temperature of $+23^\circ\text{C}$, and the mean maximum temperature of $+29^\circ\text{C}$. The highest average amount of precipitation was recorded in July – 110.7 mm, and in August – 89.4 mm. Sowing was carried out on April 20 using the seedling method. The distance between rows was 30–40 cm, and the distance between plants was 25 cm. To study the rubber content in the dried roots of kok-saghyz, the method of root extraction with a hot alkaline solution of NaOH was applied. This method is used to produce purified rubber (Ramirez Cavidad et al., 2022).

For the data analysis, we used single-factor (sieve diameter) multivariate (germination percentage, and germination rate) variance analysis with post-hoc comparison by the Tukey criterion, and applied the *pwr* software package in the R language to determine the minimum number required for variance analysis (<https://www.r-project.org>).

Results and discussion

Weight comparison of seeds screened through sieves with different meshes

Kok-saghyz seeds were separated into fractions using sieves No. 28, No. 30, No. 32, and No. 35. The proportion of seeds retained on the sieves increased as the aperture size decreased. Sieve No. 28, with an aperture diameter of 0.83 mm, retained the largest proportion of seeds, accounting for more than half of the total mass – 1.45 g (56.6%). This was followed by the fraction retained on sieve No. 30, with an aperture diameter of 0.60 mm, which accounted for 0.85 g (33.9%). Seeds retained on sieve No. 32 comprised 0.18 g (7.0%), while the smallest fraction was obtained using sieve No. 35, accounting for only 0.06 g (2.4%) of the total seed mass (Fig. 1).

clustering within the top statistical significance fraction ($P \leq 0.01$). A pronounced decline in viability was observed in the smaller physical fractions, culminating in the lowest germination rate for seeds of No. 35.

In stark contrast to overall viability, neither germination speed ($F = 0.14$, $P = 0.931$) nor germination uniformity ($F = 0.21$, $P = 0.884$) were significantly affected by seed grading. Irrespective of their physical dimensions, viable seeds across all cohorts exhibited a consistent germination speed and a highly uniform temporal spread. This divergence suggests that while smaller seed fractions contain a substantially higher proportion of nonviable seeds, the functionally viable subpopulation within those smaller fractions possesses normative germination vigor equivalent to that of the largest seeds. The differences in seed germination rate and germination consistency across all sieves were not significant (Fig. 2, Fig. 3).

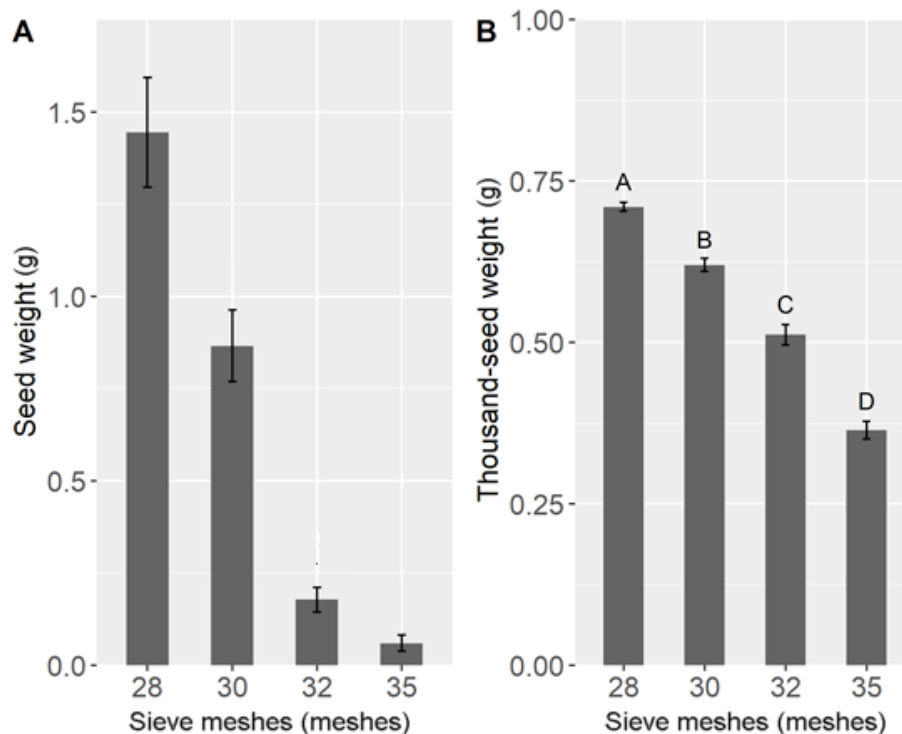


Fig. 1. Seed specific weight and 1000-seed weight of kok-saghyz seeds after screening, g: **A** – seed specific weight of kok-saghyz seeds after screening; **B** – 1000-seed weight (different capital letters above the bars indicate statistically significant differences ($P \leq 0.01$) based on the analysis of variance)

Рис. 1. Удельный вес семян и масса 1000 семян кок-сагыза после калибровки, г: **A** – удельный вес семян кок-сагыза после калибровки; **B** – Масса 1000 семян (различные заглавные буквы над столбцами указывают на статистически значимые различия ($P \leq 0,01$) по результатам дисперсионного анализа)

Seed germination index after screening through sieves with different meshes

The germination of seeds screened through sieves with different meshes showed that the seed germination percentage of sieves No. 28 and No. 30 was significantly different from that of No. 35 ($\alpha = 0.05$) (Fig. 2A), and there was no significant difference among the other sieves. The physiological viability of kok-saghyz seeds was heavily dependent on physical dimensions, whereas germination kinetics remained completely conserved across all size classes. Sieve size demonstrated a highly significant effect on total germination percentage ($F = 16.18$, $P < 0.001$, $\eta^2 = 85.9\%$). The larger seed fractions (No. 28 and No. 30) maintained the highest viability,

Comparison of the growth period of seeds screened through sieves with different meshes

During the seedling stage, no statistically significant differences in plant growth periods were observed among seeds screened through sieves with different mesh sizes. However, the following trends were noted: during the leaf expansion stage, the larger the mesh size of the sieve, the later the plant growth was delayed by 1–2 days; during the initial flowering stage, except for sieve No. 35, the growth period of plants screened through other sieves was delayed by 2–3 days; during the peak flowering stage, the larger the mesh size of the sieve, the later the plant growth period was delayed by 2–4 days; during the fruiting stage, the larger the mesh size of

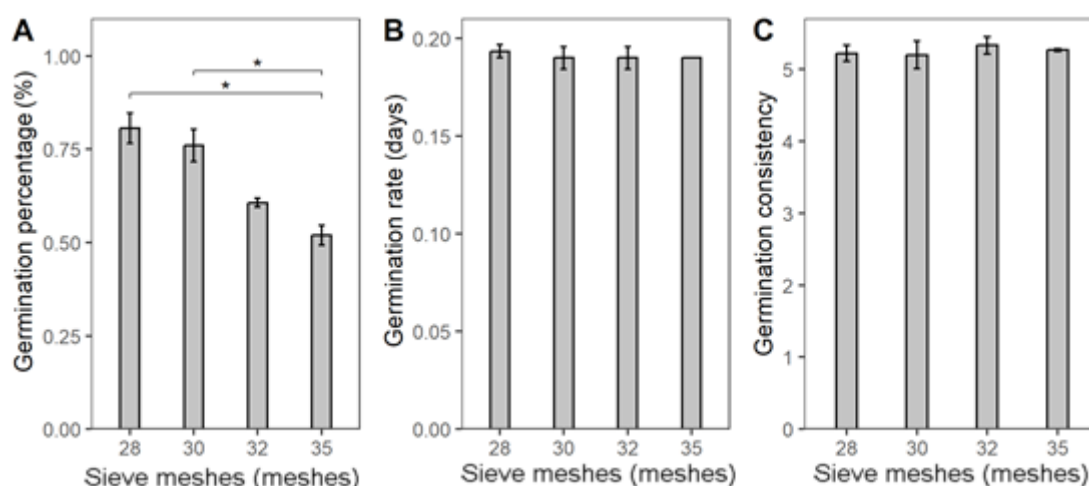


Fig. 2. Differences in the germination index of seeds screened through sieves with different meshes ($\alpha = 0.05$)

Рис. 2. Различия в индексе всхожести семян, отсортированных с использованием сит с разным размером ячеек ($\alpha = 0,05$)

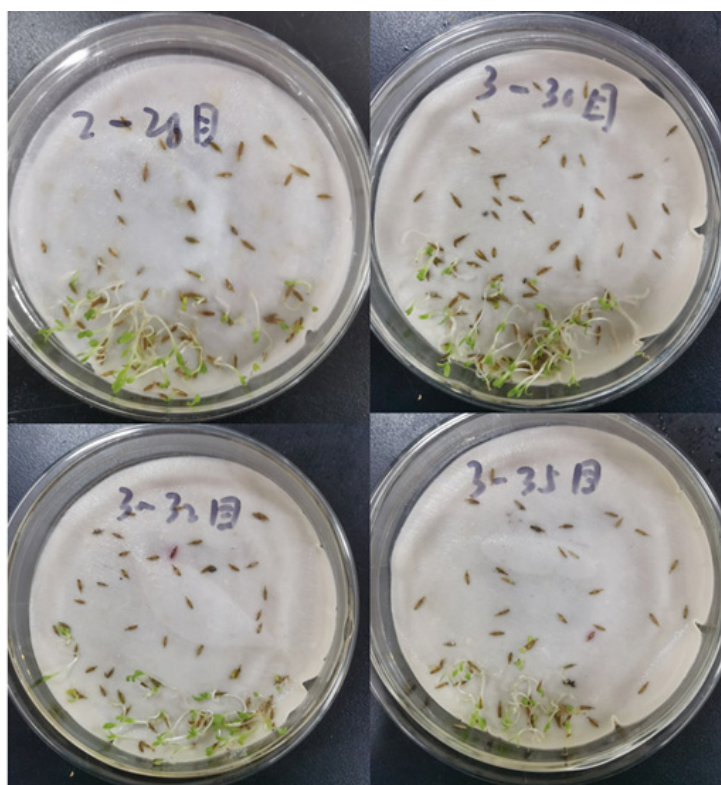


Fig. 3. Experiment on seed germination after screened through sieves with different meshes

Рис. 3. Определение всхожести семян, калиброванных на ситах с разным размером ячеек

the sieve, the later the plant growth period was delayed by 1–4 days (Table).

Plant yield of seeds screened through sieves with different meshes

The differences in rubber concentration in kok-saghyz plants grown from seeds screened through sieves with different meshes were not significant, with an average between 6.3% and 6.8% (Fig. 4, A); however, the root biomass of kok-saghyz plants grown from seeds screened through sieves with different meshes was significantly different. Among the

No. 28 and No. 30 groups, there was no significant difference in root biomass, but there were significant differences between these groups and the other mesh sizes. The highest root biomass of kok-saghyz plants screened with sieve No. 28 was 7.2 g/m². As the sieve mesh number increased, the root biomass gradually decreased, and the root biomass of plants screened with No. 35 was the lowest at 5.7 g/m² (Fig. 4, B; Fig. 5). There were significant differences in rubber yield of kok-saghyz plants screened by sieves with different meshes. As the mesh number of the sieve increased, the pore size reduced, and the rubber yield of kok-saghyz gradually decreased, with the highest rubber yield of sieve No. 28 plants

Table. Growth period of kok-saghyz plants grown from seeds screened through sieves with different meshes
Таблица. Продолжительность фаз развития растений кок-сагыза, выращенных из семян, отсортированных ситами с разным размером ячеек

Sieve sizes	Seedling stage	Leaf stage	First flowering stage	Blooming stage	Fruiting stage
28 meshes	April 20 – May 11	May 12 – May 27	May 25 – June 12	June 13 – June 28	June 16 – Sept. 28
30 meshes	April 20 – May 12	May 13 – May 29	May 27 – June 14	June 15 – July 2	June 19 – Sept. 29
32 meshes	April 20 – May 11	May 12 – June 3	June 2 – June 17	June 18 – July 4	June 21 – Oct. 3
35 meshes	April 20 – May 13	May 14 – June 4	June 3 – June 15	June 16 – July 16	June 20 – Oct. 2

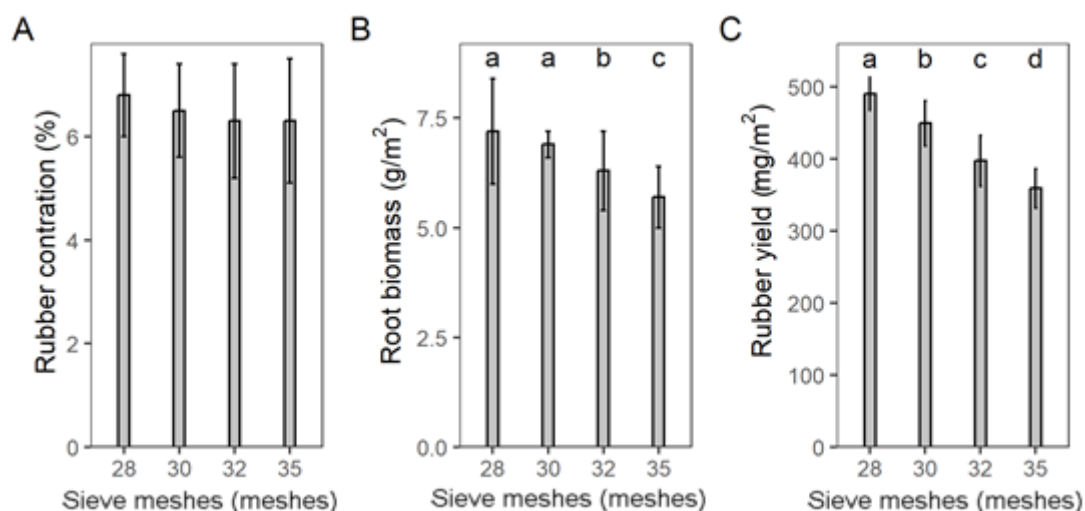


Fig. 4. Comparisons of rubber concentration, root biomass, and rubber yield of kok-saghyz plants grown from seeds screened through sieves with different meshes (A – rubber concentration; B – root biomass; C – rubber yield)

Рис. 4. Сравнение концентрации каучука, биомассы корней и выхода каучука у растений кок-сагыза, полученных из семян, отсортированных ситами с разным размером ячеек (А – концентрация каучука; В – биомасса корней; С – выход каучука)

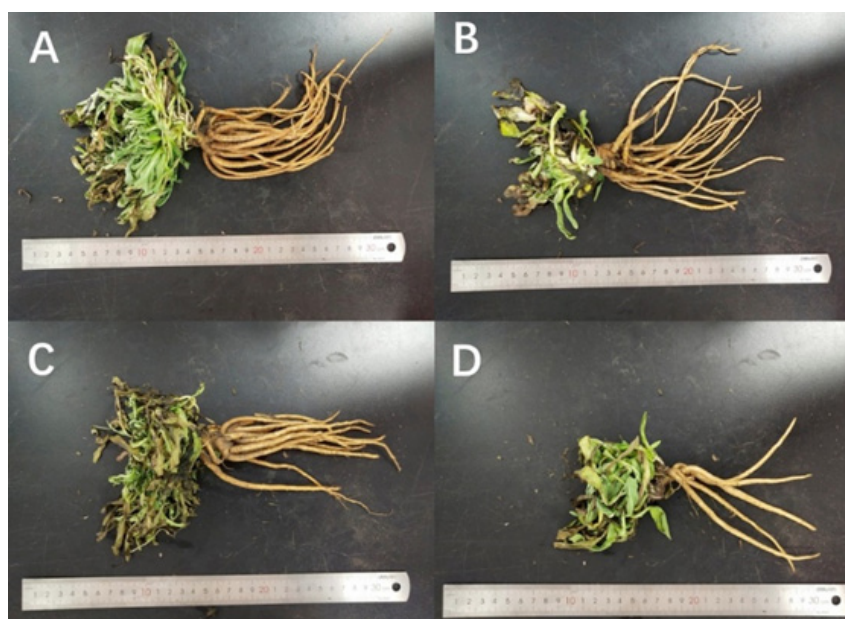


Fig. 5. External appearance of the roots of plants obtained from seeds of different fractions (A – 28 meshes; B – 30 meshes; C – 32 meshes; D – 35 meshes)

Рис. 5. Внешний вид корней растений, полученных из семян разных фракций (А – фракция сита № 28; В – № 30; С – № 32; D – № 35)

being 490 mg/m², and the lowest rubber yield of sieve No. 35 plants being 359 mg/m² (Fig. 4, C).

After kok-saghyz seeds were screened, seeds of different sizes were obtained. Large seeds had a higher germination rate, larger root biomass, and greater rubber yield. Therefore, screening and grading of kok-saghyz seeds proved an effective way to increase the crop's rubber yield. Previous studies also showed that seed size was one of the physical indicators of seed quality. Generally, large seeds performed better than small seeds in the field (Ambika et al., 2014). Large wheat seeds grew more vigorously and had higher biomass and yield (Moussavi Nik et al., 2011; Aboye, 2021). For example, wheat seed size was positively correlated with seed vitality, and large seeds were more likely to produce strong seedlings (Ries, Everson, 1973); the seed germination rate and seedling vitality index of rice were positively correlated with seed size (Roy et al., 1996); peanuts exhibited a high germination percentage in large and medium-sized seeds, and their yield increased with seed size (Trivedi, Bhatt, 1994; Sibuga, Nsenga, 2003); the germination rate, seedling length, seedling vitality, and dry weight of large sunflower seeds were positively correlated with seed size (Nagaraju, 2001); large soybean seeds in tropical regions had higher yields (Adebisi et al., 2012); plants with large seeds of elite maize lines also demonstrated higher seed quality and yield (Adejare, 2010). Other germination indicators of large kok-saghyz seeds, such as germination rate and germination consistency, did not differ from those of small seeds.

The kok-saghyz seeds screened through sieves No. 28 and No. 30 accounted for about 90% of the total weight, and there was no difference in the germination rate of seeds screened through sieves No. 32 and No. 35. Sieve No. 30 could simultaneously screen the seeds retained by No. 28, and No. 35 can simultaneously screen the seeds retained by the 32-mesh sieve. Therefore, in production practice, sieves No. 30 and No. 35 can be used directly to divide kok-saghyz seeds into two grades to improve work efficiency.

Conclusion

In this study, a method for sorting and grading the quality of kok-saghyz seeds using four sieves (Nos. 28, 30, 32, and 35, with different aperture sizes of 0.83, 0.60, 0.50, and 0.43 mm, respectively) was established. Among the sieved groups, based on weight, sieve No. 28 retained 56.6% of the seeds, No. 30 retained 33.9%, No. 32 retained 7.0%, and No. 35 retained 2.4%. The germination percentages of kok-saghyz seeds retained by sieves No. 28 and No. 30 were significantly different from those retained by No. 35 ($\alpha = 0.05$). The differences in germination percentage among the other mesh sizes were not significant; the germination rates and germination consistency across all sieves were not significantly different as well.

The growth period of kok-saghyz plants grown from seeds screened through sieves with different mesh sizes generally increased as the mesh number increased, and the growth period was delayed by 1 to 4 days.

There were significant differences in the rubber yield of kok-saghyz plants grown from seeds screened through sieves with different mesh numbers. As the mesh number increased (i.e., as the pore size reduced), the rubber yield of kok-saghyz plants gradually decreased. The highest rubber yield, obtained from plants grown from seeds retained by sieve No. 28, was 490 mg/m², while the lowest rubber yield, obtained with sieve No. 35, was 359 mg/m².

References / Литература

- Aboye A.D. Review study on the effect of different varieties seed size to yields and economic benefits of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) crop. *International Journal of Agricultural Economics*. 2021;6(6):276-290. DOI: 10.11648/j.ijae.20210606.15
- Adebisi M.A., Kehinde T.O., Salau A.W., Okesola L.A., Porbeni J.B.O., Esuruoso A.O. et al. Influence of different seed size fractions on seed germination, seedling emergence and seed yield characters in tropical soybean (*Glycine max* L. Merrill). *International Journal of Agricultural Research*. 2012;8(1):26-33. DOI: 10.3923/ijar.2013.26.33
- Adejare K.O. Effect of seed size and shape on field performance of tropical maize (*Zea mays* L.) varieties. Project report. Abeokuta, Nigeria: Department of Plant Breeding and Seed Technology, Federal University of Agriculture; 2010.
- Ambika S, Manonmani V, Somasundar G. Review on effect of seed size on seedling vigour and seed yield. *Research Journal of Seed Science*. 2014;7(2):31-38. DOI: 10.3923/rjss.2014.31.38
- Arias M., Herrero J., Ricobaraza M., Hernández M., Ritter E. Evaluation of root biomass, rubber and inulin contents in nine *Taraxacum kok-saghyz* Rodin populations. *Industrial Crops and Products*. 2016;83:316-321. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.01.023
- Dadlani M, Yadava D.K. (eds). Seed science and technology: Biology, production, quality. Singapore: Springer; 2023. DOI: 10.1007/978-981-19-5888-5
- Kavita S.R., Yogeesh H.S. Optimisation of sieve size for grading seeds of pole type French bean cv. Arka Sukomal. *Mysore Journal of Agricultural Sciences*. 2022;56(2):179-186.
- Luo S. Russian dandelion. Beijing: Chinese Academy of Sciences Press; 1951.
- Moussavi Nik M., Babaeian M., Tavassoli A. Effect of seed size and genotype on germination characteristic and seed nutrient content of wheat. *Scientific Research and Essays*. 2011;6(9):2019-2025. DOI: 10.5897/SRE11.621
- Nagaraju S. Influence of seed size and treatments on seed yield and seed quality of sunflower cv. Morden [dissertation]. Dharwad: University of Agricultural Sciences; 2001.
- Polhamus L.G. Rubber: botany, production and utilization. London: Leonard Hill; 1962.
- R Core Team. The R project for statistical computing: [website]. Available from: <https://www.r-project.org> [accessed Jan. 28, 2026].
- Ramirez Cavidad D., Cornish K., McMahan C., Michel Jr. C. Alkaline pretreatment of *Taraxacum kok-saghyz* (TK) roots for the extraction of natural rubber (NR). *Biochemical Engineering Journal*. 2022;181:108376. DOI: 10.1016/j.bej.2022.108376
- Ramirez D.A., Cornish K., Michel F.C. *Taraxacum kok-saghyz* (TK): Compositional analysis of a feedstock for natural rubber and other bioproducts. *Industrial Crops and Products*. 2017;107:624-640. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.05.043
- Ries S.K., Everson E.H. Protein content and seed size relationships with seedling vigor of wheat cultivars. *Agronomy Journal*. 1973;65(6):884-886. DOI: 10.2134/agronj1973.00021962006500060011x
- Roy S.K.S., Hamid A., Giashuddin Miah M., Hashem A. Seed size variation and its effects on germination and seedling vigour in rice. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 1996;176(2):79-82. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1996.tb00449.x

- Sharma L.K., Kulkarni G.U., Vaddoria M.A., Mandavia C.K., Singh S.P. Seed size: Relation to seed quality and seed yield – A review. *Frontiers in Crop Improvement*. 2013;1(2):101-108.
- Sibuga K.P., Nsenga J.V. Effect of seed size on yield of two groundnut genotypes. *Tropical Science*. 2003;43(1):22-27. DOI: 10.1002/ts.83
- Singh B.D. Plant breeding: Principles and methods. 4th ed. New Delhi: Kalyani Publishers; 2011.
- Trivedi M.L., Bhatt P.H. The physiology of seed germination in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cultivar GG-2. I. Effect of seed size. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 1994;172(4):265-268. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1994.tb00177.x
- Vakhrusheva T.E. Descriptors for the rubber-yielding species *Taraxacum kok-saghyz* Rodin. (Russian dandelion) (Klassifikator kauchukonosnogo vida *Taraxacum kok-saghyz* Rodin. [Oduvanchik kok-sagyz]). St. Petersburg: VIR; 1992. [in Russian] (Вахрушева Т.Е. Классификатор каучуконосного вида *Taraxacum kok-saghyz* Rodin. (Одуванчик кок-сагыз). Санкт-Петербург: ВИР; 1992).
- Whaley W.G., Bowen J.S. Russian dandelion (kok-saghyz): an emergency source of natural rubber. Washington, DC: USA Department of Agriculture; 1947.

Information about the authors

- Guang Shen**, Ph. D., Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, 103 Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, shen19772@163.com, <https://orcid.org/0000-0001-5320-6465>
- Lin Zhou**, M. Sc., Associate Researcher, Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, 103 Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, 1016393991@qq.com, <https://orcid.org/0000-0002-9695-417X>
- Wentian Zhang**, M. Sc., Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, 103 Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, swxzw@126.com, <https://orcid.org/0000-0001-6877-3518>
- Fuyun Zheng**, M. Sc., Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, 103 Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, zhengfuyun@163.com, <https://orcid.org/0000-0002-8966-5230>
- Zhang Yu**, M. Sc., Northeast Forestry University, College of Landscape Architecture, 26 Hexing Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, 87364962@qq.com, <https://orcid.org/0009-0009-2867-860X>
- Yihua Yang**, M. Sc., Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, 103 Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, yyh_1975@163.com, <https://orcid.org/0009-0008-6644-6060>
- Nina G. Kon'kova**, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.konkova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4920-3904>

Информация об авторах

- Гуан Шень**, доктор философии, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, 103, shen19772@163.com, <https://orcid.org/0000-0001-5320-6465>
- Линь Чжоу**, магистр, младший научный сотрудник, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, 103, 1016393991@qq.com, <https://orcid.org/0000-0002-9695-417X>
- Вэньтянь Чжан**, магистр, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, 103, swxzw@126.com, <https://orcid.org/0000-0001-6877-3518>
- Фуюн Чжэн**, магистр, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, 103, zhengfuyun@163.com, <https://orcid.org/0000-0002-8966-5230>
- Чжан Юй**, магистр, Колледж ландшафтной архитектуры Северо-Восточного лесотехнического университета, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хэсин, 26, 87364962@qq.com, <https://orcid.org/0009-0009-2867-860X>
- Ихуа Ян**, магистр, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, 103, yyh_1975@163.com, <https://orcid.org/0009-0008-6644-6060>
- Нина Григорьевна Конькова**, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, n.konkova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4920-3904>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.02.2026; одобрена после рецензирования 06.07.2026; принята к публикации 14.09.2026. The article was submitted on 25.02.2026; approved after reviewing on 06.07.2026; accepted for publication on 14.09.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Обзорная статья

УДК 631.527:633.11:004.65

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-018



Принципы структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР

Е. В. Зуев

*Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия***Автор, ответственный за переписку:** Евгений Валерьевич Зуев, e.zuev@vir.nw.ru

Мировой генофонд яровой мягкой пшеницы в Коллекции ВИР на конец 2025 г. содержит 15 946 образцов в основном каталоге и 1273 – в интродукционном, включая ценнейший исходный материал для успешного решения традиционных и вновь возникающих проблем в селекции данной культуры. Для эффективного подбора исходного материала необходимы систематизация и классификация генетических ресурсов для сохранения биоразнообразия, их устойчивого использования в фундаментальных и прикладных исследованиях.

В работе даны определения интегрированному структурированию коллекции и различным типам коллекций – биологическая (биоресурсная), рабочая, генетическая, прецизионная, признаковая, региональная, специальная, стержневая, демонстрационная.

В процессе интегрированного структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР были выделены этапы работы: (1) актуализация базы паспортных данных (БПД); (2) формирование генетической коллекции; (3) создание баз оценочных данных (БОД); (4) идентификация образцов по спектрам глина; (5) создание рабочей (актуальной) коллекции яровой мягкой пшеницы. Работа по отдельным этапам разбивалась на блоки.

Разработанные принципы и подходы к формированию рабочей (активной) коллекции яровой мягкой пшеницы в качестве модели можно распространить/применить к другим культурам мировой коллекции.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., база паспортных данных, генетическая коллекция, полевое и лабораторное изучение, базы оценочных данных, рабочая (активная) коллекция

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации Программы развития Национального центра генетических ресурсов растений по соглашению с Минобрнауки России № 075-02-2026-1649 от 01.04.2026.

Автор благодарит доктора биологических наук, члена-корреспондента РАН Елену Константиновну Хлесткину за ценные замечания и обсуждение в ходе подготовки работы.

Для цитирования: Зуев Е.В. Принципы структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):102-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-018

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, автору и его/ее месту работы.

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Review article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o18

Principles of structuring VIR's spring bread wheat collection

Evgeny V. Zuev

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia***Corresponding author:** Evgeny V. Zuev, e.zuev@vir.nw.ru

As of the end of 2025, there were 15,946 accessions of spring bread wheat listed in the main catalogue of the VIR global collection, and 1,273 in the plant introduction catalogue. This diversity is valuable source material for wheat breeding, capable of solving its conventional and novel problems. Effective selection of such sources requires systematization and classification of the genetic diversity for its conservation and sustainable utilization in fundamental and applied research.

Definitions are given for collection structuring, and various types of collections: biological (bioresource), working, genetic, precision, trait-specific, regional, special, core, and demonstration collections.

The integrated structuring of VIR's spring bread wheat collection was divided into the following stages: (1) updating the passport database (PDB); (2) forming a genetic collection; (3) building up evaluation databases (EDB); (4) identifying accessions by their gliadin patterns; (5) establishing a working (active) spring bread wheat collection. The work on individual stages was subdivided into blocks.

The developed principles and approaches to the formation of a working collection of spring bread wheat may serve as a model and can be extended/applied to other crops in the global collection.

Keywords: *Triticum aestivum* L., plant passport database, genetic collection, field and laboratory studies, plant evaluation databases, working (active) collection

Acknowledgments: this work was carried out as part of the Development Program for the National Center for Plant Genetic Resources under Agreement No. 075-02-2026-1649 of April 1, 2026, with the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

The author is grateful to Elena K. Khlestkina, Doctor of Biological Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, for valuable comments and discussions during the preparation of this manuscript.

For citation: Zuev E.V. Principles of structuring VIR's spring bread wheat collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):102-115. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o18

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the author or and his/her employers.

Введение

Академик Николай Иванович Вавилов положил начало системному созданию, формированию, сохранению, развитию, изучению и использованию «мировой коллекции растительных ресурсов Всесоюзного института растениеводства» (ныне – Коллекция мировых генетических ресурсов культурных растений и их диких родичей, Коллекция ВИР) (Khlestkina et al., 2026b). В результате детального изучения истории мирового земледелия и проведенных на различных континентах экспедиций по ознакомлению с видовым и сортовым разнообразием, их сбору и предварительному изучению, на основании обобщений проведенных исследований Н. И. Вавилов сделал крупнейшие открытия. Были установлены центры происхождения (формообразования) культурных растений и закономерности географической изменчивости при расселении растений от центра к периферии, выявлены новые виды и разновидности (Vavilov, 1920, 1927, 1935a, 1935b, 1964).

В современном мире с растущим населением планеты, меняющимся климатом, постоянно изменяющимися свои ареалы вредителями и фитопатогенами, усугубляющимся дефицитом природных ресурсов, перестраиванием глобальных финансовых, логистических и производственных систем, ростом геополитической и экономической нестабильности как никогда важно устойчивое формирование, сохранение, развитие, изучение и использование коллекций генетических ресурсов (ГРР).

Мировой генофонд яровой мягкой пшеницы в Коллекции ВИР (далее – «коллекция яровой мягкой пшеницы ВИР», «коллекция пшеницы») на конец 2025 г. содержит 15 946 образцов в основном каталоге и 1273 – в интродукционном. В основном каталоге коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР имеются образцы из 99 стран мира. Первые 47 образцов были включены в коллекцию в 1907–1916 гг. Сохранены значительные довоенные сборы прошлого века (1921–1941) в количестве 4762 образцов. Большинство образцов (8998) привлечены в коллекцию в 1945–1991 гг. С 1992 г. начался российский этап формирования коллекции пшеницы, поступили 2103 единицы хранения. В коллекции сохраняются местные сорта (6317), селекционные сорта (4699), а также разнообразный селекционный (4464 селекционные линии) и исследовательский (323 генетические линии) материал.

Успешное решение традиционных и вновь возникающих проблем селекции яровой мягкой пшеницы возможно лишь при наличии соответствующего исходного материала. Имеющееся в коллекции генетическое разнообразие широко используется в селекционной работе и теоретических исследованиях (Malokostova et al., 2016; Amunova et al., 2021; Sochalova et al., 2023; Barkovskaya et al., 2024).

По мере усложнения селекционных задач возрастают требования к степени изученности исходного материала. Практика убедительно свидетельствует о необходимости ускоренного выявления в мировой коллекции источников ценных признаков и доноров. В последние годы селекционеры вновь обращаются к местным стародавним сортам пшеницы, обладающим уникальными хозяйственно ценными признаками, сформировавшимся в результате длительной народной селекции.

Структурирование генофонда яровой мягкой пшеницы в ВИР началось в 2000 г. Целью работы было собрать

и компьютеризировать всю доступную информацию об образцах коллекции: паспортные данные, данные полевого и лабораторного изучения и др. (описательные данные, оценочные данные) и создать рабочую коллекцию «для эффективного обеспечения задач изучения нового интродуцированного материала и потребностей прикладной и фундаментальной науки в исходном материале» (Merezhko et al., 1999, p. 17).

В последнее время в нашей стране произошли значительные события в сфере работы с коллекциями генетических ресурсов растений и с биоресурсными коллекциями в целом: в 2022 г. Президент Российской Федерации своим Указом № 44 «О Национальном центре генетических ресурсов растений» образовал на базе ВИР первый в стране национальный биоресурсный центр (Decree of the President..., 2022); в 2024 г. издан федеральный закон № 428-ФЗ, регулирующий отношения в области создания, формирования, сохранения, развития, изучения и использования биологических (биоресурсных) коллекций (Federal Law No. 428-FZ..., 2024), а с 2023 г. реализуется утвержденная Правительством Российской Федерации Программа развития Национального центра генетических ресурсов растений на 2023-2030 годы (далее – Программа) (Directive of the Government..., 2023).

Результаты деятельности по структурированию мирового генофонда яровой мягкой пшеницы Коллекции ВИР, начатой автором настоящего исследования за несколько лет до старта Программы, с одной стороны, явились мощным заделом для ее успешной реализации в части работы с особо ценными образцами генетических ресурсов пшеницы. С другой стороны, само исследование получило новый импульс с началом реализации Программы и поставленных в ней задач по развитию национального каталога особо ценных образцов генетических ресурсов растений.

Цель работы – описать этапы структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР для более эффективного ее сохранения, развития, изучения и использования.

Структурирование биологических коллекций: понятийный аппарат

В структурировании коллекций генетических ресурсов растений выделяют несколько иерархических уровней: по принадлежности к группам культур/видов (первый уровень), или отдельным культурам/видам (второй уровень), или выборкам в пределах генофонда культуры/вида (третий уровень), или независимо от принадлежности к группе культур/видов (структурирование в соответствии со статусами образцов коллекции). Первые два уровня структурирования являются, по сути, «линейными»: например, структурирование Национальной коллекции генетических ресурсов растений предполагает 8 групп культур. В группе «Зерновые» выделяют яровая пшеница мягкая, озимая пшеница мягкая и т. п. Линейное структурирование удобно для закрепления ответственных лиц – кураторов коллекций. Куратор биологической (биоресурсной) коллекции – научный работник, который отвечает за выполнение комплекса научно-исследовательских работ, связанных с созданием, формированием, сохранением, развитием, изучением и использованием биологической (биоресурсной) коллекции или части биологической (биоресурсной) коллекции (Khlestkina et al., 2026a). Линейным является

и более глубокое структурирование по статусам (местный сорт, селекционный сорт и т. д. (см. методические указания, Ukhatoeva et al., 2026b)).

Куратор, за которым закреплена часть коллекции (в случае части Коллекции ВИР – это мировой генофонд той или иной культуры), далее ведет уже более глубокое, не только линейное, но более сложное структурирование, за которым предложено закрепить понятие «Интегрированное структурирование». Интегрированное структурирование биологической (биоресурсной) коллекции – методологический принцип организации работы с биологической (биоресурсной) коллекцией, который предполагает объединение различных компонентов (образцов и групп образцов, информации о них, методов работы с ними и т. д.) в единое целое для создания более целостной, системной и эффективной организации работы с коллекцией. Определение понятия интегрированного структурирования в применении к коллекциям ГРП сформировалось на основе многолетних исследований мирового генофонда яровой мягкой пшеницы с 2000 по 2026 г. (Zuev, 2008; Mitrofanova et al., 2012; Zuev et al., 2018, 2019b, 2024; Tyryshkin et al., 2022) и закреплено в понятийном аппарате (Khlestkina et al., 2026a). Методологический принцип организации работы с мировым генофондом мягкой пшеницы, заложивший основу для подходов к интегрированному структурированию, рекомендуется для применения к мировым генофондам других культур Коллекции ВИР, а также к другим коллекциям ГРП.

Одним из основных результатов интегрированного структурирования мирового генофонда той или иной культуры является выделение его части в так называемую рабочую (активную) коллекцию мирового генофонда.

Рабочая (активная) коллекция мирового генофонда – сформированная для поддержания в активном хранении совокупность образцов мирового генофонда конкретной культуры, структурированная по принципу принадлежности образцов к новому интродуцированному материалу, к стержневой, признаковому, специальным признаковым, региональным признаковым, генетическим, прецизионным и демонстрационным коллекциям с целью эффективного обеспечения текущих потребностей, имеющих в научной, научно-технической и (или) образовательной деятельности.

Следует отметить, что структурирование мирового генофонда яровой мягкой пшеницы не ограничивается целью создания «статичной» рабочей (активной) коллекции, которая служила бы решению сиюминутных задач, стоящих перед исследователями и селекционерами. Рабочая (активная) коллекция – динамично развивающийся перечень образцов. Практическое применение многих образцов может реализоваться не сейчас и не в ближайшем, а в отдаленном будущем (в будущих изменившихся экологических, технологических, экономических условиях). Таким образом, в дополнение к формированию рабочей (активной) коллекции перед куратором коллекции, осуществляющим структурирование мирового генофонда, стоит задача и по созданию каталога особо ценных образцов генетических ресурсов в рамках Программы развития Национального центра генетических ресурсов растений на 2023-2030 годы (Directive of the Government..., 2023).

Современное структурирование генофонда яровой мягкой пшеницы должно содействовать оперативному отбору и предоставлению исследователям материалов

структурированных наборов образцов для генетических и геномных исследований. В части структурирования генофонда яровой мягкой пшеницы для удовлетворения заявок селекционеров необходимо учитывать основные направления работы: создание сортов с комплексной устойчивостью к абиотическим и биотическим факторам среды, улучшение качества зерна, адаптация к конкретным почвенно-климатическим условиям возделывания, селекция биофортифицированных сортов. Остаются актуальными источники скороспелости, крупнозерности, высокой урожайности, устойчивости к новым агрессивным расам грибных болезней пшеницы, засухоустойчивости, алюмоустойчивости.

Принципы/этапы структурирования мирового генофонда яровой мягкой пшеницы в Коллекции ВИР

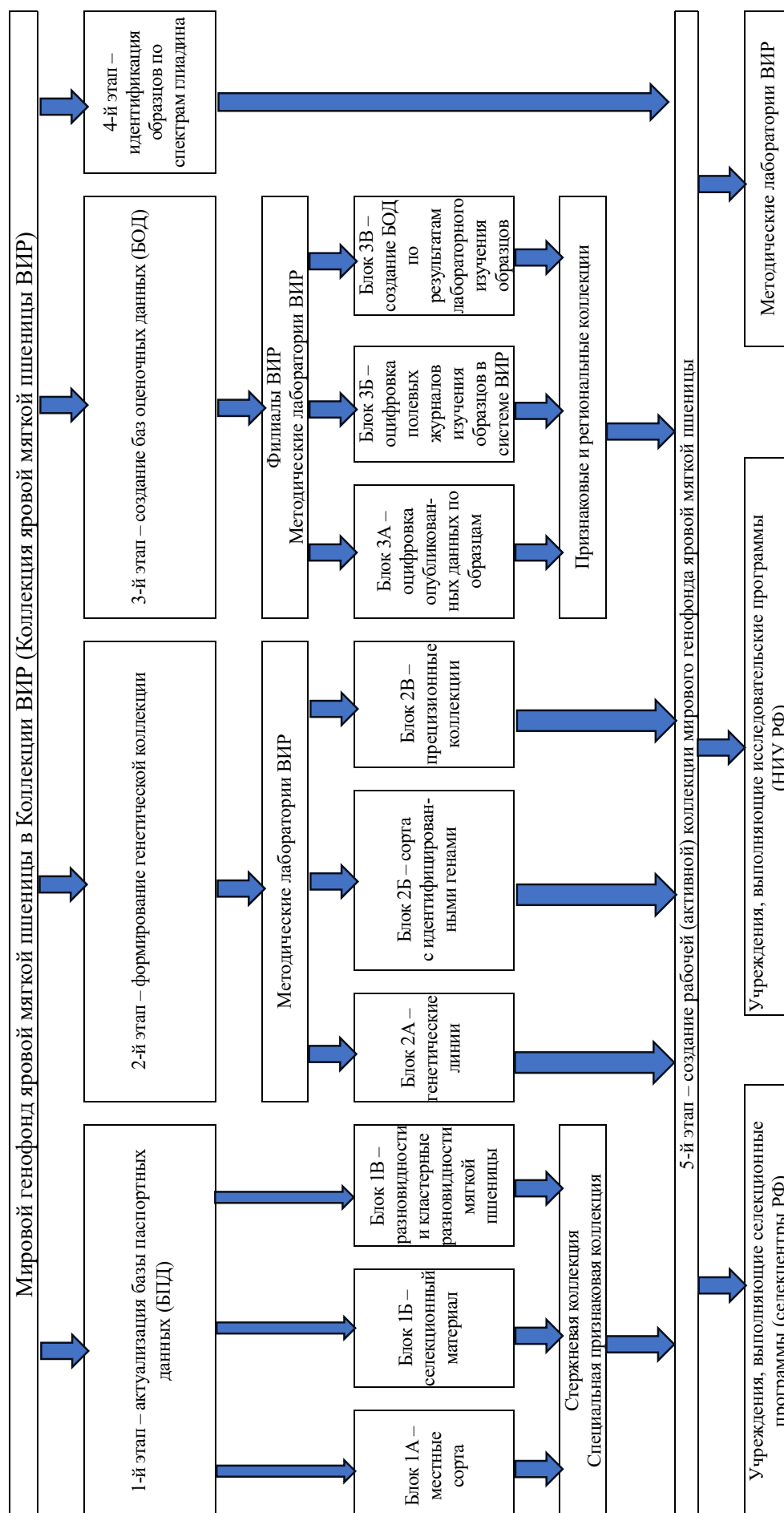
Поставленные в настоящем исследовании задачи по совершенствованию базы паспортных данных коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР, комплексному изучению образцов из новых поступлений, выявлению закономерностей проявления хозяйственно ценных признаков и в целом по созданию инструментов для описательной, диагностической и прогностической аналитики мирового генофонда яровой мягкой пшеницы в пространственно-временных процессах – это необходимая основа для формирования национального каталога особо ценных образцов генетических ресурсов растений.

В процессе интегрированного структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР были выделены этапы работы: (1) актуализация базы паспортных данных (БПД); (2) формирование генетической коллекции; (3) создание баз оценочных данных (БОД); (4) идентификация образцов по спектрам глиадины; (5) создание рабочей (актуальной) коллекции яровой мягкой пшеницы. Работа по отдельным этапам разбивалась на блоки (рисунк).

1-й этап – актуализация базы паспортных данных (БПД) коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР

На первом этапе была проведена работа по созданию расширенной БПД «Яровая мягкая пшеница» с учетом унифицированных международных дескрипторов (<https://www.ecpgr.org/resources/descriptors-technical-bulletins>; Ukhatoeva et al., 2026a) и дополнительными авторскими наработками. В результате число дескрипторов (полей) в БПД яровой мягкой пшеницы возросло с 15 до 59, 21 из которых является оригинальным: 1) синоним названия образца; 2) страна происхождения, трехбуквенный код ISO; 3) примечание к полю «Происхождение»; 4) учреждение-оригинатор, код FAO; 5) примечание к полю «Место сбора образца»; 6) высота над уровнем моря, определенная с помощью ГИС-технологий; 7) точность определения координат; 8) страна-донор, трехбуквенный код ISO; 9) откуда поступил образец (на русском); 10) откуда поступил образец (на английском); 11) учреждение-донор, код FAO; 12) институт, проводивший экспедицию, код FAO; 13) собиратель (на русском); 14) собиратель (на английском); 15) статус образца, код отдела ГР пшеницы; 16) тип развития, код отдела ГР пшеницы; 17) доступность образца; 18) год (годы) реализации сорта; 19) селекционер; 20) краткая характеристика образца; 21) кластерная новизна.

Рисунок. Схема интегрированного структурирования коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР
Figure. Integrated structuring scheme of VIR's spring bread wheat collection



Блок 1А – местные сорта

Для 6318 стародавних сортов и популяций яровой мягкой пшеницы была введена следующая информация: место сбора (название населенного пункта или местности, высота над уровнем моря, географические координаты); даты проведения сборов; фамилии ученых, принимавших участие в экспедициях; сведения об учреждениях-донорах для образцов, полученных по выписке. Эти данные послужили для написания монографии «Местные яровые мягкие пшеницы в мировой коллекции ВИР» (Zuev, 2008).

При наличии информации о географических координатах точка сбора образца местного сорта наносится на цифровые почвенные, климатические и другие карты. В результате можно получить довольно полную информацию о месте произрастания стародавнего сорта. Используя эти данные, установив критерии отбора, можно выделить образцы, потенциально устойчивые к абиотическим и биотическим факторам среды. Возможно также построение карт ареалов распространения образцов, распределения признаков, маршрутов экспедиций. В ВИР коллекция местных яровых мягких пшениц представлена образцами в основном из стран с влажным климатом. Места сборов местных сортов характеризуются 79 типами различных почв, из которых наиболее представлены: литосоли, черноземы южные и выщелоченные, дерново-подзолистые, каштановые, бурые тропические почвы, бурые лесные. В коллекции имеются 402 образца, которые были собраны на участках, где вероятность засоления оценена от 50 до 100%. Больше половины образцов из коллекции произрастали на равнинной местности (до 500 м), а четверть (25%) – в местах с высотами от 501 до 1000 м н. у. м.

Данные по идентифицированным местам сбора местных сортов пшеницы использовались при выполнении международного проекта – FIGS (Focused Identification of Germplasm Strategy – Целенаправленная стратегия идентификации генетического материала) в 2004-2012 гг. В проекте принимали участие: ВИР (Россия), ICARDA (Сирия¹) и Австралийская коллекция озимых злаков (AWCC, Тамуэрт, Австралия). В основу гипотезы легло предположение, что при отборе местных образцов пшеницы из мест с известными климатическими и почвенными характеристиками с учетом критериев отбора по лимитирующим признакам можно получить лучший результат по сравнению с выборками, применяемыми при формировании стержневых коллекций².

Были сформированы и оценены наборы местных сортов, выделенные из объединенной базы трех перечисленных выше генбанков: стержневая коллекция (путем отбора по происхождению и году сбора образцов), специальная признаковая коллекция по засухоустойчивости (отбор образцов из мест выращивания на богаре (без полива) при 180–300 мм осадков в год), специальная признаковая коллекция по солеустойчивости (отбор образцов из мест выращивания при засолении почвы свыше 50%). Каждая выборка состояла из 400 образцов. Засухоустойчивость оценивали в Сирии на полях ICARDA на двух фонах: полив и богара. Оценку солеустойчивости проводили в лаборатории физиологии ВИР при выращи-

¹ Локализация международного генбанка ICARDA на момент выполнения проекта.

² Стержневая коллекция – минимальная репрезентативная выборка образцов определенного вида из конкретной биологической (биоресурсной) коллекции, максимально полно отражающая генетическое разнообразие образцов данного вида в данной коллекции.

вании пшеницы в контролируемых условиях (температура, фотопериод) на гидропонном субстрате (кварцит) в растворе 100 мМ NaCl (Munns, James, 2003). Данные по стержневому набору сравнивали с данными специальных наборов. Во всех случаях в специальных наборах было выявлено большее количество источников изучаемых признаков, чем в стержневой коллекции. Все изученные наборы целиком включены в рабочую (активную) коллекцию яровой мягкой пшеницы как специальные признаковые коллекции. За понятием «Специальная признаковая коллекция» закреплено определение: «признаковая коллекция, редуцированная за счет применения дополнительных критериев или специальных методик отбора, предназначенная для специальных исследовательских/селекционных программ» (Khlestkina et al., 2026a, p. 99).

Приведенный выше пример иллюстрирует, как происходит первый этап формирования рабочей (активной) коллекции мирового генофонда. На этом же этапе ведутся еще 2 блока работ.

Блок 1Б – селекционный материал

Для селекционных сортов и линий проведена сверка с паспортными базами данных 34 генбанков мира. Наиболее ценные данные получены из американского (National Small Grain Collection, NSGC), немецкого (Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, IPK), чешского (Czech Agrifood Research Center) и канадского (Research Centre Agriculture and Agri-Food Canada) генбанков. Для 589 образцов кардинально изменено происхождение, для 7076 образцов уточнено происхождение до уровня «провинция».

Отредактированы названия сортов, в БПД введены номера каталогов зарубежных генбанков для образцов коллекции ВИР. В настоящее время поле дескриптора «Номер каталога учреждения донора» заполнено для 3269 образцов, поле «Другие номера каталогов» – для 3801 образца. Установлено, что 63,6% образцов хранятся только в коллекции ВИР. Из генбанка США (NSGC) получены 933 образца яровой мягкой пшеницы, из австралийского генбанка (AWCC) – 333, из Германии (IPK) – 250, из Чехии – 238, из Украины – 161, Канады – 100. В зарубежных генбанках представлены 424 российских сорта.

Поле дескриптора «Родословная» заполнено для 7049 образцов, 1716 российских сортов и линий имеют данные о родословных, что составляет 78% от общего количества селекционного материала РФ.

Проведена работа по заполнению поля дескриптора «учреждение-оригинатор», 7461 образец имеет данную информацию. Практически для всех российских сортов и линий имеются данные по этому дескриптору.

Для российских сортов, включенных в Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию (<https://gossortrf.ru>), и бывших в районировании, введены дополнительные коды статуса образца отдела ГР пшеницы: нерелизванный сорт; реализованный сорт; современный сорт, включенный в Госреестр РФ; районированный местный сорт. Для этой группы образцов дополнительно имеется информация «Годы районирования», «Селекционер». В биоресурсной коллекции ВИР хранятся 349 сортов яровой мягкой пшеницы, включенные в Государственный реестр, российские сорта, снятые с районирования (302), реализованные сорта ближнего и дальнего зарубежья с уникальными родословными (1042).

Эти наработки на пшенице легли в основу составления перечня унифицированных (то есть применимых к другим культурам) статусов, описанных в методических указаниях по оценке и критериям отбора для формирования национальной коллекции особо ценных образцов генетических ресурсов растений (Ukhatova et al., 2026b).

Блок 1В – разновидности и кластерные разновидности мягкой пшеницы

В «Атласе разнообразия мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по признакам колоса и зерновки» (Zuev et al., 2019a) предложен универсальный способ описания и быстрого запоминания разнообразия форм мягкой пшеницы по морфологическим признакам колоса и зерновки для практической работы.

Основу системы описания составляют наиболее часто встречающиеся комплексы морфологических признаков колоса и зерновки у мягкой пшеницы, за которыми сохранены названия соответствующих им разновидностей (табл. 1). Для описания образца, обладающего одним из таких комплексов признаков, но в комбинации с другими, используют сокращенные латинские названия этих признаков, которые добавляют к названию основного комплекса: цвет зерна (фиолетовый – *violaceo*–; зеленый – *virido*–); цвет колосковой чешуи (белый или красный в комбинации с черным (черно-синим), который проявляется в центральной части колосковой чешуи – *nigro*–; белый или красный в комбинации с черным по краю колосковой чешуи – *maesto*–; белый или красный в комбинации с серо-дымчатым (сизым), который проявляется в центральной части колосковой чешуи – *glauco*–);

укороченные ости (*sub*–); черные ости (*pseudo*–). Данные комплексы морфологических признаков в дальнейшем получили название «кластерная разновидность». Информация о кластерных разновидностях была добавлена в БПД для каждого образца яровой мягкой пшеницы.

2-й этап – формирование генетической коллекции яровой мягкой пшеницы

Генетическая коллекция – выделенная в пределах конкретной биологической (биоресурсной) коллекции совокупность образцов, относящихся к одному и тому же или близким таксонам, и включающая образцы с идентифицированными генами либо генными комплексами, проявление и наследование которых известны; специально созданный при помощи экспериментальных методов генетики набор близкородственных линий, отличающихся по отдельным генам/участкам генома (Khlestkina et al., 2026a).

Блок 2А – генетические линии

В коллекции яровой мягкой пшеницы хранится 323 образца со статусом «Генетическая линия», среди них следует отметить: 14 почти изогенных линий с генами устойчивости к стеблевой ржавчине (*Sr*) на основе сорта 'Marquis', созданных в Университете Саскачевана; 41 почти изогенную линию с генами устойчивости к бурой ржавчине (*Lr*) на основе сорта 'Thatcher' из лаборатории по исследованию ржавчины в Виннипеге; 41 аналог сорта 'Новосибирская 67' (АНК), по морфологическим характеристикам от С. Ф. Коваля (Институт цитологии и генетики СО РАН); 39 почти изогенных линий с генами *Vrn*,

Таблица 1. Основные кластерные разновидности мягкой пшеницы

Table 1. Main cluster varieties of bread wheat

Кластерная разновидность / Cluster variety	Наличие остей / Presence of awns	Опушение колосковой чешуи / Glume pubescence	Цвет колосковой чешуи / Glume color	Цвет зерновки / Kernel color
<i>lutescens</i>	нет	нет	белый	красный
<i>milturum</i>	нет	нет	красный	красный
<i>albidum</i>	нет	нет	белый	белый
<i>albirubrum</i>	нет	нет	красный	белый
<i>velutinum</i>	нет	есть	белый	красный
<i>pyrothrix</i>	нет	есть	красный	красный
<i>leucospermum</i>	нет	есть	белый	белый
<i>delfii</i>	нет	есть	красный	белый
<i>erythrospermum</i>	есть	нет	белый	красный
<i>ferrugineum</i>	есть	нет	красный	красный
<i>graecum</i>	есть	нет	белый	белый
<i>erythroleucum</i>	есть	нет	красный	белый
<i>hostianum</i>	есть	есть	белый	красный
<i>barbarossa</i>	есть	есть	красный	красный
<i>meridionale</i>	есть	есть	белый	белый
<i>turcicum</i>	есть	есть	красный	белый

созданных во Всесоюзном селекционно-генетическом институте (г. Одесса, Украина) А. Ф. Стельмахом; 16 почти изогенных линий с генами короткостебельности (*Rht*), созданных в отделе ГР пшеницы Н. П. Лоскутовой и А. Ф. Мережко; 26 линий, различающихся по морфологическим признакам – выполненность/полость соломы, цвет зерна красный/белый, остистость/безостость, – созданных В. А. Крупновым в НИИСХ Юго-Востока; 10 линий – тестеров на твердую головню из Университета штата Орегон; 8 линий, устойчивых к грибным болезням, созданных Е. А. Салиной в Институте цитологии и генетики СО РАН с использованием дигиплоидных технологий и методов маркер-ориентированной селекции; 15 почти изогенных линий сорта 'Avocet' с генами устойчивости к желтой ржавчине (*Yr*), полученных из Сиднейского университета.

Блок 2Б – сорта с идентифицированными генами

Созданная в 1994 г. в отделе пшеницы база данных GENDATA содержит информацию о 1263 образцах яровой мягкой пшеницы, у которых по литературным данным идентифицированы различные гены. В общей сложности эти образцы несут 356 известных генов, контролируемых 78 признаков пшеницы. Наибольшую представленность в базе имеют формы со следующими генами: гибридного некроза (*Ne1*, *Ne2*) – 447 образцов; реакции на яровизацию (*Vrn1*, *Vrn2*, *Vrn3*) – 312; гибридной карликовости (*D1*, *D2*, *D31*, *D4*) – 104; устойчивости к стеблевой ржавчине (44 гена типа *Sr*) – 111; гибридного хлороза (*Ch1*, *Ch2*, *Ch3*) – 34; короткостебельности (13 генов типа *Rht*) – 88; устойчивости к бурой ржавчине (31 ген типа *Lr*) – 62; устойчивости к мучнистой росе (16 генов типа *Pm* и *Mld*) – 39 образцов (Merezhko et al., 1996).

Блок 2В – прецизионные коллекции – наборы генотипированных образцов, сформированные в результате исследовательской программы и включенные в биологическую (биоресурсную) коллекцию при условии обязательного указания результатов генотипирования и сведений об исследовательской программе при его постановке на учет (Khlestkina et al., 2026a). Например, в рабочую (активную) коллекцию яровой мягкой пшеницы включена прецизионная генотипированная коллекция, которая изучалась в рамках Программы создания и развития центра геномных исследований мирового уровня «Агротехнологии будущего» (соглашение с Министерством науки и образования Российской Федерации № 075-15-2022-323 от 21.04.2022). Коллекция в количестве 186 образцов яровой мягкой пшеницы изучалась в течение трех лет в четырех пунктах по морфологическим и хлебопекарным характеристикам (Shvachko et al., 2024).

3-й этап – создание баз оценочных данных (БОД)

Блок 3А – оцифровка опубликованных данных по образцам

При компьютеризации 101 каталога мировой коллекции ВИР, в которых имелась информация об образцах яровой мягкой пшеницы, в 2009 г. были созданы и зарегистрированы 3 БОД.

1. «Результаты оценки коллекции пшеницы ВИР по основным биохимическим, технологическим и хлебопекарным показателям», № 0220913397, автор – Евгений Валерьевич Зуев. БОД содержит информацию об 7737 образцах пшеницы из коллекции ВИР, изученных по основ-

ным биохимическим, технологическим и хлебопекарным показателям в 57 различных пунктах. Наиболее полно представлены данные по следующим показателям: содержание белка в зерне, набухаемость муки в уксусной кислоте, время до начала разжижения теста, валориметрическая оценка, стекловидность зерна, объемный выход хлеба из 100 г муки.

2. «Результаты иммунологической оценки образцов пшеницы коллекции ВИР», № 0220913400, автор – Евгений Валерьевич Зуев. БОД содержит информацию об устойчивости к основным грибным болезням 12 540 образцов пшеницы из коллекции ВИР, изученных в 46 различных пунктах. Наиболее полно представлены данные по полевой устойчивости к мучнистой росе и бурой ржавчине.

3. «Результаты оценки коллекции пшеницы ВИР по основным селекционно значимым признакам», № 0220913401, автор – Евгений Валерьевич Зуев. БОД содержит информацию об 10 842 образцах пшеницы из коллекции ВИР, изученных по основным селекционно значимым признакам в 54 различных пунктах. Наиболее полно представлены данные по массе 1000 зерен, высоте растения, устойчивости к полеганию, продолжительности вегетационного периода, урожайности.

Блок 3Б – оцифровка полевых журналов изучения яровой мягкой пшеницы в системе ВИР

На сегодняшний день обработаны полевые журналы с 23 пунктов изучения, по которым имелись многолетние данные; суммарный объем ввода составил 209 947 записей. Наиболее значимые данные полевого изучения приведены в таблице 2. По таким пунктам изучения, как Дагестанская ОС – филиал ВИР, Екатеринбургская ОС – филиал ВИР, научно-производственная база (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», Омский АНЦ, данные ежегодно пополняются. Для остальных учреждений изучение завершено (см. табл. 2).

В 2009 г. была создана БОД «Результаты полевого изучения образцов яровой мягкой пшеницы в условиях Красноярского края» № 0220913086 (автор – Е. В. Зуев). БОД содержит информацию о 2256 образцах яровой мягкой пшеницы, изученных на Красноярском опорном пункте ВИР в течение 13 лет по 17 основным хозяйственно ценным признакам. В БОД также представлена краткая паспортная характеристика для каждого образца.

По результатам изучения образцов пшеницы на Дагестанской опытной станции ВИР, Екатеринбургской ОС ВИР, НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» создана единая БОД «Результаты многолетней полевой оценки мировой коллекции яровой мягкой пшеницы в различных эколого-географических условиях», которая в 2026 г. зарегистрирована в реестре баз данных под № 2026622546 (автор – Е. В. Зуев).

Для сравнения образцов в разные периоды изучения все количественные признаки были переведены в баллы (9 – самое высокое, 7 – высокое, 5 – среднее, 3 – низкое и 1 – самое низкое значение признака) по шкале, которая используется в отделе ГР пшеницы (Zuev et al., 1999). Наиболее полные данные имеются для следующих признаков: продолжительность вегетационного периода и его межфазных периодов; высота растения и устойчивость к полеганию; полевая устойчивость к мучнистой росе и бурой ржавчине; устойчивость к шведской мухе; масса зерна с 1 м²; масса 1000 зерен.

Созданные БОД позволили сформировать региональные коллекции для Омского АНЦ (Омская обл.) и СибНИИРС –

Таблица 2. Объемы оцифровки полевых журналов изучения яровой мягкой пшеницы в системе ВИР**Table 2. Digitization of field journals for studying spring bread wheat in the VIR system**

Место изучения / Site of studying	Годы изучения / Years of studying	Число изученных образцов / Number of accessions studied	Число изученных признаков / Number of characters studied
Дагестанская ОС – филиал ВИР, Республика Дагестан	1936–2025	12501	18
Екатерининская ОС – филиал ВИР, Тамбовская обл.	1970–2025	5956	17
НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», Санкт-Петербург	1945–2025	9168	25
Дальневосточная ОС – филиал ВИР, Владивосток	1959–1985	2542	19
Кинельский опорный пункт (на богаре), Самарская обл.	1965–1991	6307	23
Кинельский опорный пункт (на поливе), Самарская обл.	1965–1985	5402	20
Красноярский НИИСХ, Красноярский край	1972–1991, 2008	2120	17
Московское отделение ВИР, Московская обл.	1964–2009, 2016	4392	18
Омский АНЦ, Омская обл.	1961–1978, 2004–2025	3203	17
НИИСХ Северного Зауралья, Тюменская обл.	1973–1976, 1998–1999, 2009–2014	2027	16
Алтайский НИИСХ, Алтайский край	1961–1990	3713	28
СибНИИРС – филиал ИЦиГ СО РАН, Новосибирская обл.	1972–1973, 1978–1980, 1994–2024	5747	15
Приаральская ОС ВИР, Казахская ССР (на богаре)	1960–1977	1021	14
Приаральская ОС ВИР, Казахская ССР (на поливе)	1960–1977	1150	16
НПЦ Зернового хозяйства, Казахская ССР	1961–1974	2750	23
Среднеазиатский филиал ВИР (САФ ВИР) (на богаре), Узбекская ССР	1961–1976	2551	17
Среднеазиатский филиал ВИР (САФ ВИР) (на поливе), Узбекская ССР	1951–1976, 1984, 1988–1991	6973	19
ICARDA, Сирия (на поливе)	2000–2006	928	15

филиала ИЦиГ СО РАН (Новосибирская обл.) (Zuev et al., 2016; Piskarev et al., 2018). Региональная признаковая коллекция – признаковая коллекция, фенотипическое проявление признаков у образцов которой верифицировано в конкретном регионе.

Для Омского АНЦ проанализированы данные полевого изучения в селекцентре за 26 лет (1961–1965, 1967–1968, 1972–1978, 2004–2015) 2914 образцов яровой мягкой пшеницы. Выделенная коллекция из 65 источников изучалась в 2015–2016 гг.

Для СибНИИРС имелись данные для 5439 образцов яровой мягкой пшеницы, изученных в лесостепи Приобья в течение 28 лет (1972–1973, 1976–1980, 1994–2011, 2013–2014, 2016). Коллекция из 56 источников изучалась с 2016 по 2018 г.

Блок 3В – создание БОД по результатам лабораторного изучения образцов

Наборы образцов коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР проходят регулярное изучение по устойчивости к грибным болезням и алюмоустойчивости. Данные используются для формирования и развития признаковых коллекций. Признаковая коллекция – выделенная в пределах конкретной биологической (биоресурсной) коллекции совокупность образцов, относящихся к одному и тому же или близким таксонам, сгруппированных на основе отдельных признаков или их сочетаний, и включающая образцы как с наилучшим проявлением признаков (образцы из числа доноров и источников ценных признаков), так и с контрастным их проявлением (Khlestkina et al., 2026a).

Каждые пять лет по материалам оценки коллекции издается «Каталог мировой коллекции ВИР». С 2000 по 2025 г. на ювенильную устойчивость к бурой ржавчине оценены 2153 образцов яровой мягкой пшеницы, на мучнистую росу – 1684, на алюмоустойчивость – 1562 (табл. 3).

В настоящее время признаковая коллекция образцов яровой мягкой пшеницы, устойчивых к мучнистой росе, насчитывает актуальных 38 источников, а также 112 источников устойчивости к бурой ржавчине.

В качестве источников алюмоустойчивости выделен 131 образец, что составило только девять процентов от общего количества. Наибольший процент устойчивых образцов выделен из поступлений из Финляндии, Эфиопии, Турции, Мексики и Германии. Все источники выявлены из регионов, где распространены кислые почвы.

4-й этап – идентификация образцов по спектрам глиадины для выявления повторов в коллекции и проверки соответствия текущей репродукции оригиналу

За последние десять лет получены спектры глиадины для более чем 300 образцов яровой мягкой пшеницы. Работа выполняется для контроля генетической целостности образцов, исключения дублетов и ошибок при репродуцировании. В качестве маркеров использованы запасные белки пшеницы – глиадины, электрофоретические спектры которых являются надежными маркерами в идентификации сортов и биотипов пшеницы (Konarev et al., 2000). Первоначально результаты представляли в виде карточки или таблицы, затем в виде изображения фореграммы с детальными обозначениями и формулой. В настоящее время в отделе биохимии ВИР разрабатывается метод глубокой оцифровки данных белковых спектров для автоматизированного анализа.

5-й этап – создание рабочей (активной) коллекции яровой мягкой пшеницы

При создании рабочей (активной) коллекции мирового генофонда яровой мягкой пшеницы необходимо использовать следующие правила (табл. 4):

1. Включать только доступные в живом виде образцы, соответствующие оригиналам и паспортным данным.

2. Для включения местных сортов в рабочую (активную) коллекцию для каждой страны происхождения необходимо иметь весь разновидностный состав пшениц, а места сбора должны отражать все провинции/районы. Обязательно включать пшеницы, собранные Н. И. Вавиловым и его соратниками в 1920–1930-е годы.

3. В рабочей (активной) коллекции должны быть представлены: современные российские сорта, включенные в Государственный реестр, российские сорта, бывшее в производстве, реализованные сорта ближнего и дальнего зарубежья и сорта и линии с уникальными родословными и характеристиками. При включении в Коллекцию ВИР селекционного сорта необходимо иметь следующую дополнительную информацию: учреждение-оригинатор, годы реализации сорта, ФИО селекционера (селекционеров), родословная. Сорта из Государственного реестра сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию в Рос-

Таблица 3. Распределение образцов яровой мягкой пшеницы по ювенильной устойчивости к мучнистой росе и бурой ржавчине и алюмоустойчивости

Table 3. Distribution of spring bread wheat accessions according to their seedling resistance to powdery mildew and brown rust, and aluminum resistance

Признак / Character	Число образцов / Number of accessions					
	HR	R	MR	MS	S	Bcero / Total
Устойчивость к мучнистой росе	38	58	147	500	941	1684
Устойчивость к бурой ржавчине	112	4	5	1508	524	2153
Алюмоустойчивость	131	140	352	360	355	1562

Примечание: HR – высокоустойчив; R – устойчив; MR – среднеустойчив; MS – средневосприимчив; S – восприимчив

Note: HR – highly resistant; R – resistant; MR – moderately resistant; MS – moderately susceptible; S – susceptible

Таблица 4. Состав рабочей (активной) коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР
Table 4. Composition of the working (active) collection of spring bread wheat maintained at VIR

Показатели / Indicators	Основной каталог / Main catalogue	Рабочая (активная) коллекция / Working (active) collection
Всего образцов	15946	6892
Число образцов до 1941 г. включительно	4809 (30,2%)	1554 (22,8%)
Число образцов с 1945 г. по настоящее время	11101 (69,6%)	5262 (77,2%)
Происхождение, страны	99	99
Местные сорта	6317 (39,6%)	1983 (29,1%)
Селекционные сорта	4699 (29,5%)	3200 (46,9%)
Селекционные линии	4464 (28,0%)	1386 (26,6%)
Генетические линии	323 (2,0%)	323 (6,2%)
Число разновидностей	160	160

сийской Федерации, необходимо маркировать в базе паспортных данных отдельным кодом статуса образца.

4. При обработке данных из каталогов ВИР в рабочую (активную) коллекцию яровой мягкой пшеницы были включены: образцы, которые имеют данные в 10 и более каталогах ВИР, источники с высоким содержанием белка, лизина, с высокими хлебопекарными свойствами.

Из единой базы оценочных данных «Результаты многолетней полевой оценки мировой коллекции яровой мягкой пшеницы в различных эколого-географических условиях» установлены и добавлены лучшие образцы по каждому признаку для каждого места изучения и универсальные источники. Включены источники и доноры из годовых отчетов отдела ГР пшеницы с 1996 по 2016 г., выявленные на других пунктах изучения. Источники ювенильной и взрослой устойчивости к грибным болезням, алюмоустойчивости в виде признаков коллекций пополнили рабочую (активную) коллекцию яровой мягкой пшеницы и создали основу для снабжения селекционных центров России ценным материалом.

5. В рабочей (активной) коллекции должны быть представлены стержневые, признаковые, региональные, специальные, демонстрационные коллекции, генетические линии (генетические и прецизионные коллекции).

6. Рекомендуем иметь в рабочей (активной) коллекции образцы, пользующиеся спросом среди исследователей.

7. Образцы, для которых имеются данные анализа при помощи методов сортовой идентификации (например, образцы пшеницы с установленной формулой по спектру глиадина), также необходимо включать в рабочую (активную) коллекцию.

Заключение

В результате более чем 30-летней работы с генетическими ресурсами яровой мягкой пшеницы сформированы принципы структурирования мирового генофонда этой культуры: актуализирована база паспортных данных, создана единая база оценочных данных образцов яровой мягкой пшеницы, изученных по комплексу признаков в разных эколого-географических условиях, проведена идентификация образцов по спектру глиадина

для выявления повторов (дублетов) в коллекции яровой мягкой пшеницы и проверки соответствия репродукций оригиналам, предложен универсальный способ описания и быстрого запоминания разнообразия форм мягкой пшеницы по морфологическим признакам колоса и зерновки для практической работы, предложен метод ранжирования значений признаков образцов, который позволяет более надежно сравнивать и анализировать ретроспективные данные оценки коллекции, полученные в разные годы и в разных пунктах изучения. Некоторые авторские предложения по структуризации биоресурсной коллекции были включены в работу «Особо ценные образцы генетических ресурсов растений: методические указания по оценке и критериям отбора» (Ukhatova et al., 2026b). Разработанные принципы и подходы к формированию рабочей (активной) коллекции яровой мягкой пшеницы в качестве модели можно распространить/применить к другим культурам мировой коллекции.

References / Литература

- Amunova O.S., Volkova L.V., Zuev E.V., Kharina A.V. Source for the breeding of soft spring wheat in the conditions of Kirov region. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(5):661-675. [in Russian] (Амунова О.С., Волкова Л.В., Зуев Е.В., Харина А.В. Исходный материал для селекции мягкой яровой пшеницы в условиях Кировской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(5):661-675). DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.5.661-675
- Barkovskaya T.A., Gladysheva O.V., Zuev E.V., Kokoreva V.G. Study of new spring common wheat samples from the world collection in the conditions of the Ryazan region. *Grain Economy of Russia*. 2024;16(1):5-13. [in Russian] (Барковская Т.А., Гладышева О.В., Зуев Е.В., Кокорева В.Г. Изучение новых образцов яровой мягкой пшеницы из мировой коллекции в условиях Рязанской области. *Зерновое хозяйство России*. 2024;16(1):5-13). DOI: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-5-13
- Decree of the President of the Russian Federation No. 44 dated February 8, 2022 "On the National Center for Plant Genetic Resources" ("O Natsionalnom tsentre geneticheskikh resursov rasteniy"). Official Internet Por-

- tal of the Legal Information; 2022. [in Russian] (Указ Президента Российской Федерации от 08.02.2022 № 44 «О Национальном центре генетических ресурсов растений». Официальный интернет-портал правовой информации; 2022). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202080014> [дата обращения: 05.06.2026].
- Directive of the Government of the Russian Federation No. 2496-p dated September 16, 2023 "On approving the Development Program for the National Center for Plant Genetic Resources for 2023–2030" ("Ob utverzhdenii Programmy razvitiya Natsionalnogo tsentra geneticheskikh resursov rasteniy na 2023–2030 gody"). Official Internet Portal of the Legal Information; 2023. [in Russian] (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 16.09.2023 № 2496-р «Об утверждении Программы развития Национального центра генетических ресурсов растений на 2023–2030 годы». Официальный интернет-портал правовой информации; 2023). URL: <http://government.ru/docs/all/149596> [дата обращения: 16.04.2026].
- ECP/GR. Descriptors & Technical Bulletins: [website]. Available from: <https://www.ecpgr.org/resources/descriptors-technical-bulletins> [accessed Apr. 07, 2026].
- Federal Law No. 428-FZ of Nov. 30, 2024 "On bioresource centers and biological (bioresource) collections and on amendments to Article 29 of the Federal Law "On the animal world" ("O bioresursnykh tsentrakh i biologicheskikh (bioresursnykh) kollektsiyakh i o vnesenii izmeneniy v statyu 29 Federalnogo zakona "O zhivotnom mire"). Official Internet Portal of the Legal Information; 2024. [in Russian] (Федеральный закон № 428-ФЗ от 30.11.2024 «О биоресурсных центрах и биологических (биоресурсных) коллекциях и о внесении изменений в статью 29 Федерального закона «О животном мире». Официальный интернет-портал правовой информации; 2024). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202411300018> [дата обращения: 05.06.2026].
- Khlestkina E.K., Chukhina I.G., Vishnyakova M.A., Zuev E.V., Loskutov I.G., Ukhatova Yu.V. Development of a conceptual apparatus in the field of establishment, formation, conservation, development, studying, and utilization of plant genetic resources collections. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026a;9(2):86-103. [in Russian] (Хлесткина Е.К., Чухина И.Г., Вишнякова М.А., Зуев Е.В., Лоскутов И.Г., Ухатова Ю.В. Развитие понятийного аппарата в сфере создания, формирования, сохранения, развития, изучения и использования коллекций генетических ресурсов растений. *Биотехнология и селекция растений*. 2026a;9(2):86-103). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-2-o7
- Khlestkina E.K., Chukhina I.G., Zuev E.V., Ukhatova Yu.V., Loskutov I.G. Organizing activities with plant genetic resource collections in Russia: stages, challenges, and solutions. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026b;9(2):16-33. [in Russian] (Хлесткина Е.К., Чухина И.Г., Зуев Е.В., Ухатова Ю.В., Лоскутов И.Г. Организация деятельности с коллекциями генетических ресурсов растений в России: этапы, вызовы и решения. *Биотехнология и селекция растений*. 2026b;9(2):16-33). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-2-o2
- Konarev V.G., Konarev A.V., Gubareva N.K., Peneva T.I. Seed proteins as markers in solving problems of plant genetic resources, breeding and seed production (Belki semyan kak markery v reshenii problem geneticheskikh resursov rasteniy, selektsii i semenovodstva). *Cytology and Genetics*. 2000;34(2):91-104. [in Russian] (Конарев В.Г., Конарев А.В., Губарева Н.К., Пенева Т.И. Белки семян как маркеры в решении проблем генетических ресурсов растений, селекции и семеноводства. *Цитология и генетика*. 2000;34(2):91-104).
- Malokostova E.I., Pivovarova I.Y., Popova A.V. Results of the study samples of spring wheat VIR collection. *International Research Journal*. 2016;10(52):159-160. [in Russian] (Малокостова Е.И., Пивоварова И.Ю., Попова А.В. Результаты изучения образцов яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016;10(52):159-160). DOI: 10.18454/IRJ.2016.52.104
- Merezhko A.F., Mitrofanova O.P., Zuev E.V. On the establishment of a genetic collection of wheat (O sozdaniy geneticheskoy kollektsii pshenitsy). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1996;(3-4):2-9. [in Russian] (Мережко А.Ф., Митрофанова О.П., Зуев Е.В. О создании генетической коллекции пшеницы. *Селекция и семеноводство*. 1996;(3-4):2-9).
- Merezhko A.F., Udachin R.A., Zuev E.V., Filatenko A.A., Serbin A.A., Lyapunova O.A., Kosov V.Yu., Kurkiev U.K., Okhotnikova T.V., Navruzbekov N.A., Boguslavskiy R.L., Abdulaeva A.K., Chikida N.N., Mitrofanova O.P., Potokina S.A. Replenishment, preservation in living form and study of the world collection of wheat, *Aegilops* and triticale: guidelines (Popolneniye, sokhraneniye v zhivom vide i izucheniye mirovoy kollektsii pshenitsy, egilopsa i tritikale: metodicheskiye ukazaniya). A.F. Merezhko (ed.). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Мережко А.Ф., Удачин Р.А., Зуев Е.В., Филатенко А.А., Сербин А.А., Ляпунова О.А., Косов В.Ю., Куркиев У.К., Охотникова Т.В., Наврузбеков Н.А., Богуславский Р.Л., Абдулаева А.К., Чикида Н.Н., Митрофанова О.П., Потоккина С.А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания / под ред. А.Ф. Мережко. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).
- Mitrofanova O. P., Strelchenko P. P., Zuev E.V., Street K., Konopka Y., McKay M. Genetic diversity of bread wheat landraces collected by scientific expeditions in Afghanistan. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2023;16(3):579-591. [in Russian] (Митрофанова О.П., Стрельченко П.П., Зуев Е.В., Стрит К., Конопка Я., Маккей М. О генетическом разнообразии местных сортов мягкой пшеницы, собранных научными экспедициями в Афганистане. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2012;16(3):579-591).
- Munns R., James R.A. Screening methods for salinity tolerance: a case study with tetraploid wheat. *Plant and Soil*. 2003;253(1):201-218. DOI: 10.1023/A:1024553303144
- Piskarev V.V., Zuev E.V., Brykova A.N. Sources for the breeding of soft spring wheat in the conditions of Novosibirsk region. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(7):784-794. [in Russian] (Пискарев В.В., Зуев Е.В., Брыкова А.Н. Исходный материал для селекции яровой мягкой пшеницы в условиях Новосибирской области. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(7):784-794). DOI: 10.18699/VJ18.422
- Shvachko N., Solovyeva M., Rozanova I., Kibkalo I., Kolesova M., Brykova A. et al. Mining of QTLs for spring bread wheat spike productivity by comparing spring wheat cultivars released in different decades of the last century. *Plants (Basel)*. 2024;13(8):1081. DOI: 10.3390/plants13081081
- Sochalova L.P., Aparina V.A., Boyko N.I., Zuev E.V., Morozova E.V., Musinov K.K. et al. Studying a collection of com-

- mon-wheat varieties for leaf rust resistance, crop yield and grain quality in the environmental conditions of Novosibirsk region. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2023;27(8):988-999. [in Russian] (Сочалова Л.П., Апарина В.А., Бойко Н.И., Зуев Е.В., Морозова Е.В., Мусинов К.К. и др. Изучение устойчивости к бурой ржавчине, урожайности и качества зерна у образцов коллекции мягкой пшеницы в экологических условиях Новосибирской области. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2023;27(8):988-999). DOI: 10.18699/VJGB-23-114
- State Register of Varieties and Hybrids of Agricultural Plants Admitted for Usage: [website]. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: [сайт]). URL: <https://gossortrf.ru> [дата обращения: 15.03.2026].
- Tyryshkin L.G., Zeleneva Y.V., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Y., Loseva V.A., Akhmedov M.A. et al. Long-term multilocal monitoring of leaf rust resistance in the spring bread wheat genetic resources from Institute of Plant Genetic Resources (VIR). *Agronomy*. 2022;12(2):242. DOI: 10.3390/agronomy12020242
- Ukhatova Yu.V., Novikova L.Yu., Loskutov I.G., Zuev E.V., Vishnyakova M.A., Nikiforov D.V. et al. Development of approaches to documenting information on plant genetic resource accessions as a basis for their guaranteed conservation and effective use. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026a;9(2):34-47. [in Russian] (Ухатова Ю.В., Новикова Л.Ю., Лоскутов И.Г., Зуев Е.В., Вишнякова М.А., Никифоров Д.В. и др. Развитие подходов к документированию информации об образцах генетических ресурсов растений как основа их гарантированного сохранения и эффективного использования. *Биотехнология и селекция растений*. 2026a;9(2):34-47). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-2-03
- Ukhatova Yu.V., Novikova L.Yu., Porokhovina E.A., Rozhmina T.A., Shmakov A.I., Geltman D.V., Likhovskoy V.V., Soldatenko A.V., Khatefov E.B., Seferova I.V., Artemyeva A.M., Zuev E.V., Vishnyakova M.A., Chukhina I.G., Loskutov I.G., Khlestkina E.K. Plant genetic resources accessions of special value: Guidelines for assessment and selection criteria. St. Petersburg: VIR; 2026b. [in Russian] (Ухатова Ю.В., Новикова Л.Ю., Пороховина Е.А., Рожмина Т.А., Шмаков А.И., Гельтман Д.В., Лиховской В.В., Солдатенко А.В., Хатефов Э.Б., Сеферова И.В., Артемьева А.М., Зуев Е.В., Вишнякова М.А., Чухина И.Г., Лоскутов И.Г., Хлесткина Е.К. Особо ценные образцы генетических ресурсов растений: Методические указания по оценке и критериям отбора. Санкт-Петербург: ВИР; 2026b).
- Vavilov N.I. Scientific bases of wheat breeding (Nauchnye osnovy selektsii pshenitsy). Moscow; Leningrad: Selkhozgiz; 1935a. [in Russian] (Вавилов Н.И. Научные основы селекции пшеницы. Москва; Ленинград: Сельхозгиз; 1935a).
- Vavilov N.I. The doctrine of plant immunity to infectious diseases (Ucheniye ob immunitete rasteniy k infektsionnym zabolevaniyam). Moscow; Leningrad: OGIz Selkhozgiz; 1935b. [in Russian] (Вавилов Н.И. Учение об иммунитете растений к инфекционным заболеваниям. Москва; Ленинград: ОГИЗ Сельхозгиз; 1935b).
- Vavilov N.I. The law of homological series in hereditary variation (Zakon gomologicheskikh ryadov v nasledstvennoy izmenchivosti). In: *Proceedings of the III All-Russian Congress on Breeding and Seed Production in Saratov on June 4-13, 1920. Issue 1 (Trudy III Vserossiyskogo syezda po selektsii i semenovodstvu v g. Saratov 4-13 iyunya 1920 g. Vyp. 1)*. Saratov; 1920. p.41-56. [in Russian] (Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. В кн.: *Труды III Всероссийского съезда по селекции и семеноводству в г. Саратов 4-13 июня 1920 г. Вып. 1*. Саратов; 1920. С.41-56).
- Vavilov N.I. Wheat. World resources of grain cereals (Pshenitsa. Mirovye resursy khlebnnykh zlakov). Moscow; Leningrad: Nauka, 1964. [in Russian] (Вавилов Н.И. Пшеница. Мировые ресурсы хлебных злаков. Москва; Ленинград: Наука; 1964).
- Vavilov N.I. World centres of the varietal riches (genes) of cultivated plants. Leningrad: GIOA; 1927. [in Russian] (Вавилов Н.И. Мировые центры сортовых богатств (генов) культурных растений. Ленинград: ГИОА; 1927).
- Zuev E.V. Local spring bread wheats in the VIR global collection of VIR (Mestnye yarovye myagkiye pshenitsy v mirovoy kollektsii VIR). St. Petersburg: VIR; 2008. [in Russian] (Зуев Е.В. Местные яровые мягкие пшеницы в мировой коллекции ВИР. Санкт-Петербург: ВИР; 2008).
- Zuev E.V., Amri A., Brykova A.N., Pyukkenen V.P., Mitrofanova O.P. Atlas of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genetic diversity based on spike and kernel characters. 2nd ed. St. Petersburg: VIR; 2019a. [in Russian] (Зуев Е.В., Амри А., Брыкова А.Н., Пюккенен В.П., Митрофанова О.П. Атлас разнообразия мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по признакам колоса и зерновки. 2-е изд. Санкт-Петербург: ВИР; 2019a).
- Zuev E.V., Belan I.A., Rosseeva L.P., Meshkova L.V., Blohina N.P. Initial material for breeding of spring wheat in Omsk region. *Success of Modern Science and Education*. 2016;6(11):122-125. [in Russian] (Зуев Е.В., Белан И.А., Россеева Л.П., Мешкова Л.В., Блохина Н.П. Исходный материал для селекции пшеницы мягкой яровой в условиях Омской области. *Успехи современной науки и образования*. 2016;6(11):122-125).
- Zuev E.V., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu. Results of analyzing the passport database 'spring bread wheat landraces in the VIR collection'. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019b;180(1):7-11. [in Russian] (Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю. Результаты анализа паспортной базы данных «Местные сорта яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР». *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019b;180(1):7-11). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-7-11
- Zuev E.V., Lebedeva T.V., Yakovleva O.V., Kolesova M.A., Brykova A.N., Lysenko N.S. et al. Genetic diversity for effective resistance in wheat landraces from Ethiopia and Eritrea to fungal diseases and toxic aluminum ions. *Plants (Basel)*. 2024;13(8):1166. DOI: 10.3390/plants13081166
- Zuev E.V., Lyapunova O.A., Brykova A.N., Surganova L.D., Nikiforov M.N., Razumova I.I., Plotnikova L.N., Potokina S.A., Borodina R.A., Ivanova O.A., Kozhushko N.N., Zhukova A.Z., Chmeleva Z.V., Klimentyeva N.F. (comp.). A.F. Merezko (ed.). Catalogue of the VIR global collection. Issue 708. The pattern of variability in early-ripening spring bread wheat accessions under various ecogeographic conditions (Kharakter izmenchivosti skorospelykh obraztsov yarovoy myagkoj pshenitsy v razlichnykh ekologo-geograficheskikh usloviyakh). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 708. Характер изменчивости скороспелых образцов яровой мягкой пшеницы в различных эколого-географических условиях / сост. Зуев Е.В., Ляпунова О.А., Брыкова А.Н., Сурганова Л.Д., Никифоров М.Н., Разумова И.И., Плотникова Л.Н., Потоккина С.А., Боро-

дина Р.А., Иванова О.А., Кожушко Н.Н., Жукова А.З., Чмелева З.В., Климентьева Н.Ф.; под ред. А.Ф. Мережко. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).

Zuev E.V., Peneva T.I., Martynenko N.I., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu. Using grain protein electrophoresis to control the genetic integrity of spring bread wheat accessions from the VIR collection of plant genetic resources. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and*

Breeding. 2018;179(3):235-239. [in Russian] (Зуев Е.В., Пенева Т.И., Мартыненко Н.И., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю. Использование электрофореза белков зерна для контроля генетической целостности образцов яровой мягкой пшеницы из коллекции генетических ресурсов растений ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(3):235-239). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-235-239

Информация об авторе

Евгений Валерьевич Зуев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.zuev@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9259-4384>

Information about the author

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.zuev@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9259-4384>

Статья поступила в редакцию 10.06.2026; одобрена после рецензирования 18.08.2026; принята к публикации 20.08.2026. The article was submitted on 10.06.2026; approved after reviewing on 18.08.2026; accepted for publication on 20.08.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 635.21:631.526.324(524.022)
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-014



Оценка адаптивных свойств российских сортов картофеля (*Solanum tuberosum* L.)

С. В. Мальцев, А. Э. Шабанов, Д. В. Абросимов

Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, Московская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Станислав Владимирович Мальцев, stanmalcev@yandex.ru

Актуальность. Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – одна из основных возделываемых в России сельскохозяйственных культур. Изучение и выделение наиболее адаптивных сортов картофеля по показателю товарной урожайности в зависимости от условий выращивания остается актуальной задачей.

Материалы и методы. Объектом исследований служили сорта картофеля различного срока созревания (58 образцов). Исследования проводили в 2022–2024 гг. в условиях полевого опыта Московской области РФ. Группировку сортов на кластеры по параметрам адаптивности проводили методом К-средних.

Результаты. Показано влияние условий влагообеспеченности 2-й половины вегетации как на формирование собственно товарной урожайности (фактор года – 57,8%), так и на проявление адаптивных свойств сортов картофеля (сочетание факторов «сорт × год» – 25,7%). Анализ данных по динамике товарной урожайности за годы исследований позволил оценить такие адаптивные свойства сортов картофеля, как стрессоустойчивость, генетическая гибкость, коэффициент отзывчивости на условия среды, индекс экологической пластичности, коэффициент вариации, экологическая пластичность по коэффициенту линейной регрессии b_1 , гомеостатичность, селекционная ценность и показатель уровня стабильности сорта.

Заключение. Из 58 изученных выделены 16 сортов картофеля, отличающиеся одновременно высоким адаптивным потенциалом и высокой товарной урожайностью: 'Александрит', 'Арго', 'Блоссом', 'Калужский', 'Спринтер', 'Холмогорский', 'Удача', 'Ред Скарлетт' (ранние); 'Зырянец', 'Тайфун', 'Шах' (среднеранние); 'Армада', 'Мираж', 'Орлан', 'Розовый Чародей', 'Флагман' (среднеспелые). Перечисленные сорта представляются перспективными как с точки зрения внедрения в производство, так и для использования в дальнейшей селекционной работе.

Ключевые слова: картофель, товарная урожайность, генетическая гибкость, экологическая пластичность, гомеостатичность, селекционная ценность, уровень стабильности сорта

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках комплексного плана научных исследований (КПНИ) «Развитие селекции и семеноводства картофеля» 2016–2025 гг. по теме «Испытание сортов и гибридов картофеля».

Для цитирования: Мальцев С.В., Шабанов А.Э., Абросимов Д.В. Оценка адаптивных свойств российских сортов картофеля (*Solanum tuberosum* L.). Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):116-128. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-014

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o14

Assessment of adaptive properties in Russian potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.)

Stanislav V. Maltsev, Adam E. Shabanov, Dmitry V. Abrosimov

*Russian Potato Research Centre, Moscow Province, Russia***Corresponding author:** Stanislav V. Maltsev, stanmalcev@yandex.ru

Background. Potato (*Solanum tuberosum* L.) is one of the main crops cultivated in Russia. Studying and selecting the most adaptable potato cultivars according to their commercial yield indicator under the effect of growing conditions remains a pressing task.

Materials and methods. Potato cultivars with various ripening schedules (58 accessions) served as the material for this study, which was conducted as field trials in Moscow Province in 2022–2024. The cultivars were grouped into clusters according to adaptability parameters using the K-means method.

Results. The effect of moisture conditions in the second half of the growing season was shown on the formation of commercial yield (year factor of 57.8%) and on the manifestation of adaptive properties in potato cultivars (cultivar × year interaction factor of 25.7%). Data analysis of the commercial yield dynamics over the years of research made it possible to assess such adaptive properties of potato cultivars as stress resistance, genetic flexibility, environmental response coefficient, index of environmental plasticity, coefficient of variation, environmental plasticity according to the linear regression coefficient (bi), homeostasis, breeding value, and cultivar stability level.

Conclusion. Using cluster analysis, 16 potato cultivars were identified among the 58 studied ones for their high adaptability potential and high commercial yield: 'Aleksandrit', 'Argo', 'Blossom', 'Kaluzhskiy', 'Sprinter', 'Kholmogorskiy', 'Udacha', and 'Red Scarlett' (all early); 'Zyryanets', 'Tayfun', and 'Shakh' (all mid-early); 'Armada', 'Mirazh', 'Orlan', 'Rozovy Charodey', and 'Flagman' (all mid-season). These cultivars were found promising both for commercial production and for further breeding efforts.

Keywords: potato, commercial yield, genetic flexibility, environmental plasticity, homeostasis, breeding value, cultivar stability level.

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the comprehensive scientific research plan (CSRP) "Development of potato breeding and seed production" for 2016–2025 on the topic "Testing potato cultivars and hybrids".

For citation: Maltsev S.V., Shabanov A.E., Abrosimov D.V. Assessment of adaptive properties in Russian potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):116-128. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o14

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

По состоянию на 2026 год в Государственном реестре сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию, представлено более 500 сортов картофеля, однако широко возделываются лишь несколько десятков из них, при этом сорта отечественной селекции занимают менее 10% посадок (Shabanov et al., 2025). Одним из главных условий успешного внедрения новых сортов картофеля является сочетание их высокой продуктивности с экологической пластичностью (Shabanov, 2023). В благоприятных условиях возделывания (высокий агрофон плюс орошение) преимущество имеют сорта с высокой потенциальной урожайностью. В неблагоприятных и экстремальных условиях при выращивании на богаре потенциальная урожайность должна сочетаться с высокой экологической устойчивостью (Evstratova et al., 2025). При таких условиях увеличение продуктивности за счет предпосадочного использования защитно-стимулирующих препаратов и рост-регуляторов (Pshechenkov et al., 2007; Maltsev, 2021) или применения повышенных доз минеральных удобрений малоэффективно и может приводить к зафосфачиванию почвы (Maltsev et al., 2024). Генотипы, взаимодействуя со средой, по-разному реагируют на изменение условий выращивания (Kendal, 2019). Если сорт генетически не способен реагировать на широкий спектр почвенно-климатических условий, то есть обладает узкой экологической устойчивостью, то он не может противостоять воздействию различных биотических и абиотических стрессоров (Vasilyeva et al., 2021). Адаптивный сорт, напротив, является экологически пластичным, приспособленным к различным сочетаниям условий среды (Filiprov et al., 2022).

Наиболее важный показатель продуктивности картофеля – товарная урожайность, представляющая собой сбор клубней (т/га) размером в поперечном диаметре более 28 и 30 мм для сортов соответственно с удлиненной и округлой формой. Картофель весьма требователен к условиям влагообеспеченности во 2-й половине вегетации, начиная с фаз бутонизации – цветения и до отмирания ботвы, то есть в период, когда происходит клубнеобразование и накопление урожая (Abeytilakarathna, 2022). Поэтому при прочих равных факторах колебания влагообеспеченности картофеля по годам в этот период существенно влияют на величину товарной урожайности, что может быть использовано в качестве основы для расчета экологической пластичности сортов, особенно если годы исследований характеризуются контрастным (сильно различающимся между собой) количеством осадков.

В настоящее время во многих странах активно ведутся работы по созданию цифровых баз данных, как, например, «Центр знаний по функциональной геномике картофеля на основе искусственного интеллекта» (Li et al., 2026), в задачи которых входит поиск закономерностей между хозяйственно ценными признаками и генетическими особенностями сортов. Это значительно ускоряет селекционный процесс и делает его более целенаправленным за счет более эффективного подбора родительских пар (Gerieva, Revazova, 2024). Перспективным это направление является и для отечественного картофелеводства, сбор данных и анализ селекционного материала осуществляется в различных регионах выращивания (Mukhordova et al., 2025), однако в Центральном регионе России оценка адаптивных свойств широкого набора

сортов картофеля до сих пор комплексно не проводилась.

Между тем анализ различных методов оценки генотипов показал, что не существует единого универсального способа, позволяющего адекватно оценить адаптивность исследуемых сортов (Mohammadi et al., 2016). Это связано с тем, что ответ генотипа на факторы окружающей среды всегда является многомерным (Woyann et al., 2019). Поэтому при оценке адаптивности возникает необходимость одновременного использования целого комплекса параметров. Например, в работе Н. И. Анискова и И. В. Сафоновой (Aniskov, Safonova, 2020) ранжирование сортов изучаемых культур и проведение итоговой оценки их адаптивности по соответствующим параметрам проводились по сумме рангов, полученных каждым сортом. Нами предложен альтернативный способ оценки адаптивного потенциала сортов картофеля – на основе применения кластерного анализа методом К-средних с предварительным приведением параметров к стандартным значениям. При этом, помимо собственно величины средней товарной урожайности, учитывались такие параметры, как генетическая гибкость, индекс экологической пластичности, селекционная ценность сорта, гомеостатичность, показатель уровня стабильности сорта.

Цель исследования – оценка адаптивности сортов картофеля к влагообеспеченности 2-й половины вегетации по показателю товарной урожайности и выделение лучших сортов для выращивания в условиях Московской области и использования в селекционной работе.

Материалы и методы

Полевые опыты проводили в 2022–2024 гг. на экспериментальной базе «Коренёво» (Московская область, городской округ Люберцы). Объект исследований – сорта картофеля различного срока созревания (от раннего до среднеспелого, всего 58 шт.), из которых 56 сортов отечественной селекции и 2 зарубежной – ‘Ред Скарлетт’ и ‘Гала’, включенные в программу исследований в качестве международных стандартов сравнения (табл. 1).

Изучали параметры адаптивности, экологической пластичности и стабильности сортов картофеля по показателю «товарная урожайность». Стрессоустойчивость сортов определяли по А. А. Россиелле, J. Hemblin в изложении А. А. Гончаренко (Goncharenko, 2005). Расчет параметров адаптивности, стабильности, гомеостатичности проводили по принятым методикам (Udachin, Golovchenko, 1990; Gryaznov, 1996). Коэффициенты регрессии на условия среды рассчитывали по С. А. Эберхарту и У. А. Расселу (Eberhart, Russell, 1966).

Технология возделывания общепринятая для картофеля в условиях Московской области (Maltsev et al., 2021). Посадка в первой декаде мая с шириной междурядий 75 см и густотой посадки 44 тыс. шт./га, уборка в первой декаде сентября. Размещение делянок рендомизированное, повторность трехкратная, площадь учетной делянки – 20 м².

Уборку и учет товарного урожая картофеля с последующим дисперсионным анализом данных проводили по Б. А. Доспехову (Dospikhov, 2012) и с использованием программного пакета для статистического анализа STATISTICA 10 (Statsoft, Dell Software, США). Группировку сортов на кластеры по параметрам адаптивности проводили методом К-средних. Оптимальное число кластеров определяли «методом локтя» (Elbow method) по ре-

Таблица 1. Перечень изучаемых сортов картофеля (*Solanum tuberosum* L.)**Table 1. List of the studied potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.)**

Происхождение (организации, создавшие оригинал сорта) / Origin (institutions where the originals were developed)	Название образца / Accession name
ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха, Московская область	‘Ариэль’, ‘Армада’, ‘Артур’, ‘Восторг’, ‘Евпатий’, ‘Мираж’, ‘Надежда’, ‘Тайфун’, ‘Флагман’, ‘Спринтер’, ‘Самородок’, ‘Крутой’, ‘Интеллигент’, ‘Удача’
Ленинградский НИИСХ «Белогорка» – филиал ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха, Ленинградская область	‘Принцесса Натаван’, ‘Александрит’, ‘Розовый чародей’, ‘Холмогорский’, ‘Двинский’, ‘Чародей’, ‘Полярный’, ‘Невский’
УрФАНИЦ УрО РАН – филиал Уральский НИИСХ, Свердловская область	‘Арго’, ‘Шах’, ‘Багира’
Казанский НЦ РАН – филиал ТатНИИСХ, Республика Татарстан	‘Орлан’, ‘Догада’, ‘Блоссом’, ‘Тана’
ИЦИГ СОРАН – филиал СибНИИРС, Новосибирская область	‘Алка’, ‘Ника’
СФНЦА РАН – филиал СибНИИСХиТ, Новосибирская область	‘Кетский’
Омский АНЦ, Омская область	‘Кумир’
СФНЦ РАН – филиал Кемеровский НИИСХ, Новосибирская область	‘Кузбасский’, ‘Томичка’
ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайка – филиал Приморский НИИСХ, Приморский край	‘Моряк’, ‘Дальневосточный’
ФГБНУ ИСХ КБНЦ, Кабардино-Балкарская Республика	‘Сосруко’, ‘Терский’
Южно-Уральский НИИСХ – филиал ФНЦ ЛК ОП, Челябинская область	‘Спиридон’, ‘Каштак’, ‘Кузовок’, ‘Кавалер’, ‘Тарасов’
ФАНЦ Северо-Востока – филиал Фаленская СС, Кировская область	‘Глория’, ‘Виза’, ‘Чайка’
Красноярский ГАУ, Красноярский край	‘Арамис’, ‘Красноярский ранний’
Горский ГАУ, Республика Северная Осетия – Алания	‘Фарн’
Коми НЦ УрО РАН, Республика Коми	‘Вычегодский’, ‘Печорский’, ‘Зырянец’
Башкирский НИИСХ – филиал УФИЦ РАН, Республика Башкортостан	‘Башкирский’
Калужский НИИСХ – филиал ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха, Калужская область	‘Калужский’, ‘Бабынинский’
NORIK GMBH, Германия	‘Гала’
HZPC HOLLAND B.V., Нидерланды	‘Ред Скарлетт’

результатам расчета суммы квадратов расстояний внутри кластеров (WCSS), число итераций – 10, начальные центры кластеров задавались через одинаковые интервалы в ранжированном ряду расстояний (Sort distances and take observations at constant intervals) (Usmanov, 2020).

Результаты и обсуждение

Для достижения поставленной цели сначала проанализировали метеоусловия вегетационных периодов 2022–2024 гг. Затем, на основе дисперсионного анализа, выявили влияние факторов и установили различие в адаптивном потенциале сортов картофеля к недостат-

ку влаги во 2-й половине вегетации. Далее, на основе данных о динамике товарной урожайности по годам исследований, рассчитывался ряд параметров адаптивности сортов. Основные из них, находящиеся в единой логике «чем больше значение, тем выше адаптивность», после стандартизации и определения оптимального числа кластеров «методом локтя» использовались в кластерном анализе для выявления сортов, сочетающих высокую товарную урожайность с высокой адаптивностью.

Метеоусловия

Метеоусловия в годы проведения исследований существенно отличались только со II декады июля по II де-

каду августа включительно, то есть в критический для формирования и накопления урожая картофеля период. В 2022 г. в этом временном интервале выпало 57,5 мм осадков, в 2023 г. – 135,2 мм, в 2024 г. – 83,4 мм, то есть плюс-минус 40 мм от среднемноголетней нормы 97,3 мм, что также эквивалентно двум поливам по 200 м³/га. Таким образом, различия в условиях выращивания картофеля по годам сводились главным образом к количеству осадков 2-й половины вегетации. Дополнительный контраст фактору осадков в этот период за годы исследований придали на 1,2–2,5°C более высокие по сравнению со среднемноголетней нормой значения температуры воздуха.

Дисперсионный анализ

Установлено достоверное влияние ($p < 0,05$) факторов «сорт», «год исследований», а также их сочетания «сорт × год» на показатель «товарная урожайность картофеля». Наибольшее влияние на изменчивость данного признака оказал фактор «год» – 57,8%. Фактор «сорт» определял проявление признака на 15,7% (табл. 2).

(–10,99 т/га), 'Арамис' (–11,10 т/га), 'Зырянец' (–11,53 т/га), 'Печорский' (–12,02 т/га), 'Двинский' (–12,81 т/га), 'Тана' (–13,40 т/га), 'Удача' (–14,34 т/га). Фактически представленные значения показывают, насколько тонн на гектар снижалась товарная урожайность сортов при ухудшении условий влагообеспеченности от наилучших в опыте до наихудших (табл. 3).

2. Генетическая гибкость (GF) рассчитывается как компенсаторная способность, представляющая из себя среднюю товарную урожайность в контрастных (стрессовых и не стрессовых) условиях: $(Y_{\min} + Y_{\max})/2$. Наиболее высокие показатели отмечены у сортов: 'Блоссом' (33,48 т/га), 'Армада' (30,53 т/га), 'Холмогорский' (30,46 т/га), 'Арго' (28,99 т/га), 'Александрит' (28,53 т/га), 'Шах' (28,19 т/га), 'Спринтер' (27,59 т/га), 'Тайфун' (27,56 т/га).

3. Коэффициент отзывчивости на условия окружающей среды (ERC) представляет собой отношение максимального значения признака к минимальному: $Y_{\max} / Y_{\min}$. По данным В. А. Зыкина (Zykin, 1984), чем сильнее отличается урожайность сорта, выращенного в благо-

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа двухфакторного опыта по показателю товарной урожайности картофеля

Table 2. Results of the analysis of variance for a two-factor experiment involving the potato commercial yield indicator

Источник вариации / Source of variation	Сумма квадратов / Sum of squares	Число степеней свободы / Degrees of freedom	Сумма квадратов, приходящаяся на одну степень свободы / Sum of squares per a degree of freedom	F	p	Влияние фактора, % / Effect of the factor, %
Сорт	10849,7	57	190,3	115,98	0,00	15,7
Год	40029,3	2	20014,6	12194,83	0,00	57,8
Сорт × год	17770,6	114	155,9	94,98	0,00	25,7
Ошибка	571,2	348	1,6			0,8
Общая	69220,7					100,0

Отмечено значительное влияние сочетания факторов «сорт × год» 25,6%, свидетельствующее о неоднородной реакции сортов картофеля на условия выращивания по годам, а следовательно – на их различия в адаптивном потенциале к недостатку влаги во 2-й половине вегетации. Аналогичные данные касательно существенной сортовой реакции на количество выпавших осадков получены и в работе K. Ryмуза et al. (2015). В наших исследованиях товарная урожайность в среднем по 58 сортам значительно отличалась по годам: 10,09 т/га, 33,39 т/га и 24,42 т/га, в результате чего расчетные значения индекса условий среды (ECI) в 2022–2024 гг. составили соответственно –12,54; 10,76 и 1,79.

Адаптивные свойства сортов картофеля

1. Стрессоустойчивость (SR) определяется по разности между минимальным и максимальным значением признака $(Y_{\min} - Y_{\max})$. Этот показатель имеет отрицательный знак, и чем он меньше по абсолютной величине, тем выше стрессоустойчивость, то есть шире диапазон приспособительных возможностей сорта (Rybas', 2016). Наиболее стрессоустойчивыми оказались сорта: 'Чародей' (–3,18 т/га), 'Армада' (–4,8 т/га), 'Александрит'

приятной внешней среде, от урожайности этого же сорта, полученной в неблагоприятных условиях, тем более информативными будут данные. По результатам наших исследований все сорта хорошо реагировали на улучшение условий возделывания, наибольший коэффициент отзывчивости получен у сортов: 'Евпатий' (11,87), 'Каштак' (10,41), 'Глория' (8,83), 'Кумир' (7,01), 'Надежда' (6,71), 'Ника' (6,66).

4. Индекс экологической пластичности (IEP) характеризует степень приспособляемости сорта к условиям внешней среды. Рассчитывается как отношение средней урожайности по каждому сорту к среднесортной урожайности за изучаемый период. Интерпретация: высокие значения IEP характеризуют большую пластичность генотипа. Значение $IEP > 1$ указывает на большую степень соответствия между генотипами и факторами среды. Значения меньше единицы означают, что сорт реагирует слабее на изменение условий среды. Такой сорт лучше использовать при экстенсивном уровне возделывания, когда при минимальных затратах на агротехнику и систему удобрений существует вероятность получения высокого уровня урожайности. Значение, равное единице, говорит о полном соответствии изменения урожай-

Таблица 3. Товарная урожайность по годам исследований и показатели экологической пластичности сортов картофеля**Table 3. Commercial yield across the years of research, and environmental plasticity indicators of potato cultivars**

Сорт / Cultivar	Товарная урожайность, т/га / Commercial yield, t/ha				SR	GF	ERC	IEP
	2022	2023	2024	Среднее / Mean				
Ранние сорта								
‘Александрит’	23,04	34,02	23,05	26,70	−10,99	28,53	1,48	1,18
‘Арго’	19,03	38,95	34,60	30,86	−19,92	28,99	2,05	1,36
‘Башкирский’	12,41	35,28	23,04	23,57	−22,87	23,84	2,84	1,04
‘Блоссом’	9,42	57,53	35,40	34,12	−48,10	33,48	6,10	1,51
‘Глория’	5,48	48,39	24,12	26,00	−42,91	26,93	8,83	1,15
‘Калужский’	13,20	37,67	28,21	26,36	−24,47	25,43	2,85	1,16
‘Красноярский Ранний’	5,69	33,84	21,84	20,46	−28,15	19,77	5,94	0,90
‘Полярный’	7,70	27,81	21,12	18,88	−20,11	17,76	3,61	0,83
‘Спринтер’	12,60	42,57	37,42	30,87	−29,97	27,59	3,38	1,36
‘Томичка’	5,94	38,68	31,11	25,24	−32,74	22,31	6,51	1,12
‘Холмогорский’	9,59	51,33	35,14	32,02	−41,74	30,46	5,35	1,41
‘Удача’	17,85	32,19	23,10	24,38	−14,34	25,02	1,80	1,08
‘Ред Скарлетт	15,19	36,14	30,51	27,28	−20,96	25,67	2,38	1,21
Среднеранние сорта								
‘Алка’	6,88	40,69	22,45	23,34	−33,80	23,78	5,91	1,03
‘Ариэль’	7,43	33,94	27,71	23,03	−26,52	20,69	4,57	1,02
‘Бабынинский’	5,13	33,32	20,82	19,76	−28,19	19,23	6,50	0,87
‘Багира’	9,96	31,43	24,34	21,91	−21,47	20,69	3,16	0,97
‘Виза’	5,08	33,46	21,68	20,08	−28,38	19,27	6,58	0,89
‘Вычегодский’	7,16	32,07	21,15	20,13	−24,92	19,61	4,48	0,89
‘Двинский’	6,55	19,36	17,73	14,55	−12,81	12,96	2,95	0,64
‘Догота’	10,56	28,27	19,94	19,59	−17,72	19,41	2,68	0,87
‘Зырянец’	16,63	28,16	26,70	23,83	−11,53	22,40	1,69	1,05
‘Крутой’	8,20	35,96	30,69	24,95	−27,76	22,08	4,39	1,10
‘Кузбасский’	5,63	22,92	7,63	12,06	−17,29	14,28	4,07	0,53
‘Ника’	5,72	38,25	38,12	27,36	−32,39	21,92	6,66	1,21
‘Самородок’	7,64	32,68	26,84	22,39	−25,04	20,16	4,28	0,99
‘Сосруко’	8,79	32,12	29,01	23,31	−23,33	20,45	3,65	1,03
‘Тана’	14,94	28,34	22,64	21,97	−13,40	21,64	1,90	0,97
‘Тайфун’	13,60	41,52	26,78	27,30	−27,92	27,56	3,05	1,21
‘Фарн’	8,06	30,10	16,80	18,32	−22,04	19,08	3,73	0,81
‘Чародей’	16,69	18,98	15,79	17,15	−3,18	17,38	1,20	0,76
‘Шах’	14,58	41,80	31,92	29,43	−27,22	28,19	2,87	1,30
‘Невский’	6,12	26,36	21,91	18,13	−20,24	16,24	4,31	0,80
‘Гала’	5,52	25,16	12,17	14,28	−19,64	15,34	4,56	0,63

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Сорт / Cultivar	Товарная урожайность, т/га / Commercial yield, t/ha				SR	GF	ERC	IEP
	2022	2023	2024	Среднее / Mean				
Среднеспелые сорта								
‘Арамис’	15,18	26,28	24,70	22,05	–11,10	20,73	1,73	0,97
‘Армада’	28,13	32,93	30,58	30,54	–4,80	30,53	1,17	1,35
‘Артур’	6,22	32,64	21,52	20,13	–26,42	19,43	5,25	0,89
‘Восторг’	8,36	38,98	30,12	25,82	–30,62	23,67	4,66	1,14
‘Дальневосточный’	6,50	22,00	18,97	15,82	–15,50	14,25	3,38	0,70
‘Евпатий’	3,64	43,20	21,38	22,74	–39,56	23,42	11,87	1,00
‘Интеллигент’	6,24	28,89	27,15	20,76	–22,65	17,56	4,63	0,92
‘Кавалер’	4,22	31,08	24,06	19,79	–26,86	17,65	7,36	0,87
‘Каштак’	4,04	42,04	25,08	23,72	–38,00	23,04	10,41	1,05
‘Кетский’	11,59	27,76	23,11	20,82	–16,17	19,67	2,39	0,92
‘Кузовок’	4,88	22,80	19,53	15,74	–17,92	13,84	4,67	0,70
‘Кумир’	4,51	31,65	20,71	18,96	–27,14	18,08	7,01	0,84
‘Мираж’	12,53	38,79	33,09	28,14	–26,26	25,66	3,10	1,24
‘Моряк’	6,08	34,06	20,01	20,05	–27,97	20,07	5,60	0,89
‘Надежда’	6,23	41,80	23,92	23,98	–35,57	24,01	6,71	1,06
‘Орлан’	17,25	36,08	22,22	25,19	–18,83	26,67	2,09	1,11
‘Печорский’	11,10	23,12	18,80	17,67	–12,02	17,11	2,08	0,78
‘Принцесса Натаван’	8,36	24,21	23,76	18,78	–15,85	16,29	2,90	0,83
‘Розовый Чародей’	14,52	38,25	25,80	26,19	–23,73	26,39	2,63	1,16
‘Спиридон’	9,59	24,96	13,09	15,88	–15,37	17,28	2,60	0,70
‘Тарасов’	8,73	26,32	24,80	19,95	–17,58	17,52	3,01	0,88
‘Терский’	15,18	31,15	19,50	21,94	–15,97	23,17	2,05	0,97
‘Флагман’	17,99	32,93	28,88	26,60	–14,94	25,46	1,83	1,18
‘Чайка’	6,22	35,67	24,20	22,03	–29,45	20,95	5,73	0,97
НСР ₀₅	1,28	2,40	2,35					
Среднее	10,09	33,39	24,42	22,64				
ECI	–12,54	10,76	1,79					

Примечание: SR – стрессоустойчивость; GF – генетическая гибкость; ERC – коэффициент отзывчивости на условия окружающей среды; IEP – индекс экологической пластичности; ECI – индекс условий среды

Note: SR – stress resistance; GF – genetic flexibility; ERC – environmental response coefficient; IEP – index of environmental plasticity; ECI – environmental conditions index

ности сорта изменению условий возделывания. Сорта с наиболее высоким уровнем пластичности: ‘Блоссом’ (1,51), ‘Холмогорский’ (1,41), ‘Арго’ (1,36), ‘Спринтер’ (1,36), ‘Армада’ (1,35), ‘Мираж’ (1,24).

5. Коэффициент вариации (CV) – стандартное отклонение, выраженное в процентах к средней арифметической данной совокупности: $(SD/\bar{Y}_{cp}) \times 100\%$. Согласно принятой классификации (Eberhart, Russell, 1966), при

коэффициенте вариации $CV < 10\%$ изменчивость характеризуется как слабая, от 10% до 20% – средняя, а при $CV > 20\%$ – сильная. Проведенный анализ показал, что сильная изменчивость отмечалась почти у всех изученных сортов картофеля (до 87,15% у сорта ‘Евпатий’). Исключение составляли сорта ‘Чародей’ ($CV = 9,57\%$) и ‘Армада’ ($CV = 7,86\%$), характеризующиеся слабой изменчивостью (табл. 4).

Таблица 4. Параметры адаптивности и стабильности сортов картофеля при выращивании в Московской области в 2022–2024 гг.**Table 4.** Adaptability and stability parameters of potato cultivars when grown in Moscow Province in 2022–2024

Сорт / Cultivar	Стандартное отклонение / SD	CV,%	bi	Hom	CBV	CSL
Ранние сорта						
‘Александрит’	6,34	23,74	0,43	112,48	18,08	30,03
‘Арго’	10,47	33,93	0,88	90,95	15,08	28,06
‘Башкирский’	11,45	48,55	0,96	48,56	8,29	11,45
‘Блоссом’	24,08	70,57	2,04	48,34	5,59	16,49
‘Глория’	21,52	82,76	1,79	31,41	2,94	8,17
‘Калужский’	12,34	46,80	1,05	56,32	9,24	14,84
‘Красноярский Ранний’	14,12	69,04	1,20	29,63	3,44	6,06
‘Полярный’	10,24	54,26	0,87	34,79	5,23	6,57
‘Спринтер’	16,03	51,93	1,33	59,44	9,13	18,35
‘Томишка’	17,14	67,90	1,44	37,18	3,88	9,38
‘Холмогорский’	21,04	65,71	1,79	48,73	5,98	15,60
‘Удача’	7,26	29,76	0,59	81,93	13,52	19,97
‘Ред Скарлетт	10,84	39,75	0,92	68,63	11,46	18,72
Среднеранние сорта						
‘Алка’	16,92	72,50	1,42	32,19	3,95	7,51
‘Ариэль’	13,86	60,21	1,16	38,25	5,04	8,81
‘Бабынинский’	14,12	71,50	1,20	27,63	3,04	5,46
‘Багира’	10,94	49,93	0,93	43,88	6,94	9,61
‘Виза’	14,26	71,02	1,21	28,27	3,05	5,67
‘Вычегодский’	12,49	62,06	1,06	32,43	4,49	6,53
‘Двинский’	6,97	47,93	0,57	30,35	4,92	4,42
‘Догота’	8,86	45,24	0,75	43,30	7,31	8,48
‘Зырянец’	6,28	26,34	0,51	90,47	14,08	21,56
‘Крутой’	14,74	59,09	1,23	42,22	5,69	10,54
‘Кузбасский’	9,46	78,44	0,69	15,38	2,96	1,85
‘Ника’	18,74	68,49	1,48	39,95	4,11	10,93
‘Самородок’	13,10	58,52	1,10	38,26	5,23	8,56
‘Сосруко’	12,67	54,36	1,04	42,88	6,38	9,99
‘Тана’	6,73	30,61	0,57	71,78	11,58	15,77
‘Тайфун’	13,97	51,16	1,17	53,36	8,94	14,56
‘Фарн’	11,10	60,58	0,91	30,24	4,91	5,54
‘Чародей’	1,64	9,57	0,08	179,18	14,27	30,73
‘Шах’	13,78	46,82	1,17	62,87	10,27	18,51

Таблица 4. Окончание

Table 4. The end

Сорт / Cultivar	Стандартное отклонение / SD	CV,%	bi	Hom	CBV	CSL
‘Невский’	10,64	58,67	0,89	30,90	4,21	5,60
‘Тала’	9,99	69,95	0,81	20,42	3,13	2,92
Среднеспелые сорта						
‘Арамис’	6,00	27,22	0,49	81,04	12,74	17,87
‘Армада’	2,40	7,86	0,20	388,73	26,09	118,73
‘Артур’	13,26	65,90	1,13	30,54	3,84	6,15
‘Восторг’	15,76	61,02	1,33	42,32	5,54	10,93
‘Дальневосточный’	8,21	51,91	0,68	30,48	4,68	4,82
‘Евпатий’	19,82	87,15	1,66	26,09	1,91	5,93
‘Интеллигент’	12,60	60,72	1,02	34,19	4,48	7,10
‘Кавалер’	13,93	70,40	1,17	28,10	2,69	5,56
‘Каштак’	19,04	80,26	1,62	29,56	2,28	7,01
‘Кетский’	8,32	39,98	0,70	52,08	8,69	10,84
‘Кузовок’	9,54	60,62	0,79	25,96	3,37	4,09
‘Кумир’	13,65	72,02	1,16	26,32	2,70	4,99
‘Мираж’	13,81	49,09	1,16	57,32	9,09	16,13
‘Моряк’	13,99	69,76	1,18	28,74	3,58	5,76
‘Надежда’	17,79	74,16	1,50	32,34	3,57	7,76
‘Орлан’	9,76	38,74	0,77	65,01	12,04	16,37
‘Печорский’	6,09	34,46	0,52	51,29	8,48	9,07
‘Принцесса Натаван’	9,02	48,05	0,72	39,08	6,49	7,34
‘Розовый Чародей’	11,87	45,32	1,00	57,79	9,94	15,14
‘Спиридон’	8,06	50,73	0,62	31,30	6,10	4,97
‘Тарасов’	9,74	48,84	0,79	40,85	6,62	8,15
‘Терский’	8,26	37,64	0,65	58,31	10,70	12,80
‘Флагман’	7,72	29,04	0,65	91,59	14,53	24,36
‘Чайка’	14,84	67,38	1,26	32,70	3,84	7,20

Примечание: CV – коэффициент вариации, %; bi – коэффициент регрессии на условия среды по С. А. Эберхарту и У. А. Расселу (Eberhart, Russell, 1966); Hom – гомеостатичность; CBV – селекционная ценность сорта; CSL – уровень стабильности сорта

Note: CV – coefficient of variation, %; bi – Eberhart and Russell regression coefficient for environmental conditions (Eberhart, Russell, 1966); Hom – homeostasis; CBV – cultivar breeding value; CSL – cultivar stability level

6. Экологическая пластичность оценивалась по коэффициенту линейной регрессии (bi), отражающему реакцию сорта на изменение условий выращивания, для чего предварительно рассчитывался индекс условий среды (ЕСI). При этом сорта делились на категории от слабо отзывчивых (bi < 1) до наиболее отзывчивых (bi > 1), а также линейно зависимые (bi ≈ 1), урожайность которых напрямую зависела от изменения условий выращивания.

Высокая отзывчивость на улучшение условий среды отмечена у сортов ‘Блоссом’ (bi = 2,04), ‘Глория’ (bi = 1,79), ‘Холмогорский’ (bi = 1,79), ‘Евпатий’ (bi = 1,66), ‘Надежда’ (bi = 1,50), ‘Ника’ (bi = 1,48) и ‘Томичка’ (bi = 1,44). Схожие полученные значения коэффициента линейной регрессии (bi = 1,5) позволяли характеризовать сорта как «отзывчивые» и при агроэкологических испытаниях в условиях Карелии (Evstratova et al., 2025). В наших исследова-

ниях наиболее стабильная высокая урожайность при влиянии неблагоприятных условий среды получена у сортов 'Армада' ($b_i = 0,2$), 'Александрит' ($b_i = 0,43$), 'Орлан' ($b_i = 0,77$) и 'Флагман' ($b_i = 0,65$). Стоит также отметить высокоурожайные сорта 'Розовый Чародей' ($b_i = 1,00$), 'Сосруко' ($b_i = 1,04$), 'Калужский' ($b_i = 1,05$), 'Башкирский' ($b_i = 0,96$) и 'Ред Скарлетт' ($b_i = 0,92$), у которых коэффициент линейной регрессии близок к единице, что свидетельствует о динамичном изменении урожайности при изменении условий влагообеспеченности 2-й половины вегетации.

7. Гомеостатичность (Hom) – способность сорта сводить к минимуму последствия неблагоприятных воздействий внешней среды. Характеризует устойчивость признака в изменяющихся условиях. Применительно к нашим исследованиям представляет собой отношение квадрата средней товарной урожайности сорта за годы исследований к стандартному отклонению (Y_{cp}^2/SD). Чем выше гомеостатичность, тем меньше снижалась продуктивность картофеля при ухудшении агроклиматиче-

с неблагоприятных факторов – сохранять высокий уровень урожайности. Наиболее высокий CSL был характерен для сорта 'Армада' (118,73). Также по этому показателю выделились сорта 'Александрит' (30,03), 'Арго' (28,06), 'Флагман' (24,36). Аналогичные результаты были получены при оценке сортов картофеля по параметрам продуктивности и адаптивности в условиях Московской области в работе Э. А. Наумовой (Naumova et al., 2024), незначительные различия могут быть объяснены включением в эти исследования не только среднеспелых, но и позднеспелых сортов картофеля.

Кластерный анализ

Для интегрированной оценки сортов картофеля, включающей учет как величины товарной урожайности, так и значений параметров адаптивности, провели кластерный анализ. Оптимальное число кластеров определяли «методом локтя», для чего предварительно был произведен расчет суммы квадратов расстояний внутри кластеров (табл. 5).

Таблица 5. Сумма квадратов расстояний внутри кластеров в зависимости от их количества от 2 до 10

Table 5. Within-cluster sum of squares depending on their number from 2 to 10

Показатели / Indicators	Сумма квадратов расстояний внутри кластеров № 2 – № 10 / Within-cluster sum of squares No. 2 – No. 10								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Товарная урожайность	22,5	22,2	13,3	9,5	8,1	6,8	8,0	6,6	3,6
GF	22,0	21,0	11,7	9,8	8,5	9,0	9,5	7,8	5,0
IEP	22,5	22,2	13,3	9,5	8,1	6,8	8,0	6,6	3,6
CBV	40,1	26,9	22,8	21,2	12,7	9,9	7,5	7,0	6,8
Hom	49,1	12,1	11,4	10,5	5,8	1,9	4,3	1,6	1,9
CSL	45,5	6,0	4,7	4,5	2,4	1,8	1,8	1,6	1,6
Сумма	201,6	110,3	77,2	65,0	45,6	36,2	39,1	31,2	22,6

ских условий. Наибольшие значения данного показателя отмечены по сортам 'Армада' (388,73), 'Чародей' (179,18), 'Александрит' (112,48).

8. Селекционная ценность сорта (CBV) сочетает в себе оценку урожайности и адаптивных возможностей гено-типа. Определение селекционной ценности основано на сравнении урожая в лимитированных (неблагоприятных) и оптимальных (благоприятных) условиях выращивания с учетом усредненных значений этого показателя: $Y_{cp} \times (Y_{min}/Y_{max})$. Чем выше значение CBV, тем стабильнее и ценнее в селекционном плане сорт. Наиболее высокий показатель селекционной ценности имели сорта 'Армада' (26,09), 'Александрит' (18,08) и 'Арго' (15,08).

9. Уровень стабильности сорта (CSL) позволяет одновременно учитывать уровень и стабильность урожайности. Рассчитывается как отношение квадрата средней урожайности сорта за годы исследований к коэффициенту вариации (Y_{cp}^2 / CV). Высокие значения свидетельствуют о способности сорта отзываться на улучшение условий выращивания, а при усилении воздействия

Исходя из того, что перегиб «локтя» пришелся на количество кластеров, равное четырем, это значение и выбрали в качестве оптимального для проведения дальнейшего кластерного анализа (рис. 1).

Как видно из данных, представленных на рисунке 2, сорта картофеля, одновременно сочетающие наиболее высокие значения товарной урожайности и параметров адаптивности (генетическая гибкость, экологическая пластичность, селекционная ценность, гомеостатичность, уровень стабильности), вошли в кластеры № 1 и № 3. При этом кластер № 1 представлен одним-единственным сортом 'Армада' (среднеспелый), в то время как в кластер № 3 вошло 15 сортов: 'Александрит', 'Арго', 'Блосом', 'Калужский', 'Спринтер', 'Холмогорский', 'Удача', 'Ред Скарлетт' (ранние); 'Зырянец', 'Тайфун', 'Шах' (среднеранние); 'Мираж', 'Орлан', 'Розовый Чародей', 'Флагман' (среднеспелые). Таким образом, из 58 изученных было выделено 16 сортов картофеля, отличающихся высокой товарной урожайностью и адаптивностью к условиям выращивания (главным образом речь идет об адаптивности к влагообеспеченности во 2-й половине вегетации).

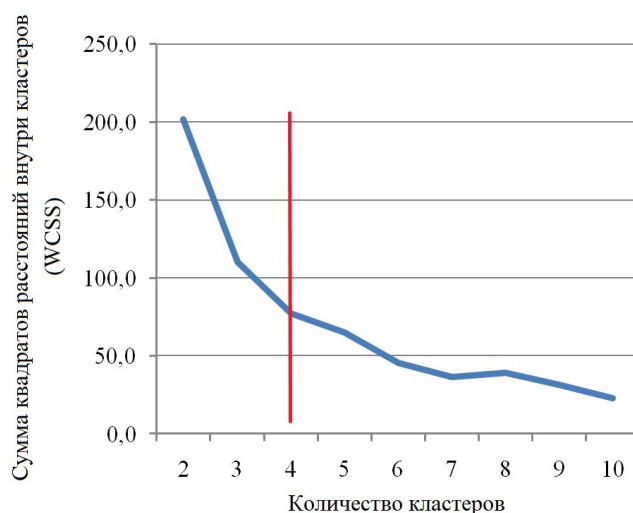


Рис. 1. Графическое представление «метода локтя» для определения оптимального числа кластеров (красной линией показана точка перегиба)

Fig. 1. Graphical representation of the elbow method for identifying the optimal number of clusters (the red line shows the inflection point)

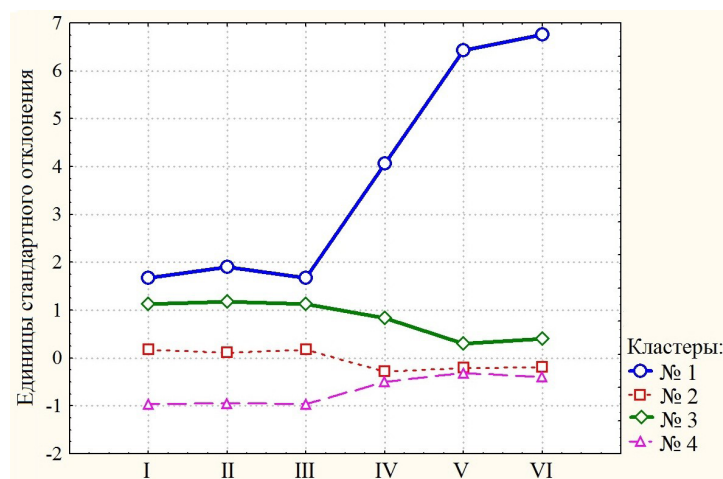


Рис. 2. Кластерный анализ сортов картофеля:

I – товарная урожайность; II – генетическая гибкость; III – индекс экологической пластичности; IV – селекционная ценность сорта; V – гомеостатичность; VI – показатель уровня стабильности сорта (кластеры с наиболее адаптивными сортами выделены сплошными жирными линиями)

Fig. 2. Cluster analysis of potato cultivars:

I – average commercial yield; II – genetic flexibility; III – index of environmental plasticity; IV – cultivar breeding value; V – homeostasis; VI – cultivar stability level indicator (clusters with the most adaptable cultivars are highlighted with solid bold lines)

Дальнейшие исследования в области изучения адаптивных свойств сортов картофеля должны быть направлены на расширение агроклиматических зон выращивания и создание единой цифровой базы данных, позволяющей объективно оценивать хозяйственно ценные признаки и вести селекционную работу более целенаправленно.

Заключение

Для 58 изученных сортов картофеля на основе дисперсионного анализа показано влияние условий влагообеспеченности 2-й половины вегетации как на формирование собственно товарной урожайности (фактор года – 57,8%), так и на проявление адаптивных свойств

сортов картофеля (сочетание факторов «сорт × год» – 25,7%). Анализ данных по динамике товарной урожайности в зависимости от условий среды позволил рассчитать параметры пластичности и стабильности, основные из которых методом кластерного анализа использовались для выявления наиболее высокоурожайных и адаптивных к влагообеспеченности сортов картофеля: 'Александрит', 'Арго', 'Блоссом', 'Калужский', 'Спринтер', 'Холмогорский', 'Удача', 'Ред Скарлетт' (ранние); 'Зырянец', 'Тайфун', 'Шах' (среднеранние); 'Армада', 'Мираж', 'Орлан', 'Розовый Чародей', 'Флагман' (среднепоздние). Перечисленные 16 из 58 сортов отличались при выращивании на дерново-подзолистой супесчаной почве Московской области не только высоким адаптивным потенциалом, но и высоким

уровнем товарной урожайности в абсолютных величинах. В связи с этим выделившиеся сорта картофеля представляются перспективными как с точки зрения внедрения в производство, так и для использования в качестве доноров хозяйственно ценных признаков в дальнейшей селекционной работе.

References / Литература

- Abeytilakaratna P.D. Factors affect to stolon formation and tuberization in potato: a review. *Agricultural Reviews*. 2022;43(1):91-97. DOI: 10.18805/ag.R-187
- Aniskov N.I., Safonova I.V. The assessment of the indicators of stress resistance, stability and plasticity of winter rye varieties according to the "mass of 1000 grains". *The Bulletin of KrasGAU*. 2020;(9):27-35. [in Russian] (Анисков Н.И., Сафонова И.В. Оценка показателей стрессоустойчивости, стабильности и пластичности сортов озимой ржи по массе 1000 зерен. *Вестник КрасГАУ*. 2020;(9):27-35). DOI: 10.36718/1819-4036-2020-9-27-35
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial with fundamentals of statistical processing of research results (Metodika polevogo opyta s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy). Moscow; 2012. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. Москва; 2012).
- Eberhart S.A., Russell W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 1966;6(1):36-40. DOI: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x
- Evstratova L.P., Kuznecova L.A., Nikolaeva E.V. Agroecological assessment of potato varieties under the conditions of the Republic of Karelia. *Zemledelie = Crop Farming*. 2025;(3):36-39. [in Russian] (Евстратова Л.П., Кузнецова Л.А., Николаева Е.В. Агроэкологическая оценка сортов картофеля в условиях Республики Карелия. *Земледелие*. 2025;(3):36-39). DOI: 10.24412/0044-3913-2025-3-36-39
- Filippov E.G., Bragin R.N., Dontsov D.P. Analysis of adaptability indicators of spring barley varieties and lines in the ecological variety testing. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2022;4(32):222-231. [in Russian] (Филиппов Е.Г., Брагин Р.Н., Донцов Д.П. Анализ показателей адаптивности сортов и линий ярового ячменя в экологическом сортоиспытании. *Таврический вестник аграрной науки*. 2022;4(32):222-231).
- Gerieva F.T., Revazova Z.I. Evaluation of potato varieties by productivity and adaptability in the conditions of the North Caucasus region. *The Agrarian Scientific Journal*. 2024;(2):10-17. [in Russian] (Гериева Ф.Т., Ревазова З.И. Оценка сортов картофеля по продуктивности и адаптивности в условиях Северо-Кавказского региона. *Аграрный научный журнал*. 2024;(2):10-17). DOI: 10.28983/asj.y2024i2pp10-17
- Goncharenko A.A. On adaptivity and ecological resistance of grain crop varieties. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2005;(6):49-53. [in Russian] (Гончаренко А.А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2005;(6):49-53).
- Gryaznov A.A. Karabalyk barley (Karabalykskiy yachmen). Kostanay; 1996. [in Russian] (Грязнов А.А. Карабалыкский ячмень. Кустанай; 1996).
- Kendal E. Comparing durum wheat cultivars by genotype $\times$ yield $\times$ trait and genotype $\times$ trait biplot method. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2019;79(4):512-522. DOI: 10.4067/S0718-58392019000400512
- Li J., Jia Y., Li F., Su X., Luo J., Dong Y. et al. An AI-powered knowledge hub for potato functional genomics. *Plant Communications*. 2026;7(5):101730. DOI: 10.1016/j.xplc.2026.101730
- Maltsev S.V. Efficiency of ethylene application on seed potato tubers. *Agricultural Biology*. 2021;56(1):44-53. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.1.44eng
- Maltsev S.V., Andrianov S.V., Shishkova S.G., Zhevora S.V., Mityushkin A.V., Vasil'eva S.V. et al. Productivity of ethylene-treated seed potatoes (*Solanum tuberosum* L.) depending on growing conditions. *Agricultural Biology*. 2024;59(5):1008-1019. [in Russian] (Мальцев С.В., Андрианов С.В., Шишкова С.Г., Жевора С.В., Митюшкин А.В., Васильева С.В. и др. Продуктивность обработанного этиленом семенного картофеля (*Solanum tuberosum* L.) в зависимости от условий выращивания. *Сельскохозяйственная биология*. 2024;59(5):1008-1019). DOI: 10.15389/agrobiology.2024.5.1008rus
- Maltsev S.V., Zeiruk V.N., Belov G.L., Vasil'eva S.V., Derevjagina M.K. The influence of phytohormone ethylene on growth, development and yield of potato. *Research on Crops*. 2021;22:75-78. DOI: 10.31830/2348-7542.2021.018
- Mohammadi R., Farshadfar E., Amri A. Comparison of rank-based stability statistics for grain yield in rainfed durum wheat. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 2016;44(1):25-40. DOI: 10.1080/01140671.2015.1100126
- Mukhordova M.E., Cheremisin A.I., Sogulyak S.V., Urman M.V. An integrated approach to the analysis of promising potato breeding material in the conditions of the Omsk region. *Vegetable Crops of Russia*. 2025;(2):20-29. [in Russian] (Мухордова М.Е., Черемисин А.И., Согуляк С.В., Урман М.В. Комплексный подход к анализу перспективного селекционного материала картофеля в условиях Омской области. *Овощи России*. 2025;(2):20-29). DOI: 10.18619/2072-9146-2025-2-20-29
- Naumova E.A., Yudaeva V.E., Vlasova E.V. Evaluation of productivity and adaptability of medium- and late-maturing potato varieties to the conditions of Moscow oblast. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2024;79:50-60. [in Russian] (Наумова Э.А., Юдаева В.Е., Власова Е.В. Оценка средне- и позднеспелых сортов картофеля по параметрам продуктивности и адаптивности к условиям Московской области. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2024;79:50-60). DOI: 10.31676/2073-4948-2024-79-50-60
- Pshechenkov K.A., Zeiruk V.N., Sedova V.I., Maltsev S.V. Autumn treatment of tubers with protecting-stimulating preparations and its effect on storeability and cropping power. *Russian Agricultural Sciences*. 2007;(1):20-22. [in Russian] (Пшеченков К.А., Зейрук В.Н., Седова В.И., Мальцев С.В. Влияние осенней обработки клубней картофеля защитно-стимулирующими веществами на лежкость при хранении и урожайность в последствии. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2007;(1):20-22).
- Rybas' I.A. Breeding grain crops to increase adaptability (review). *Agricultural Biology*. 2016;51(5):617-626. [in Russian] (Рыбась И.А. Повышение адаптивности в селекции зерновых культур (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2016;51(5):617-626). DOI: 10.15389/agrobiology.2016.5.617rus
- Rymuza K., Radzka E., Lenartowicz T. The impact of precipitation conditions on medium-early cultivars of potato yielding. *Journal of Ecological Engineering*. 2015;16(3):206-210. DOI: 10.12911/22998993/2958

- Shabanov A.E. Adaptive capacity of new and promising potato varieties of domestic selection. *Potato and Vegetables*. 2023;(11):32-36. [in Russian] (Шабанов А.Э. Адаптивная способность новых и перспективных сортов картофеля отечественной селекции. *Картофель и овощи*. 2023;(11):32-36). DOI: 10.25630/PAV.2023.56.84.002
- Shabanov A.E., Maltsev S.V., Abrosimov D.V., Solomentsev P.V. Russian cultivars for processing into potato chips. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2025;26(3):608-617. [in Russian] (Шабанов А.Э., Мальцев С.В., Абросимов Д.В., Соломенцев П.В. Российские сорта для переработки на хрустящий картофель. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2025;26(3):608-617). DOI: 10.30766/2072-9081.2025.26.3.608-617
- Udachin R.A., Golovchenko A.P. Methodology for assessing the ecological plasticity of wheat varieties (Metodika otsenki ekologicheskoy plastichnosti sortov pshenitsy). *Seleksiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1990;(5):2-6. [in Russian] (Удачин Р.А., Головченко А.П. Методика оценки экологической пластичности сортов пшеницы. *Селекция и семеноводство*. 1990;(5):2-6).
- Usmanov R.R. Statistical processing of agronomic research data in the STATISTICA program (Statisticheskaya obrabotka dannykh agronomicheskikh issledovaniy v programme "STATISTICA"). Moscow: Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 2020. [in Russian] (Усманов Р.Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA». Москва: МСХА им. К.А. Тимирязева; 2020).
- Vasilyeva S.V., Zeyruk V.N., Derevyagina M.K., Belov G.L., Maltsev S.V. Efficiency of pre-plant treatment of potato tubers against basic phytophages in the central region of Russia. *Research on Crops*. 2021;22:67-71. DOI: 10.31830/2348-7542.2021.016
- Woyann L.G., Zdziarski A.D., Baretta D., Meira D., Dallacorte L.V., Benin G. Selection of high-yielding, adapted and stable wheat lines in preliminary trials. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. 2019;19(4):412-419. DOI: 10.1590/1984-70332019v19n4a58
- Zykin V.A. Environmental plasticity parameters of agricultural plants, their calculation and analysis: methodological recommendations (Parametry ekologicheskoy plastichnosti selskokhozyaystvennykh rasteniy, ikh raschet i analiz: metodicheskiye rekomendatsii). Novosibirsk: VASKhNIL; 1984. [in Russian] (Зыкин В.А. Параметры экологической пластичности сельскохозяйственных растений, их расчет и анализ: методические рекомендации. Новосибирск: ВАСХНИЛ; 1984).

Информация об авторах

Станислав Владимирович Мальцев, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, 140051 Россия, Московская область, Люберцы, пгт. Красково, ул. Лорха, 23, stanmalcev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7211-315X>

Адам Эмирсултанович Шабанов, доктор сельскохозяйственных наук, заведующий отделом, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, 140051 Россия, Московская область, Люберцы, пгт. Красково, ул. Лорха, 23, agro-vniikh@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7703-0617>

Дмитрий Васильевич Абросимов, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, 140051 Россия, Московская область, Люберцы, пгт. Красково, ул. Лорха, 23, abrosimov.dmitry@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6279-4972>

Information about the authors

Stanislav V. Maltsev, Dr. Sci. (Agriculture), Chief Researcher, Russian Potato Research Centre, 23 Lorkha St., Kraskovo Settlement, Lyubertsy, Moscow Province 140051, Russia, stanmalcev@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7211-315X>

Adam E. Shabanov, Dr. Sci. (Agriculture), Head of a Department, Russian Potato Research Centre, 23 Lorkha St., Kraskovo Settlement, Lyubertsy, Moscow Province 140051, Russia, agro-vniikh@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7703-0617>

Dmitry V. Abrosimov, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Russian Potato Research Centre, 23 Lorkha St., Kraskovo Settlement, Lyubertsy, Moscow Province 140051, Russia, abrosimov.dmitry@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6279-4972>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.05.2026; одобрена после рецензирования 04.07.2026; принята к публикации 15.07.2026. The article was submitted on 20.05.2026; approved after reviewing on 04.07.2026; accepted for publication on 15.07.2026.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья

УДК 665.334.7

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-04



Биохимический состав семян нигеллы (*Nigella* L.), выращенных в условиях Северо-Запада РФ

Г. С. Осипова¹, Р. Х. Салих², А. Б. Курина³

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Университет Салахаддин-Эрбиль, Эрбиль, Ирак

³ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Борисовна Курина, nastya_n11@mail.ru

Актуальность. Нигелла посевная (*Nigella sativa* L.) и нигелла дамасская (*N. damascena* L.) – ценные пищевые и лекарственные культуры с широким спектром полезных свойств. Коллекция ВИР включает 103 образца, принадлежащих к пяти видам нигеллы. Комплексный анализ биохимического состава семян нигеллы помогает выделить наиболее перспективные образцы для селекции и пищевой промышленности. Цель исследования – изучение содержания масла, его жирнокислотного состава, витаминов и минеральных веществ в семенах нигеллы для определения направления их использования.

Материалы и методы. Объектами исследования служили 17 образцов *N. sativa* и *N. damascena* различного эколого-географического происхождения из коллекции ВИР. Растения выращивались в пленочных теплицах Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. Биохимические исследования проводили в лаборатории Колледжа сельскохозяйственной инженерии Университета Салахаддин-Эрбиль (Курдистан, Ирак). Содержание масла определяли по массе сухого обезжиренного остатка с помощью аппаратов Сокслета, жирнокислотный состав – методом газовой хроматографии, содержание жирорастворимых витаминов (А, D, Е) – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии, минеральный состав – методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Результаты. Содержание масла в семенах нигеллы варьировало от 26,5% до 38,3%. Доминирующей жирной кислотой во всех образцах являлась линолевая (более 60%). *N. damascena* отличалась более высоким содержанием линолевой и олеиновой кислот. Среднее содержание витамина Е составило 426,7 мг/100 г. Выявлены образцы с высоким накоплением кальция (до 2,4%) и железа (до 87,4 мг/кг).

Заключение. Семена нигеллы являются ценным источником полиненасыщенных жирных кислот, витамина Е и минеральных веществ. Установлены межвидовые различия по минеральному и жирнокислотному составу. Выделены перспективные для селекции и пищевой промышленности образцы нигеллы посевной (к-26, к-36, к-45) с улучшенными биохимическими характеристиками.

Ключевые слова: семена, нигелла, масло, жирные кислоты, витамины, минеральные вещества, изменчивость

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания согласно тематическому плану НИР ВИР по теме № FGEM-2022-0003 «Мировые ресурсы овощных и бахчевых культур коллекции ВИР: эффективные пути раскрытия эколого-генетических закономерностей формирования разнообразия и использования селекционного потенциала».

Для цитирования: Осипова Г.С., Салих Р.Х., Курина А.Б. Биохимический состав семян нигеллы (*Nigella* L.), выращенных в условиях Северо-Запада РФ. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):129-138. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-04

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

COLLECTIONS OF THE WORLD'S CROP GENETIC RESOURCES FOR THE DEVELOPMENT OF PRIORITY PLANT BREEDING TRENDS

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-04

Biochemical composition of nigella (*Nigella* L.) seeds grown in the Northwest of Russia

Galina S. Osipova¹, Raad Hussein Salih², Anastasia B. Kurina³¹ St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Russia² Salahaddin University-Erbil, Erbil, Iraq³ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia**Corresponding author:** Anastasia B. Kurina, nastya_n11@mail.ru

Background. *Nigella sativa* L. and *N. damascena* L. are valuable food and medicinal crops with a wide range of pharmacological properties. The VIR collection includes 103 accessions belonging to five species. A comprehensive analysis of the biochemical composition of *Nigella* seeds helps identify the most promising accessions for breeding and the food industry. The objective of the study was to analyze the oil content, fatty acid composition, vitamins, and mineral composition in *Nigella* seeds to decide on their uses.

Materials and methods. Seventeen accessions of *N. sativa* and *N. damascena* of various ecogeographic origin from the VIR collection served as the research material. The plants were cultivated in greenhouses at St. Petersburg State Agrarian University. Biochemical studies were conducted at the Central Laboratory of the College of Agricultural Engineering, Salahaddin University-Erbil (Kurdistan, Iraq). Oil content was measured by the Soxhlet method, fatty acid composition by gas chromatography, fat-soluble vitamins (A, D, E) by high-performance liquid chromatography, and mineral composition by atomic absorption spectrometry.

Results. The oil content in *Nigella* seeds varied from 26.5% to 38.3%. Linoleic acid (over 60%) was the dominant fatty acid in all accessions. *N. damascena* manifested higher content of linoleic and oleic acids. The average vitamin E content was 426.7 mg/100 g. Accessions with high accumulation of calcium (up to 2.4%) and iron (up to 87.4 mg/kg) were identified.

Conclusion. *Nigella* seeds are a valuable source of polyunsaturated fatty acids, vitamin E, and minerals. Interspecific differences in mineral composition and fatty acid composition were established. Promising *N. sativa* accessions (k-26, k-36, and k-45) with improved biochemical characteristics were identified for use in the food industry and plant breeding.

Keywords: seeds, nigella, oil, fatty acids, vitamins, mineral substances, variability

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task assigned to VIR in accordance with the thematic R&D plan, Project FGEM-2022-0003 "Global genetic resources of vegetable and cucurbit crops in the VIR collection: effective ways to disclose ecogenetic patterns in the formation of their diversity and utilization of breeding potential".

For citation: Osipova G.S., Salih R.H., Kurina A.B. Biochemical composition of nigella (*Nigella* L.) seeds grown in the Northwest of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):129-138. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-04

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Нигелла посевная (*Nigella sativa* L.) – однолетнее травянистое растение рода *Nigella* L. семейства Лютиковые (Ranunculaceae). Род *Nigella* насчитывает порядка 20 видов, однако именно *N. sativa* получила широкое распространение в качестве ценной пищевой и лекарственной культуры (Prokhorov, 2021). Ареал ее возделывания охватывает регионы Южной Европы, Северной Африки, Восточной и Юго-Западной Азии (Египет, Индия, Пакистан, Иран, Турция), а также частично Северную Америку.

Нигелла дамасская (*N. damascena* L.) происходит из Южной Европы и широко распространена в регионах Европы с умеренным климатом и Средиземноморье. *N. damascena* культивируется по всему миру, особенно в качестве декоративного растения (Badalamenti et al., 2022).

Оба вида нигеллы используются с древних времен в медицине и кулинарии. Благодаря своей сравнительно с нигеллой дамасской высокой адаптивности нигелла посевная имела более высокую коммерческую ценность и большую площадь возделывания, в связи с чем ее химический состав и биологическая активность изучены лучше. Современные научные исследования подтверждают, что семена *N. sativa* обладают широким спектром полезных свойств, включая антимикробную, антигистаминную, противораковую, противосудорожную, противовоспалительную, антидиабетическую, антигипертензивную, диуретическую и антиоксидантную активность (Toma et al., 2015; Majdalawieh, Fayyad, 2016; Shahbazi et al., 2025). Эти свойства связаны с присутствием в семенах фенольных соединений, терпенов, эфирных масел, сапонинов и алкалоидов (Toma et al., 2015; Shahbazi et al.,

2025). Семена нигеллы посевной, кроме того, являются источником питательных компонентов, таких как масло (32,2–41%), белки (13,8–22%), углеводы (17%), минеральные вещества (4,5–7,5%), пищевые волокна (8–16,4%) и витамины (токоферол, ниацин и др.) (Kabir et al., 2019; Shahbazi et al., 2025).

Семена *N. damascena* используются в традиционной медицине (Toma et al., 2015), в хлебопечении, сыроварении и при приготовлении пищи в качестве ароматизаторов (Badalamenti et al., 2022). Семена нигеллы дамасской содержат эфирные масла (0,13–0,39%), алкалоиды, стеролы, фенольные соединения, сапонины, масло (36–50%) и белки (Shahbazi et al., 2025). Сведения о составе семян нигеллы дамасской крайне ограничены, поэтому текущее изучение биохимических особенностей семян нигеллы посевной и дамасской является актуальным.

Коллекция нигеллы ВИР включает 103 образца, принадлежащих к пяти видам различного эколого-географического происхождения: *N. sativa*, *N. damascena*, *N. arvensis* L., *N. orientalis* L. и *N. nigellastrum* (L.) Willk.

Цель нашего исследования заключалась в изучении особенностей биохимического состава (содержания масла и его жирнокислотного состава, жирорастворимых витаминов и минеральных веществ) семян нигеллы посевной и дамасской из коллекции ВИР, выращенных в условиях Северо-Западного региона РФ.

Материалы и методы

Объектом исследования послужили 17 образцов нигеллы посевной и нигеллы дамасской из коллекции ВИР, различающиеся по морфологическим и фенологическим признакам (табл. 1).

Таблица 1. Список изученных образцов нигеллы

Table 1. List of the studied nigella accessions

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Вид, название образца / Species, names of accessions	Происхождение / Origin	Высота растения / Plant height	Период вегетации / Maturation schedule
1	<i>Nigella sativa</i> , б/н	Украина	высокий	среднеспелый
2	<i>N. sativa</i> , б/н	Украина	высокий	среднеспелый
3	<i>N. sativa</i> , б/н	Россия	высокий	среднеспелый
4	<i>N. sativa</i> , б/н	Казахстан	высокий	среднеспелый
6	<i>N. sativa</i> , Tuken asmud	Эфиопия	низкий	скороспелый
7	<i>N. sativa</i> , Tuken asmud	Эфиопия	низкий	среднеспелый
10	<i>N. sativa</i> , б/н	Афганистан	высокий	поздний
16	<i>N. sativa</i> , Шункурт	Эфиопия	среднерослый	среднеспелый
26	<i>N. sativa</i> , б/н	Узбекистан	среднерослый	поздний
29	<i>N. sativa</i> , б/н	Египет	низкий	скороспелый
36	<i>N. sativa</i> , б/н	Индия	низкий	скороспелый
45	<i>N. sativa</i> , б/н	Индия	низкий	скороспелый
54	<i>N. damascena</i> , б/н	Швейцария	низкий	скороспелый
57	<i>N. sativa</i> , б/н	Индия	низкий	скороспелый

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

№ по каталогу ВИР / VIR cata- logue No.	Вид, название образца / Species, names of accessions	Происхождение / Origin	Высота растения / Plant height	Период вегетации / Maturation schedule
58	<i>N. damascena</i> , б/н	Бельгия	среднерослый	среднеспелый
59	<i>N. damascena</i> , б/н	Бельгия	среднерослый	среднеспелый
65	<i>N. sativa</i> , б/н	Марокко	низкий	скороспелый

Примечание: б/н – без названия

Note: б/н – no name

Растения выращивали в пленочных теплицах Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (СПбГАУ) в 2022–2023 гг. Площадь опытной делянки составляла 1 м², с междурядьями 0,2 м, расстояние между растениями – 15 см. Делянки находились друг от друга на расстоянии 0,5 м, растения выращивались в фиксированной густоте (35 растений/м²) в трехкратной повторности. Для получения семян образцы изолировали с помощью спанбонда.

Биохимические исследования проводили в центральной лаборатории Колледжа сельскохозяйственной инженерии Университета Салахаддин-Эрбиль (Курдистан, Ирак).

Для определения содержания масла в семенах нигеллы 5 г измельченных семян каждого образца были обезжирены в аппаратах Сокслета (АОАС, 1995). Жирнокислотный состав масла определен путем разделения эфиров жирных кислот (ЖК). Смесь эфиров ЖК анализировали на газовом хроматографе (GC-2010, Shimadzu, Япония) с пламенно-ионизационным детектором. Эфиры ЖК разделяли на капиллярной колонке HP-Innowax (30 м × 0,25 мм) при температурном режиме: 120–290°C (скорость нагрева – 10 °C/мин), температура инжектора – 280°C, детектора – 310°C (Zhang et al., 2015).

Содержание жирорастворимых витаминов определяли следующим образом. Экстракция витаминов проводилась 0,1-процентным раствором бутилгидрокситолуола в метаноле: 0,5 г образца заливали 5 мл раствора, выдерживали в темноте в течение 2 ч в плотно закрытом сосуде и затем перемешивали в течение 20 мин при комнатной температуре. Образцы центрифугировали перед введением в колонку и анализировали в течение 1 ч. Для разделения жирорастворимых витаминов использовали модель жидкостного хроматографа HPLC SYKAM (Германия). Режим подачи растворов изократический. Подвижная фаза – ацетонитрил: дистиллированная вода (75 : 25) при скорости потока 0,8 мл/мин, колонка C18-ODS (25 см × 4,6 мм) и детектор UV-280 нм (Kozhanova et al., 2002).

Содержание белка в семенах определяли по методу Кьельдаля (Horwitz, Latimer, 2005): навеску измельченных семян нигеллы (0,5 г) минерализовали при нагревании с концентрированной серной кислотой при 420°C в течение полутора часов. Для определения азота использовали анализатор Behr Labor Technik GmbH (Германия) с последующим титрованием 0,1 н-раствором серной кислоты.

Определение состава минеральных веществ нигеллы: макро- (P, K, Ca и Mg) и микроэлементы (Zn, Cu и Fe) изучали с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра Hitachi Model 180-50 (Япония). К 1 г размолотых

семян нигеллы добавляли 10 мл смеси азотной, соляной, серной кислот (5 : 2 : 1, v/v); смесь нагревали до 70°C, выпаривали до достижения объема около 0,5 мл, затем полученный остаток разбавляли в 25 мл воды в мерной колбе. Конечный раствор подвергали атомно-абсорбционному спектрометрическому анализу (Sunita, 2015).

Полученные данные проанализированы с помощью программы STATISTICA v.12.0 (StatSoft Inc., США). Средние значения данных сравнивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Для выявления выделявшихся образцов использовали HCP₀₁.

Результаты

При исследовании семян образцов нигеллы посевной и дамасской различного эколого-географического происхождения выявлены различия по основным биохимическим показателям: масличности, жирнокислотному составу, содержанию жирорастворимых витаминов и минеральных веществ.

В нашем исследовании семена нигеллы характеризовались высоким содержанием масла. Диапазон изменчивости его варьировал от 26,50% (к-1, к-3) до 38,33% (к-57) (табл. 2). Высокое содержание масла выявлено у образцов нигеллы посевной из Индии (к-57), Египта (к-29) и Узбекистана (к-26), а также у образцов нигеллы дамасской из Швейцарии (к-54) и Бельгии (к-58); минимальные – у образцов из России (к-3) и Украины (к-1).

Во всех изученных образцах доминирующей жирной кислотой была линолевая (C18:2), ее содержание варьировало от 60,11% до 62,98%. Это характеризует масло нигеллы как ценный источник омега-6-полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК). Вторая по значимости являлась олеиновая кислота (C18:1) – от 12,00% до 15,85%. Сумма насыщенных кислот (пальмитиновая и стеариновая) была низкой у скороспелых низкорослых форм нигеллы посевной из Индии (к-36, к-57) и среднеспелых высокорослых форм из Украины (к-1, к-2) (см. табл. 2).

Высокое содержание линолевой (63,0%) и олеиновой (15,9%) кислот выявлено у образца *N. sativa* (к-26, Узбекистан), который также отличался одним из самых высоких показателей масличности (37,0%).

Содержание линоленовой кислоты (C18:3) во всех образцах было незначительным (в среднем 1,1%), что является положительным фактором с точки зрения окислительной стабильности масла.

Семена нигеллы являются богатым источником токоферолов (витамина Е). Среднее содержание витамина Е в выборке составило 426,7 ± 4,4 мг/100 г (табл. 3). Высокие показатели выявлены в образцах семян ни-

Таблица 2. Содержание масла и жирных кислот в семенах нигеллы, %

Table 2. Oil and fatty acid content levels in nigella seeds, %

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Выход масла / Oil	Пальмитиновая / C16:0	Стеариновая / C18:0	Олеиновая / C18:1	Линолевая / C18:2	Линоленовая / C18:3
<i>Nigella sativa</i> L.						
1	26,5	15,1	0,6	12,0	60,1	0,8
2	33,0	15,2	0,7	12,3	60,6	0,8
3	26,5	15,5	0,8	13,2	61,4	1,0
4	34,0	15,7	0,8	13,5	61,5	1,0
6	30,0	16,0	1,1	14,7	62,1	1,3
7	30,0	16,2	1,2	15,1	62,5	1,3
10	27,0	15,6	0,9	13,7	61,7	1,1
16	32,5	15,7	0,9	13,8	61,6	1,1
26	37,0	16,6	1,2	15,9	63,0	1,5
29	36,0	16,4	1,2	15,5	62,7	1,4
36	29,0	15,2	0,6	12,1	60,2	0,9
45	30,2	15,4	0,8	12,8	61,2	0,9
57	38,3	15,2	0,6	12,2	60,4	0,8
65	28,5	16,3	1,2	15,2	62,6	1,4
Среднее	31,3 ± 3,9	15,7 ± 0,5	0,9 ± 0,2	13,7 ± 1,4	61,5 ± 1,0	1,1 ± 0,3
<i>N. damascena</i> L.						
54	37,8	15,9	1,0	14,4	61,9	1,2
58	37,2	16,5	1,2	15,7	62,8	1,5
59	31,3	15,9	1,0	14,3	61,8	1,2
Среднее	35,4 ± 3,6	16,1 ± 0,3	1,1 ± 0,1	14,8 ± 0,8	62,2 ± 0,5	1,3 ± 0,2
Среднее по выборке	32,0 ± 4,1	15,8 ± 0,5	0,9 ± 0,2	13,9 ± 1,3	61,6 ± 0,9	1,1 ± 0,3
НСР ₀₁	1,7	0,1	0,1	0,3	1,3	0,1

геллы посевной из Марокко (к-65) – 435,0 мг/100 г, Узбекистана (к-26) – 433,0 мг/100 г и Египта (к-29) – 431,5 мг/100 г, а также у нигеллы дамасской из Бельгии (к-58) – 432,0 мг/100 г. В среднем у образцов вида *N. damascena* (428,8 ± 2,8 мг/100 г) накопление токоферола незначительно превосходило образцы *N. sativa* (426,3 ± 4,7 мг/100 г).

Содержание кальциферола (витамина D) было высоким и коррелировало с уровнем токоферолов (среднее 421,1 ± 4,1 мг/100 г). Наибольшее количество кальциферола и токоферола установлено для образцов нигеллы посевной из Узбекистана (к-26) – 427,5 и 433,0 мг/100 г, Марокко (к-65) – 425,0 и 435,0 мг/100 г, Египта (к-29) – 426,0 и 431,5 мг/100 г соответственно и нигеллы дамасской из Бельгии (к-58) – 426,5 и 432,0 мг/100 г.

Диапазон изменчивости ретинола (витамина А) варьировал в узких пределах (102,2–102,8 мг/100 г), что ха-

рактеризует стабильность признака между образцами выборки (см. табл. 3).

Значительное количество жирорастворимых витаминов, особенно токоферолов, обладающих антиоксидантной активностью, повышает ценность семян нигеллы не только как пищевого продукта, в том числе потенциального компонента функционального питания, но и как сырья для изготовления косметики.

Анализ минерального состава выявил широкий диапазон варьирования содержания макро- и микроэлементов в семенах нигеллы (табл. 4), что, вероятно, связано как с генотипическими особенностями, так и с микроклиматическими условиями теплицы в период вегетации изученных образцов.

Среди макроэлементов доминирующее положение занимает азот (среднее содержание по выборке: 3,70 ± 0,46%). Наибольшее накопление азота отмечено у образ-

Таблица 3. Содержание витаминов в семенах нигеллы, мг/100 г

Table 3. Vitamin content in nigella seeds, mg/100 g

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Токоферол / Tocopherol	Кальциферол / Calciferol	Ретинол / Retinol
<i>Nigella sativa</i> L.			
к-1	420,0	414,7	102,2
к-2	421,2	416,4	102,2
к-3	424,0	418,8	102,4
к-4	424,5	419,3	102,4
к-6	428,5	423,0	102,5
к-7	430,0	424,5	102,6
к-10	426,0	424,0	102,4
к-16	425,5	419,9	102,4
к-26	433,0	427,5	102,8
к-29	431,5	426,0	102,7
к-36	425,0	415,5	102,2
к-45	423,0	417,8	102,3
к-57	421,0	416,0	102,2
к-65	435,0	425,0	102,7
Среднее	426,3 ± 4,7	420,6 ± 4,3	102,4 ± 0,2
<i>N. damascena</i> L.			
к-54	427,5	422,0	102,5
к-58	432,0	426,5	102,7
к-59	427,0	421,6	102,5
Среднее	428,8 ± 2,8	423,4 ± 2,7	102,6 ± 0,2
Среднее по выборке	426,7 ± 4,4	421,1 ± 4,1	102,4 ± 0,2
НСР ₀₁	2,22	1,29	0,01

цов нигеллы посевной из России (к-3) – 4,40% и нигеллы дамасской из Швейцарии (к-54) – 4,40%.

Среднее содержание фосфора составило $0,44 \pm 0,05\%$. Образцы *N. sativa* накапливают фосфор в среднем около 0,45%, тогда как образцы *N. damascena* – 0,39%. Высокое содержание фосфора выявлено у образца нигеллы посевной из Марокко (к-65) – 0,53%.

Содержание калия варьировало в пределах от 0,47% (к-1) до 0,87% (к-16). В среднем у образцов нигеллы посевной этот показатель составил 0,74%, что достоверно выше, чем у образцов нигеллы дамасской (0,62%).

Наибольший интерес среди макроэлементов представляет кальций. Его среднее содержание по выборке составило $1,26 \pm 0,50\%$, однако разброс значений довольно широк – от 0,6% (к-2) до 2,4% (к-36). Высоким содержанием кальция характеризовались образцы нигеллы посевной из Индии (к-36) – 2,40% и Эфиопии (к-6) – 2,00%.

По содержанию магния, наоборот, образцы нигеллы дамасской показали более высокий уровень (0,96%), то-

гда как образцы нигеллы посевной – низкий (0,60%). Высокое содержание магния выявлено у образцов *N. damascena* из Бельгии (к-58) – 1,20% и Швейцарии (к-54) – 1,08% и образцов *N. sativa* из Индии (к-45) и Марокко (к-65) – 1,08%.

Среднее содержание железа по выборке составило $44,08 \pm 27,38$ мг/кг. Образцы *N. sativa* из Эфиопии (к-7) – 86,8 мг/кг, Узбекистана (к-26) – 87,4 мг/кг и Индии (к-45) – 86,5 мг/кг характеризовались высоким накоплением железа в семенах. Образцы нигеллы дамасской показали более стабильные значения по железу ($46,40 \pm 2,61$ мг/кг).

Содержание цинка в семенах нигеллы варьировало от 13,5 мг/кг до 23,7 мг/кг. В среднем образцы *N. sativa* (19,38 мг/кг) превосходят образцы *N. damascena* (16,30 мг/кг) по данному показателю. Цинк критически важен для иммунитета, здоровья кожи и репродуктивной функции, поэтому образцы нигеллы посевной с высоким его содержанием более 23,6 мг/кг (к-1, к-7) представляют особую ценность.

Таблица 4. Содержание минеральных веществ в семенах нигеллы
Table 4. Mineral content in nigella seeds

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	%					мг/кг		
	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Cu	Fe
<i>Nigella sativa</i> L.								
1	3,92	0,44	0,47	1,00	0,60	23,70	6,20	24,40
2	3,42	0,39	0,68	0,6	0,84	20,00	4,33	19,50
3	4,40	0,38	0,71	0,80	0,24	22,90	4,95	20,80
4	3,27	0,46	0,71	0,80	0,48	19,60	5,47	17,10
6	3,52	0,45	0,79	2,00	0,48	22,70	5,30	12,70
7	3,42	0,48	0,86	1,00	0,60	23,60	4,59	86,80
10	2,93	0,46	0,75	1,00	0,12	20,10	5,71	10,80
16	3,42	0,43	0,87	1,20	0,24	17,70	4,50	53,80
26	3,03	0,41	0,76	1,20	0,24	15,90	4,91	87,40
29	3,92	0,49	0,78	1,00	0,72	13,50	6,75	73,70
36	4,01	0,45	0,68	2,40	0,72	19,20	5,81	58,90
45	3,92	0,46	0,79	1,20	1,08	16,90	6,61	86,50
57	4,11	0,49	0,69	1,80	0,96	21,30	3,11	44,00
65	4,11	0,53	0,75	2,00	1,08	14,20	5,39	13,80
Среднее	3,67 ± 0,44	0,45 ± 0,04	0,74 ± 0,10	1,29 ± 0,54	0,60 ± 0,32	19,38 ± 3,36	5,26 ± 0,97	43,59 ± 30,33
<i>N. damascena</i> L.								
54	4,40	0,36	0,59	1,40	1,08	18,40	5,69	48,10
58	3,13	0,38	0,61	1,00	1,20	14,10	5,09	47,70
59	3,92	0,42	0,66	1,00	0,60	16,40	5,04	43,40
Среднее	3,82 ± 0,64	0,39 ± 0,03	0,62 ± 0,04	1,13 ± 0,23	0,96 ± 0,32	16,30 ± 2,15	5,27 ± 0,36	46,40 ± 2,61
Среднее по выборке	3,70 ± 0,46	0,44 ± 0,05	0,71 ± 0,10	1,26 ± 0,50	0,66 ± 0,34	18,84 ± 3,35	5,26 ± 0,88	44,08 ± 27,38
НСР ₀₁	0,07	0,05	0,21	0,07	0,20	1,93	0,20	21,23

Содержание меди имело наименьшую вариабельность среди микроэлементов. Среднее содержание для *N. sativa* и *N. damascena* было практически одинаковым (около 5,26 мг/кг). Наибольшее количество аккумулировали образцы *N. sativa* из Украины (к-1) – 6,20 мг/кг, Египта (к-29) – 6,75 мг/кг и Индии (к-45) – 6,61 мг/кг.

Обсуждение

Проведенное исследование позволило дать комплексную биохимическую характеристику семян образцов нигеллы посевной и дамасской, а также выявить существенный внутри- и межвидовой полиморфизм по изучаемым признакам.

Полученные нами данные по жирнокислотному составу семян нигеллы согласуются с результатами других исследований (Goryainov et al., 2020; Prakhova, Danilov, 2024). Преобладание линолевой кислоты (61,6% в среднем) соответствует литературным данным (Saxena et al., 2017; Prakhova, 2022). Выделившийся образец *N. sativa* из Узбекистана (к-26) с содержанием линолевой кислоты 63,0% может быть отнесен к перспективным генотипам для селекции на улучшение жирнокислотного состава *N. sativa*.

Высокий уровень ПНЖК делает масло нигеллы ценным продуктом, поскольку незаменимые ПНЖК играют ключевую роль в профилактике сердечно-сосудистых заболеваний.

Семена нигеллы являются богатым источником жирорастворимых витаминов, в частности токоферолов (витамина Е) и кальциферолов (витамина D). Витамин Е является мощным антиоксидантом, защищающим ПНЖК (которыми богато масло нигеллы) от перекисного окисления. Высокое содержание витамина Е в семенах нигеллы может обеспечивать стабильность масла при хранении и усиление его антиоксидантного потенциала.

Проведенный анализ элементного состава семян нигеллы выявил существенные межвидовые и межсортовые различия в накоплении макро- и микроэлементов при выращивании в условиях Северо-Западного региона РФ. Полученные данные позволяют оценить адаптационный потенциал культуры и ее пищевую ценность в несвойственных для нее климатических условиях.

Высокое содержание азота у образцов *N. damascena* (к-54) и *N. sativa* (к-3) – 4,40%, может свидетельствовать о повышенной способности данных генотипов к его накоплению в условиях недостаточной теплообеспеченности вегетационного периода, характерной для региона.

Полученные значения по содержанию фосфора (в среднем 0,44%) и калия (0,71%) согласуются с данными Y. Kabir et al. (2019), которые указывают на значительную роль этих элементов в формировании энергетического запаса семян. Калий является ключевым элементом для поддержания водно-солевого баланса и функционирования сердечно-сосудистой системы, и высокие концентрации его в семенах нигеллы повышают их диетическую ценность.

Содержание кальция в семенах составило 1,26%, что согласуется с данными A. M. Sampiev et al. (2014). Выделились образцы *N. sativa* из Эфиопии (к-6) и Марокко (к-65) с содержанием 2,00% и из Индии (к-36) – 2,40%. Высокое содержание кальция повышает ценность семян для профилактики остеопороза. Высокая вариабельность кальция может быть связана как с генетической способностью корневой системы к аккумуляции элемента, так

и с содержанием обменного кальция в почве, где выращивались образцы. Учитывая, что суточная потребность взрослого человека в кальции составляет около 1000 мг, включение в рацион даже небольших количеств семян нигеллы (например, 10–15 г в день) может обеспечить до 5–10% от этой нормы, что является существенным вкладом в ее восполнение, особенно на фоне широко распространенного дефицита этого микроэлемента.

Высокая изменчивость содержания железа (от 10,8 до 87,4 мг/кг) согласуется с данными A. M. Sampiev et al. (2014) и Y. Kabir et al. (2019). Образцы нигеллы посевной (к-26, к-45, к-7) с содержанием железа > 86 мг/кг могут служить натуральным нутрицевтиком для профилактики железодефицитной анемии. Значительные концентрации минеральных компонентов позволяют рассматривать семена изученных образцов как натуральный источник железа для профилактики и коррекции железодефицитных состояний, особенно у вегетарианцев и лиц с повышенной потребностью в элементе (Ahmad et al., 2022).

Цинк является эссенциальным микроэлементом для более чем 300 ферментативных систем человека. Цинк критически важен для нормального функционирования иммунной, репродуктивной систем, синтеза белка, здоровья кожи (Wessels et al., 2017). Суточная потребность взрослого человека в цинке составляет 8–11 мг (Institute of Medicine (US) Panel on Micronutrients, 2001). Учитывая это, образцы нигеллы посевной с высоким содержанием цинка (к-1, к-3, к-7, к-57) могут обеспечить до 20–30% от рекомендуемой суточной нормы при употреблении 10 г семян, что делает их перспективными для обогащения рациона, особенно в регионах с дефицитом цинка.

Содержание меди характеризовалось наименьшей вариабельностью среди всех проанализированных микроэлементов. Медь является кофактором ряда ключевых ферментов дыхательной цепи, антиоксидантной защиты, метаболизма железа и транспорта меди, синтеза нейромедиаторов, коллагена и эластина (Bost et al., 2016). Суточная потребность взрослого человека в меди составляет 0,9–1,3 мг (Institute of Medicine (US) Panel on Micronutrients, 2001). При включении в рацион 10–15 г семян нигеллы можно получить до 5–10% от этой нормы. Стабильность содержания меди в семенах обоих видов нигеллы позволяет рассматривать их как надежный источник этого микроэлемента, в отличие от железа и цинка, накопление которых в большей степени зависит от генотипа и условий выращивания.

Заключение

Проведенное сравнительное исследование биохимического состава семян нигеллы посевной (*N. sativa*) и нигеллы дамасской (*N. damascena*) различного эколого-географического происхождения позволило выявить значительный полиморфизм изученных образцов по основным показателям пищевой ценности.

Семена нигеллы являются маслянистой культурой с содержанием масла от 26,5% до 38,3%, где доминирующей жирной кислотой является линолевая (более 60%), что позволяет отнести масло нигеллы к ценным источникам ПНЖК. Выявлены видовые различия: *N. damascena* характеризуется более значительным содержанием основных жирных кислот (линолевой и олеиновой) по сравнению с *N. sativa*.

Подтверждено высокое содержание токоферолов (в среднем 426,7 мг/100 г), причем максимальное содер-

жание выявлено в семенах нигеллы посевной из Марокко (к-65), Узбекистана (к-26) и нигеллы дамасской из Бельгии (к-58).

Анализ элементного состава выявил широкий диапазон варьирования содержания макро- и микроэлементов, обусловленный как генотипическими особенностями, так и условиями культивирования образцов. Образцы *N. sativa* отличались высоким содержанием фосфора и калия, а образцы *N. damascena* – магния. Особый интерес представляют образцы нигеллы посевной, способные к гипернакоплению железа (к-7, к-26, к-45).

Таким образом, семена нигеллы являются ценным источником масла с высоким содержанием ПНЖК, жирорастворимых витаминов и минеральных веществ. Выделены перспективные образцы нигеллы посевной (к-26, к-36, к-45, к-65, к-57), которые можно рекомендовать для селекции сортов с улучшенным биохимическим составом.

References / Литература

- Ahmad S., Bader Ul Ain H., Tufail T., Nasir M., Qamar A., Mushtaq Z. Iron deficiency anemia: cause, plant based iron, fortification and impact on lifestyle and socioeconomic parameters: cause, plant-based iron, fortification and impact on lifestyle and socioeconomic parameters. *Pakistan BioMedical Journal*. 2022;5(3):18-23. DOI: 10.54393/pbmj.v5i3.336
- AOAC. Official methods of analysis. 16th ed. Gaithersburg, MD: AOAC International; 1995.
- Badalamenti N., Modica A., Bazan G., Marino P., Bruno M. The ethnobotany, phytochemistry, and biological properties of *Nigella damascena* – A review. *Phytochemistry*. 2022;198(10):113165. DOI: 10.1016/j.phytochem.2022.113165
- Bost M., Houdart S., Oberli M., Kalonji E., Huneau J.F., Margaritis I. Dietary copper and human health: Current evidence and unresolved issues. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2016;35:107-115. DOI: 10.1016/j.jtemb.2016.02.006
- Goryainov S.V., Khromov A.V., Bakureza G., Cesar E., Ivlev V.A., Vorobyev A.N. et al. Results of a comparative study of *Nigella sativa* L. seeds oils composition. *Pharmacy and Pharmacology*. 2020;8(1):29-39. [in Russian] [Горяинов С.В., Хромов А.В., Бакуреза Г., Сесар Э., Ивлев В.А., Воробьев А.Н. и др. Результаты сравнительного исследования состава масел семян *Nigella sativa* L. *Фармация и фармакология*. 2020;8(1):29-39]. DOI: 10.19163/2307-9266-2020-8-1-29-39
- Horwitz W., Latimer G.W. Official methods of analysis of AOAC International. Gaithersburg, MD: AOAC International; 2005.
- Institute of Medicine (US) Panel on Micronutrients. Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc. Washington, DC: National Academies Press; 2001. DOI: 10.17226/10026
- Kabir Y., Shirakawa H., Komai M. Nutritional composition of the indigenous cultivar of black cumin seeds from Bangladesh. *Progress in Nutrition*. 2019;21 Suppl 1:428-434. DOI: 10.23751/pn.v21i1-S.6556
- Kozhanova L.A., Fedorova G.A., Baram G.I. Determination of water- and fat-soluble vitamins in multivitamin preparations by high-performance liquid chromatography. *Journal of Analytical Chemistry*. 2002;57(1):40-45. DOI: 10.1023/A:1013657607698
- Majdalawieh A.F., Fayyad M.W. Recent advances on the anticancer properties of *Nigella sativa*, a widely used food additive. *Journal of Ayurveda and Integrative Medicine*. 2016;7(3):173-180. DOI: 10.1016/j.jaim.2016.07.004
- Prakhova T.Ya. Ecological aspects of productivity of nigella varieties in the Middle Volga region. *Russian Agricultural Sciences*. 2022;(2):36-40. [in Russian] [Прахова Т.Я. Экологические аспекты продуктивности сортов нигеллы в условиях Среднего Поволжья. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022;(2):36-40]. DOI: 10.31857/S2500262722020077
- Prakhova T.Ya., Danilov M.V. Assessment of nigella (*Nigella* L.) productivity in the conditions of the forest-steppe of the Middle Volga region. *Technical Crops. Scientific Agricultural Journal*. 2024;4(4):18-24. [in Russian] [Прахова Т.Я., Данилов М.В. Оценка продуктивности нигеллы (*Nigella* L.) в условиях лесостепи Среднего Поволжья. *Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал*. 2024;4(4):18-24]. DOI: 10.54016/SVITOK.2024.31.26.003
- Prokhorov V.N. Nigella is a valuable economically useful crop (literature review). *Vegetable Crops of Russia*. 2021;(4):111-123. [in Russian] [Прохоров В.Н. Нигелла – ценная хозяйственно-полезная культура (обзор литературы). *Овощи России*. 2021;(4):111-123]. DOI: 10.18619/2072-9146-2021-4-111-123
- Sampiev A.M., Rud N.K., Davitavyan N.A. Phytochemical study seeds ringlets seeding. *Fundamental Research*. 2014;(5-1):114-117. [in Russian] [Сампиев А.М., Рудь Н.К., Давитавян Н.А. Фитохимическое изучение семян чернушки посевной. *Фундаментальные исследования*. 2014;(5-1):114-117].
- Saxena S.N., Rathore S.S., Diwakar Y., Kakani R.K., Kant K., Dubey P.N. et al. Genetic diversity in fatty acid composition and antioxidant capacity of *Nigella sativa* L. genotypes. *LWT – Food Science and Technology*. 2017;78:198-207. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.12.033
- Shahbazi E., Safipour B., Saeidi K., Golkar P. Responses of *Nigella damascena* L. and *Nigella sativa* L. to drought stress: Yield, fatty acid composition and antioxidant activity. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2025;24(3):693-705.
- Sunita S. Determination of macro and micro nutrients and nutritional profile of vegetables. *Asian Journal of Bio Science*. 2015;10(2):178-182. DOI: 10.15740/HAS/AJBS/10.2/178-182
- Toma C.C., Olah N.K., Vlase L., Mogoșan C., Mocan A. Comparative studies on polyphenolic composition, antioxidant and diuretic effects of *Nigella sativa* L. (black cumin) and *Nigella damascena* L. (lady-in-a-mist) seeds. *Molecules*. 2015;20(6):9560-9574. DOI: 10.3390/molecules20069560
- Wessels I., Maywald M., Rink L. Zinc as a gatekeeper of immune function. *Nutrients*. 2017;9(12):1286. DOI: 10.3390/nu9121286
- Zhang H., Wang Z., Liu O. Development and validation of a GC-FID method for quantitative analysis of oleic acid and related fatty acids. *Journal of Pharmaceutical Analysis*. 2015;5(4):223-230. DOI: 10.1016/j.jpha.2015.01.005

Информация об авторах

Галина Степановна Осипова, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 196601 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Петербургское шоссе, 2, prof.osipova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5433-4482>

Раад Хуссейн Салих, доктор философии, Университет Салахаддин-Эрбиль, 44002 Ирак, Курдистан, Эрбиль, ул. Занко, raad.salih@su.edu.krd, <https://orcid.org/0009-0006-2775-1367>

Анастасия Борисовна Курина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, и. о. заведующего лабораторией, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, nastya_n11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3197-4751>

Information about the authors

Galina S. Osipova, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, St. Petersburg State Agrarian University, 2 Peterburgskoye Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196601, Russia, prof.osipova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5433-4482>

Raad Hussein Salih, PhD, Salahaddin University-Erbil, Zanko St., Erbil, Kurdistan 44002, Iraq, raad.salih@su.edu.krd, <https://orcid.org/0009-0006-2775-1367>

Anastasia B. Kurina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Acting Head of a Laboratory, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000 Russia, nastya_n11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3197-4751>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 27.05.2026; принята к публикации 25.06.2026.
The article was submitted on 24.03.2026; approved after reviewing on 27.05.2026; accepted for publication on 25.06.2026.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья

УДК 577.2:635.21

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-07

Полиморфизм и наследование маркерной системы третьего экзона *StAN1 Solanum tuberosum* L.

П. В. Фисенко, И. В. Ким, Н. В. Мацишина

Федеральный научный центр агrobiотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Наталия Валериевна Мацишина, mnathalie134@gmail.com

Актуальность. Разработка эффективных полиморфных маркерных систем – приоритетная задача для генетики картофеля (*Solanum tuberosum* L.). Использование молекулярных маркеров позволяет проводить точную идентификацию сортов, что необходимо для защиты интеллектуальной собственности и паспортизации семенного материала. Биосинтез антоцианов представляет собой сложный полигенный процесс, контролируемый множеством структурных и регуляторных локусов. Ключевую роль в инициации этого каскада играет регуляторный ген *StAN1* (кодирующий транскрипционный фактор MYB), характеризующийся высоким уровнем структурного полиморфизма в третьем экзоне. Изучение индивидуального полиморфизма этого локуса открывает новые возможности для точного описания генотипов картофеля и делает маркерную систему *StAN1* ценным инструментом генетического скрининга. Цель исследования – изучить полиморфизм и закономерности наследования маркерной системы третьего экзона гена *StAN1* и оценить возможность ее использования для генотипирования и паспортизации картофеля.

Материалы и методы. Изучены сорта и гибриды с различной пигментацией органов. Наследование анализировали в потомствах от скрещиваний 'Ирбитский' × 'Дарница' и 'Очарование' × 'Bellarosa'. Для выявления вариантов использовали праймеры на третий экзон, характеризующийся полиморфными повторами.

Результаты. Анализ распределения элементов маркерной системы в гибридных популяциях выявил тетрасомический характер наследования индивидуальных аллельных вариантов локуса *StAN1*. Расщепление по *r0* составило 35 : 1, по *r2* и *r3* – 1 : 1, что позволило определить аллельное состояние родительских форм (дуплекс, симплекс, нуллиплекс). В выборке из 66 образцов доминируют варианты *r1* (98,5%) и *r0* (95,5%), тогда как *r2* (45,6%) и *r3* (17,6%) встречаются реже. Прямой связи между наличием конкретных маркеров и фенотипической окраской не выявлено.

Заключение. Высокий полиморфизм и комбинаторный характер наследования аллелей системы *StAN1* позволяют рассматривать ее как эффективный инструмент для описания генотипа и молекулярной паспортизации сортов картофеля.

Ключевые слова: картофель, антоцианы, *StAN1*, ген, маркер, наследование тетрасомическое расщепление, мультигенный кластер

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации государственного задания по теме № FNGW-2025-0002 «Оценить генетическое разнообразие основных сельскохозяйственных культур. Изучить иммунологические механизмы, ответственные за снижение вредоносности фитофагов и фитопатогенов».

Для цитирования: Фисенко П.В., Ким И.В., Мацишина Н.В. Генетическое разнообразие и наследование маркерной системы третьего экзона *StAN1 Solanum tuberosum* L. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):139-151. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-07

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o7

Polymorphism and inheritance of the marker system in the third exon of *StAN1* in *Solanum tuberosum* L.**Petr V. Fisenko, Irina V. Kim, Nathaliya V. Matsishina***Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk, Russia***Corresponding author:** Nathaliya V. Matsishina, mnathalie134@gmail.com

Background. Developing robust polymorphic marker systems is a priority for potato (*Solanum tuberosum*). Molecular markers enable precise cultivar identification, which is essential for intellectual property protection and seed material profiling. Anthocyanin biosynthesis is a complex polygenic process controlled by multiple structural and regulatory loci. A key role in the initiation of this cascade is played by the regulatory gene *StAN1* (encoding the MYB transcription factor), which is characterized by a high level of structural polymorphism in the third exon. Studying the individual polymorphism of this locus opens new opportunities for the precise description of potato genotypes and makes the *StAN1* marker system a valuable tool for genetic screening. The objective of this study was to investigate the polymorphism and inheritance patterns of the *StAN1* third exon marker system and evaluate its potential for potato genotyping and genetic profiling.

Materials and methods. Cultivars and hybrids with diverse organ pigmentation were studied. Inheritance was analyzed in the progenies from the 'Irbitskiy' × 'Darnitsa' and 'Ocharovanie' × 'Bellarosa' crosses. Gene variants were identified using primers targeting the third exon, characterized by polymorphic repeats.

Results. Analyzing the distribution of the marker system elements in the 'Irbitskiy' × 'Darnitsa' population revealed a tetrasomic pattern of inheritance for individual allelic variants at the *StAN1* locus. Segregation ratios were 35 : 1 for *r0*, and 1 : 1 for *r2* and *r3*, enabling the determination of parental allelic states (duplex, simplex, or nulliplex). In a set of 66 accessions, *r1* (98.5%) and *r0* (95.5%) variants predominated, while *r2* (45.6%) and *r3* (17.6%) were less frequent. No direct correlations between specific marker variants and the pigmentation phenotype were found.

Conclusion. High polymorphism of the *StAN1* system and the combinatorial pattern of its allelic inheritance would make it an effective tool for genotypic description and molecular certification of potato cultivars.

Keywords: potato, anthocyanins, *StAN1*, gene, marker, inheritance, tetrasomic segregation, multigene cluster

Acknowledgments: this work was carried out within the framework of the state task, Project No. FNGW-2025-0002 "To assess the genetic diversity of major agricultural crops. To study immunological mechanisms responsible for reducing the harmfulness of phytophages and phytopathogens".

For citation: Fisenko P.V., Kim I.V., Matsishina N.V. Genetic diversity and inheritance of the marker system in the third exon of *StAN1* in *Solanum tuberosum* L. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):139-151. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o7

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Многочисленные исследования показали, что употребление в пищу растений, богатых антоцианами, способствует укреплению здоровья, а также улучшает состояние при хронических и дегенеративных заболеваниях (Joseph et al., 2003; Lee et al., 2005; Achterfeldt et al., 2015). Селекционная работа по созданию специальных диетических сортов картофеля ведется с начала 2000 г. (Brown et al., 2003, 2007, 2008; Brown 2005; Zhang Y. et al., 2009) и в настоящее время не утратила свою актуальность (Kim et al., 2020, 2022). Установлена положительная корреляция между содержанием антоцианов и других групп фенольных соединений в тканях клубней картофеля и антиоксидантной активностью (Brown, 2005; Polivanova, Gins, 2019; Kim et al., 2020). Повышение эффективности селекции по признакам окраски мякоти клубня (красная и фиолетовая) связывают с разработкой ДНК-маркеров целевых генов биосинтеза антоцианов (Strygina, Khlestkina, 2017; Kim et al., 2022).

Антоцианы играют важную роль в различных аспектах жизни растений. Они облегчают размножение растений, придавая им яркие цвета, что привлекает опылителей и распространителей семян (Tian et al., 2016). Кроме того, антоцианы защищают растения от ряда биотических и абиотических стрессов, что обеспечивает адаптивность (Harborne, Williams, 2000). Антоцианы являются также и фотозащитными агентами, поглощая избыток излучения и удаляя свободные радикалы (Chalker-Scott, 1999; Guo et al., 2008; Ahmed et al., 2014). В картофеле ген *StAN1*, в некоторых работах обозначавшийся как *StAN2*, по данным многочисленных исследований, активно экспрессировался в клубнях, пигментированных антоцианами, а также демонстрировал положительную корреляцию с уровнями транскриптов структурных генов и с содержанием антоцианов (Koes et al., 2005; Ramsay, Glover, 2005; André et al., 2009). Данный ген кодирует транскрипционный фактор MYB, который вместе с bHLH1 и WD40 запускает синтез фенольных соединений (в том числе антоцианов) (Payuavula et al., 2013). Функциональная активность *StAN1* в отношении влияния на накопление антоцианов доказана многими авторами (André et al., 2009; Jung et al., 2009; Payuavula et al., 2013). Кроме того, трансгенные растения картофеля со сверхэкспрессией *StAN1* демонстрировали накопление антоцианов в кожуре и мякоти клубней, что позволяет предположить его ключевую роль в регуляции биосинтеза антоцианов в клубнях (Jung et al., 2009). Более того, среди клубней разной окраски наблюдаются различия в числе повторов мотива из 10 аминокислот TIAPRQEG1 на С-конце *StAN1*. Благодаря функциональному анализу листьев табака наличие только одной копии этого мотива из 10 аминокислот оказалось оптимальным для активации синтеза антоцианов (Liu et al., 2016).

Высокая изменчивость геномной последовательности *StAN1* была выявлена в третьем экзоне (Jung et al., 2009; Liu et al., 2016). Способность регулировать биосинтез антоцианов в картофеле обеспечивается наличием в белковых продуктах третьего экзона гена *StAN1* одного или двух совершенных десятиаминокислотных г-повторов. К. В. Сtryгиной с соавторами (Strygina et al., 2019) разработаны праймеры, фланкирующие все г-повторы в третьем экзоне гена. Таким образом, по длине ампликона можно выделить функциональные аллели *StAN1*: *StAN1-r0* – 296 пн, *StAN1-r1* – 338 пн, *StAN1-r2* – 377 пн,

StAN1-r3 – 398 пн. Установлено, что все образцы картофеля имеют функциональный аллель *StAN1* для активации биосинтеза антоцианов (Strygina et al., 2019). Изученность полиморфизма ключевых регуляторных локусов, таких как *StAN1*, в селекционных формах *Solanum tuberosum* L. служит важным вспомогательным инструментом (MAS) при подборе родительских пар. Хотя маркерный анализ одного участка гена не заменяет классическую оценку гибридов по комплексу признаков, он позволяет предварительно скринировать селекционный материал на наличие целевых аллельных вариантов (Montefiori et al., 2015).

Цель исследования – изучить полиморфизм и закономерности наследования маркерных фрагментов третьего экзона гена *StAN1* для оценки эффективности данной системы в молекулярно-генетическом генотипировании и паспортизации сортов картофеля. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи: 1) изучить полиморфизм *StAN1* у образцов, различающихся по окраске органов, что является ключевым фактором при оценке возможности использования данного гена как генетического маркера наследования окраски в поколениях; 2) изучить закономерности наследования элементов маркерной системы *StAN1* у картофеля, а также определить видоспецифичность маркерной системы, что необходимо при ее использовании в качестве элемента паспортизации.

Научная новизна проведенного исследования заключается в комплексном анализе геномной организации и структурного полиморфизма ключевого регуляторного гена биосинтеза антоцианов *StAN1* (транскрипционный фактор MYB) у современных коммерческих сортов и гибридных популяций картофеля отечественной и зарубежной селекции. В ходе работы впервые экспериментально определен аллельный состав третьего экзона данного гена для селекционно значимых сортов картофеля 'Bellarosa', 'Очарование' и 'Дарница', что существенно расширяет существующую базу данных о генетическом разнообразии исходного материала, пригодного для маркер-ориентированной селекции (MAS). На основе математического анализа гибридного потомства впервые строго доказан характер наследования редкого аллельного варианта *StAN1-r3* (398 пн), который наследуется по доминантному типу и демонстрирует расщепление, полностью соответствующее классическому моногенному менделевскому соотношению 1 : 1. Кроме того, в работе выявлена высокая эволюционная консервативность фланкирующих последовательностей третьего экзона гена *StAN1* в пределах всего семейства Solanaceae (Пасленовые), что подтверждает универсальность разработанной маркерной системы и возможность ее эффективного использования для амплификации целевых локусов не только у культурного (*S. tuberosum*), но и у дикорастущих видов картофеля, а также у других сородичей. Наконец, характер наследования и специфическое распределение ампликонов позволили научно обосновать сложную геномную архитектуру исследуемого локуса у автотетраплоидного картофеля, обусловленную наличием дублированных копий (паралогов) гена, возникших в процессе естественной полиплоидизации и исторической эволюции предковых форм секции *Petota*.

Непосредственным объектом изучения выступает регуляторный ген биосинтеза антоцианов *StAN1* (в частности, структурный полиморфизм его третьего экзона).

Материалы и методы

Материалом для исследований служили сорта и гибриды картофеля с различиями в пигментации цветков, листьев и клубней. Для изучения закономерностей наследования использовали растения гибридных популяций, полученных в результате скрещивания сортов 'Очарование' × 'Bellarosa' (40 растений), имеющих желтую и розовую окраску кожуры клубней, а также 'Ирбитский' × 'Дарница' (50 растений), имеющих красную окраску кожуры клубней соответственно. Аллельный состав родительских сортов 'Bellarosa', 'Очарование', 'Ирбитский' и 'Дарница' по исследуемому локусу не был описан в доступной литературе и был определен авторами экспериментально в ходе предварительного ПЦР-скрининга коллекционного материала (табл. 1).

0,5 мкМ прямого и обратного праймеров и 10–50 нг ДНК-матрицы. В качестве контроля неспецифической гибридизации праймеров использовали холостую пробу, содержащую полную реакционную смесь без добавления ДНК-матрицы. Температурный профиль реакции подбирали с учетом температуры отжига, представленной авторами данного ДНК-маркера (Strygina et al., 2019): 95° – 5 мин; (95° – 30 с, 55° – 30 с, 72° – 1 мин) – 35 циклов; постэлонгация: 72° – 5 мин. Продукты ПЦР разделяли электрофорезом в 2-процентном агарозном геле, окрашенном бромистым этидием. Визуализацию фрагментов ДНК осуществляли УФ-облучением с помощью геле-документирующей системы Gel-Doc GO (Bio-Rad). Для определения размеров амплифицированных фрагментов использовали маркер молекулярного веса ДНК Step 50 plus («Биолабмикс»).

Таблица 1. Аллельный состав гена *StAN1* у сортов картофеля, использованных в качестве родительских форм
Table 1. Allelic composition of the *StAN1* gene in the potato cultivars used as parental forms

Сорт	<i>StAN1-r0</i> (296 пн)	<i>StAN1-r1</i> (338 пн)	<i>StAN1-r2</i> (377 пн)	<i>StAN1-r3</i> (398 пн)
'Дарница'	+	+	+	–
'Bellarosa'	+	+	–	+
'Очарование'	+	+	–	–
'Ирбитский'	+	+	–	+

Примечание: «+» – наличие фрагмента (аллельного варианта); «–» – отсутствие фрагмента

Note: "+" – presence of the amplicon (allelic variant); "–" – absence of the amplicon

Подбор сортов для скрещивания проводили на основании наличия полиморфных вариантов исследуемой маркерной системы. Ботанические семена гибридных популяций получены в отделе картофелеводства и овощеводства Федерального научного центра агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки.

Для исследования видоспецифичности использовали суммарные пробы случайных выборок из посадок томатов, перцев, баклажана, сорной растительности паслена черного, а также пробирочные растения *Solanum stoloniferum* Schltdl. & C.D. Bouché и *S. bulbocastanum* Dunal.

ДНК выделяли с использованием процессора магнитных частиц KingFisher Duo Prime (Thermo Scientific, Сингапур) и набора реактивов MagMAX Plant DNA Kit (Thermo Fisher Scientific, Литва). Отбирали суммарную пробу пяти растений сортов и гибридов в семеноводческих посадках картофеля. Для анализа гибридных популяций использовали индивидуальные сеянцы, выращенные в условиях культуральной комнаты из случайно отобранных гибридных семян каждой схемы скрещивания.

Для выявления вариантов гена *StAN1* использовали пару праймеров: F – 5'GGAAGGACAGCTAACGATG3'; R – 5'AGTGTCTTTTCAGCTTCTCC3', амплифицирующих третий экзон, обладающий полиморфными совершенными г-повторами (Strygina et al., 2019). ПЦР проводили в 10 мкл 2× реакционной смеси «БиоМастер» HS-Taq ПЦР-Color (без содержания Mg²⁺) («Биолабмикс») с добавлением хлорида магния до оптимальной концентрации (подбирали экспериментально) в термодиклере T100 (Bio-Rad) в двух-трех повторностях. Полная реакционная смесь объемом 10 мкл содержала: 5 мкл 2× реакционной смеси «БиоМастер» HS-Taq ПЦР-Color; 1 мМ хлорида магния, по

Статистическую обработку результатов проводили в пакете программ Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft) с использованием критерия χ^2 при вероятности случайности отклонения $p_{0,05}$.

Результаты и обсуждение

В настоящей работе апробирован метод выявления аллельных вариантов гена *StAN1*. Для предварительных исследований были отобраны сорта картофеля с известным или предполагаемым составом вариантов данного гена, изученные авторами используемого ДНК-маркера (Strygina et al., 2019): 'Метеор', 'Фиолетовый', 'Фрителла', а также родительские формы гибридов: 'Жуковский Ранний' (1-7-5A, 419/8-1, 597/4-1), 'Ирбитский' (478), 'Наяда' (478), 'Adretta' (710/10-5), 'Latona' (999/1-1), 'Symphony' (710/10-5, 785/8-5). Ожидаемые размеры фрагментов для выявляемых вариантов составляют: *StAN1-r0* – 296 пн, *StAN1-r1* – 338 пн, *StAN1-r2* – 377 пн, *StAN1-r3* – 398 пн (рис. 1).

В нашем исследовании выявленные варианты маркера полностью совпали с литературными данными для сортов 'Метеор', 'Фиолетовый' и 'Фрителла' (табл. 2).

Сопоставимые результаты получены и для родительских форм гибридов, приведенных авторами маркера. По литературным данным (Strygina et al., 2019), гибрид 710/10-5 имеет варианты *r0*, *r1*, *r3*. По нашим результатам, его родители – сорта 'Adretta', 'Symphony' – показали наличие *r0*, *r1*, *r3* и *r0*, *r1* соответственно. У сортов 'Наяда', 'Adretta', 'Latona' выявлены варианты *r0* и *r1*, что согласуется с литературными данными (Strygina et al., 2019). Следовательно, возможным донором аллеля *r3* у гибри-

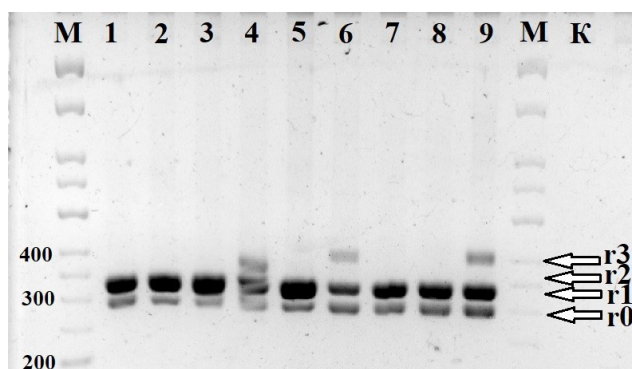


Рис. 1. Электрофореграмма продуктов амплификации полиморфного фрагмента третьего экзона *StAN1* у сортов картофеля: 1 – ‘Метеор’, 2 – ‘Latona’, 3 – ‘Фиолетовый’, 4 – ‘Жуковский Ранний’, 5 – ‘Adretta’, 6 – ‘Ирбитский’, 7 – ‘Фрителла’, 8 – ‘Наяда’, 9 – ‘Symphony’

(М – маркер длин фрагментов Step 50 plus; К – отрицательный контроль реакции;

r0–r3 – выявляемые маркеры вариантов *StAN1*)

Fig. 1. Electrophoresis gel image of an amplified polymorphic fragment from the third exon of *StAN1* in potato cultivars: 1 – ‘Meteor’, 2 – ‘Latona’, 3 – ‘Fioletovy’, 4 – ‘Zhukovskiy Ranniy’, 5 – ‘Adretta’, 6 – ‘Irbitskiy’, 7 – ‘Fritella’, 8 – ‘Nayada’, 9 – ‘Symphony’

(M – Step 50 plus marker of fragment lengths; K – negative control of the reaction;

r0–r3 – detectable markers of *StAN1* variants)

Таблица 2. Полиморфизм гена *StAN1* у сортов и гибридов по литературным данным (Strygina et al., 2019) и результатам данного исследования

Table 2. Polymorphism of the *StAN1* gene in cultivars and hybrids according to the published data (Strygina et al., 2019) and our research results

Сорт, гибрид	<i>StAN1</i>							
	<i>r0</i>		<i>r1</i>		<i>r2</i>		<i>r3</i>	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*
‘Фиолетовый’	+	+	+	+				
‘Метеор’	+	+	+	+				
‘Фрителла’	+	+	+	+				
‘Symphony’		+		+				+
‘Adretta’		+		+				
‘Жуковский Ранний’		+		+		+		
‘Latona’		+		+				
‘Ирбитский’		+		+				+
‘Наяда’		+		+				
710/10-5 (‘Symphony’ × ‘Adretta’)	+		+				+	
785/8-5 (‘Symphony’ × ‘Пушкинец’)	+		+		+			
1-7-5A (‘Жуковский Ранний’ × ‘Утэ’)	+		+		+			
419/8-1 (‘Жуковский Ранний’ × ‘СМ № 1’)	+		+				+	
597/4-1 (‘Жуковский Ранний’ × ‘СМ № 1’)	+		+		+			
999/1-1 (‘Сентябрь’ × ‘Latona’)	+		+		+			
478 (‘Ирбитский’ × ‘Наяда’)	+		+				+	

Примечание: выделены родительские формы, используемые для отработки ПЦР; 1* – литературные данные, 2* – наше исследование (расположение сортообразцов в таблице – в первую очередь сорта, затем гибриды)

Note: parental forms used for PCR optimization are highlighted; 1* – published data, 2* – our research data (the table lists cultivars first, followed by hybrids)

да является сорт 'Symphony'. Аналогичные результаты получены для гибрида 478, имеющего $r0$, $r1$, $r3$. Родительские формы 'Ирбитский' и 'Наяда', по нашим данным, имеют $r0$, $r1$, $r3$ и $r0$, $r1$ соответственно. Следовательно, донором $r3$ может быть сорт 'Ирбитский'.

В результате предварительных экспериментов получены данные, которые согласуются с результатами авторов использующего молекулярного маркера (Strygina et al., 2019). Это свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов ПЦР данной маркерной системы.

Мы попытались оценить полиморфизм третьего экзона гена *StAN1* сортов и гибридов, используемых и созданных селекционерами Федерального научного центра агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки (рис. 2). Большинство исследованных образцов имеют варианты маркера $r0$ и $r1$, за исключением При 15-7-16, у которого $r1$ отсутствует. Вариант $r2$ распространен меньше – у 10 образцов, в то время как $r3$ обнаружен только у четырех образцов. Все четыре варианта представлены только у образца При 15-41-5. У исследованных сортов в большинстве случаев присутствуют три варианта – $r0$, $r1$, $r2$, за исключением сортов 'Казачок', имеющего только $r0$, $r1$, и 'Манифест' – $r0$, $r1$, $r3$ при отсутствии $r2$. Среди исследованных гибридов два образца – При 15-12-23 и 4631-14/10 – имеют только $r0$ и $r1$. У генотипов При 12-41-8 и При 14-8-16 обнаружены $r0$, $r1$, $r2$; у При 15-15-7 – $r0$, $r1$, $r3$; у При 15-7-16 – $r0$, $r2$, $r3$.

маркеров ($r0$, $r1$, $r2$, $r3$), а уникальное сочетание $r0$, $r2$, $r3$ (без варианта $r1$) выявлено у гибрида При 15-7-16. Растения с сине-фиолетовым венчиком цветка в большинстве своем (66,6%) представлены генотипом $r0$, $r1$, $r2$. Два образца (33,3%) имеют только два варианта гена – $r0$ и $r1$. Стоит отметить отсутствие у образцов данной группы варианта $r3$.

Закономерности наследования маркерной системы третьего экзона *StAN1*

Для использования маркерной системы в селекционных исследованиях необходимо знать закономерности ее наследования. Исследуемые варианты гена названы аллелями (Strygina et al., 2019), что позволяет предположить наличие монолокусной системы, наследуемой кодоминантно. В случае кодоминантного типа наследования признака логично ожидать у потомства наличия всех аллелей родительских форм, что было бы удобно применять на практике для идентификации растений гибридного происхождения. Для проверки этой гипотезы мы подобрали гибридную комбинацию, в которой родительские сорта различаются по вариантам данного гена. В качестве материнской формы использовали сорт 'Bellarosa' ($r0$, $r1$, $r3$), а отцовской – 'Очарование' ($r0$, $r1$) (рис. 3). Таким образом, в данной схеме скрещивания полиморфным является $r3$. Было проанализировано 40 растений

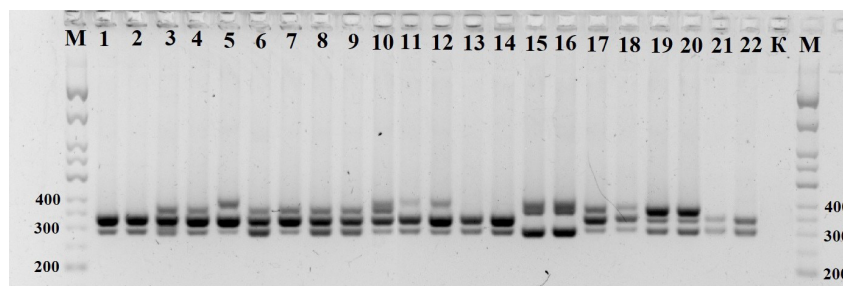


Рис. 2. Электрофореграмма продуктов амплификации полиморфного фрагмента третьего экзона *StAN1* исследуемых сортов и гибридов картофеля: 1–2 – 'Казачок', 3 – 'Дачный', 4 – 'Матушка', 5 – 'Манифест', 6 – 'Черный Принц', 7 – 'Сиреневый Туман', 8 – 'Василек', 9 – 'Цыганка Лора', 10 – При 15-41-5, 11–12 – При 15-15-7, 13–14 – При 15-12-23, 15–16 – При 15-7-16, 17–18 – При 15-41-8, 19–20 – При 15-8-16, 21–22 – 4631-14/10 (M – маркер длин фрагментов Step 50 plus; K – отрицательный контроль реакции)

Fig. 2. Electrophoresis gel image of an amplified polymorphic fragment from the third exon of *StAN1* in the studied potato cultivars and hybrids: 1–2 – 'Kazachok', 3 – 'Dachny', 4 – 'Matushka', 5 – 'Manifest', 6 – 'Cherny Prints', 7 – 'Sirenevy Tuman', 8 – 'Vasilek', 9 – 'Tsyganka Lora', 10 – При 15-41-5, 11–12 – При 15-15-7, 13–14 – При 15-12-23, 15–16 – При 15-7-16, 17–18 – При 15-41-8, 19–20 – При 15-8-16, 21–22 – 4631-14/10 (M – Step 50 plus marker of fragment lengths; K – negative control of the reaction)

Для поиска ассоциаций определенных вариантов исследуемого гена с фенотипом проанализировано 25 образцов картофеля, различающихся по окраске органов (табл. 3). В результате исследования не выявлено однозначной связи между наличием конкретных вариантов гена и проявлением признака окраски органов растений.

В группе с белым цветком (10) большая часть образцов (6) имеет варианты гена $r0$ и $r1$ (60%), четыре образца имеют дополнительно $r2$ (2) и $r3$ (2). В группе с красно-фиолетовым венчиком большинство исследуемых образцов имеют больше двух вариантов гена в различных соотношениях (87,5%), за исключением сорта 'Фрителла' ($r0$, $r1$). Генотип $r0$, $r1$, $r2$ выявлен у трех образцов ('Жуковский Ранний', 'Матушка' и При 15-8-16), тогда как $r0$, $r1$, $r3$ характерен для сортов 'Манифест' и 'Ирбитский'. Также отмечен гибрид При 15-41-5 с полным набором

данной гибридной популяции. В результате получено расщепление 23 $r3+$ и 17 $r3-$. Полученное распределение указывает на наследование $r3$ по доминантному типу. Математический анализ подтвердил соответствие фактических данных ожидаемому расщеплению 1 : 1 ($\chi^2_{\text{расч}} = 0,90$; $df = 1$; $p_{0,05} = 0,34$), поскольку расчетное значение критерия существенно ниже критического теоретического уровня $\chi^2_{\text{теор}} = 3,84$.

Поскольку картофель (*S. tuberosum*) является автотетраплоидом, для него характерен тетрасомический тип наследования, а анализируемые признаки (наличие фрагментов ДНК) проявляются как доминантные. Вследствие этого для выявления соответствующего варианта в фенотипе достаточно присутствия одного доминантного аллеля в локусе. Случайная конъюгация и распределение по гаметам приводит к образованию (по одному

Таблица 3. Разнообразие вариантов *StAN1* у картофеля с разной окраской органов растений**Table 3. Diversity of *StAN1* variants in potatoes with different coloration of plant organs**

Образец	Окраска органов			StAN1			
	клубень		растение				
	кожура	мякоть	антоциановая окраска листа	r0	r1	r2	r3
венчик цветка белый							
‘Метеор’	ж	ж	–	+	+	–	–
‘Latona’	ж	ж	–	+	+	–	–
‘Adretta’	ж	ж	–	+	+	–	–
‘Наяда’	ж	ж	–	+	+	–	–
‘Symphony’	ж	ж	–	+	+	–	+
‘Казачок’	ж	ж	–	+	+	–	–
‘Дачный’	ж	кр	–	+	+	+	–
При 15-41-8	р	кр	+	+	+	+	–
При 15-15-7	р	ж	–	+	+	–	+
При 15-12-23	р	ж	+	+	+	–	–
венчик цветка красно-фиолетовый							
‘Фрителла’	ж	кр	–	+	+	–	–
‘Жуковский Ранний’	р	кр	+	+	+	+	–
‘Матушка’	р	ж	+	+	+	+	–
‘Манифест’	р	ж	+	+	+	–	+
‘Ирбитский’	к	ж	+	+	+	–	+
При 15-7-16	к	ж	+	+	–	+	+
При 15-8-16	ж	кр	–	+	+	+	–
При 15-41-5	р	ж	–	+	+	+	+
венчик цветка сине-фиолетовый							
‘Сиреневый Туман’	с-ф	кр	+	+	+	+	–
‘Василек’	с-ф	кр	+	+	+	+	–
‘Цыганка Лора’	с-ф	кр	+	+	+	+	–
‘Фиолетовый’	ф	с-ф	+	+	+	–	–
‘Черный Принц’	с-ф	с-ф	+	+	+	+	–
4631-14/10	с-ф	с-ф	+	+	+	–	–

Примечание: ж – желтый, р – розовый, к – красный, ф – фиолетовый, кр – кремовый, к-ф – красно-фиолетовый, с-ф – сине-фиолетовый; (+) – наличие признака, (–) – отсутствие признака

Note: ж – yellow, р – pink, к – red, ф – purple, кр – cream, к-ф – red-purple, с-ф – blue-purple; (+) – presence of the trait, (–) – absence of the trait

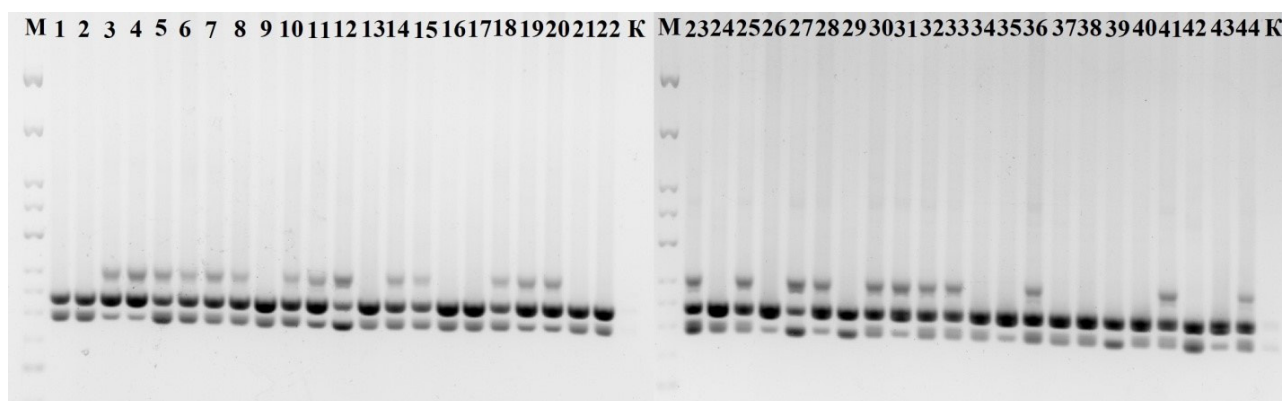


Рис. 3. Электрофореграмма продуктов амплификации полиморфного фрагмента третьего экзона *StAN1* гибридной популяции 'Очарование' × 'Bellarosa': 1–2 – 'Очарование', 3–4 – 'Bellarosa', 5–44 – индивидуальные гибридные растения (М – маркер длин фрагментов Step 50 plus; К – отрицательный контроль реакции)

Fig. 3. Electrophoresis gel image of an amplified polymorphic fragment from the third exon of *StAN1* in the 'Ocharovanie' × 'Bellarosa' hybrid population: 1–2 – 'Ocharovanie', 3–4 – 'Bellarosa', 5–44 – individual hybrid plants (М – Step 50 plus marker of fragment lengths; К – negative control of the reaction)

гену) двух типов гомозигот: AAAA (A4) и aaaa (a), и трех типов гетерозигот: AAAa (A3), AAaa (A2), Aaaa (A1), называющихся квадриплекс, нуллиплекс, триплекс, дуплекс и симплекс соответственно. В зависимости от дозы аллеля в маркированном локусе ожидаются следующие типы расщепления: 1 : 1 (Aaaa \ aaaa), 3 : 1 (Aaaa \ Aaaa), 5 : 1 (AAaa \ aaaa), 11 : 1 (AAaa \ Aaaa) и 35 : 1 (AAaa \ AAAa). При использовании в скрещиваниях хотя бы одного родителя в состоянии триплекса (A3) или квадриплекса (A4) наблюдается отсутствие расщепления в F_1 (Gadjiev et al., 2020). Таким образом, тип расщепления позволяет реконструировать генотип родительских форм по исследуемым маркерам.

На основании полученных данных можно предположить, что сорт 'Bellarosa' является симплексом по $r3$. Кроме того, так как наблюдается расщепление только по полиморфному варианту, можно предположить его независимое наследование. Расщепления для $r0$ и $r1$ в данной гибридной популяции не обнаружено, что может свидетельствовать о наличии трех аллелей каждого из них как минимум у одной из родительских форм.

Для проверки гипотезы о независимом наследовании вариантов гена была проанализирована еще одна гибридная популяция, в которой полиморфными являются $r2$ и $r3$. В качестве материнской формы использовали сорт 'Ирбитский' ($r0$, $r1$, $r3$), а отцовской – сорт 'Дарница' ($r0$, $r1$, $r2$).

В результате исследования пятидесяти растений (рис. 4) обнаружено расщепление по трем вариантам маркера – $r0$ (49 растений), $r2$ (29 растений) и $r3$ (26 растений). Вариант $r1$ присутствовал у всех исследуемых особей.

В нашем исследовании для $r0$ наблюдается расщепление 49 $r0+$ и 1 $r0-$; данное распределение статистически достоверно и с наилучшим соответствием описывается канонической моделью моногенного хромосомного расщепления 35 : 1 ($\chi^2 = 0,11$; $p_{0,05} = 0,739$). При этом альтернативная модель предельного хроматидного расщепления 11 : 1 также формально не может быть категорически отвергнута на 5-процентном уровне значимости ($\chi^2 = 2,63$; $p_{0,05} = 0,052$), однако значение p для нее находится на самой грани критического порога, вследствие чего приоритетной гипотезой рассматривается именно рас-

щепление 35 : 1. Для вариантов $r2$ и $r3$ выявлено расщепление, близкое к 1 : 1 (табл. 4). На основании полученных данных можно определить аллельное состояние локусов у родительских форм. Так, сорт 'Дарница' является дуплексом (A2) по варианту $r0$, триплексом или квадриплексом (A3/A4) по $r1$, симплексом (A2) по $r2$ и нуллиплексом (a) по $r3$. Сорт 'Ирбитский' характеризуется как дуплекс (A2) по $r0$, триплекс или квадриплекс (A3/A4) по $r1$, нуллиплекс (a) по $r2$ и симплекс (A1) по $r3$. Однако в нашем исследовании присутствует еще один гибрид, полученный с использованием сорта 'Ирбитский' – При 15-7-16, имеющий уникальный генотип ($r0$, $r2$, $r3$), характеризующийся отсутствием варианта $r1$ (см. рис. 2). Исходя из этого, можно предположить недостаточность выборки для выявления редкого варианта и расщепления 35 : 1. Принимая во внимание это обстоятельство, можно предположить, что оба родительских сорта являются дуплексами и по $r1$, а предполагаемые генотипы для сорта 'Дарница' $r0$ – A2, $r1$ – A2, $r2$ – A1, $r3$ – a, для сорта 'Ирбитский' $r0$ – A2, $r1$ – A2, $r2$ – a, $r3$ – A1.

Таким образом, исходя из полученных данных следует, что каждый из вариантов наследуется независимо по доминантному типу, где отсутствие амплификации фрагмента рассматривается как альтернативное состояние (отсутствие аллеля).

Важными параметрами молекулярного маркера являются его распространение в популяции и видоспецифичность. На основании полученных нами, а также литературных данных (Strygina et al., 2019) проанализировано 66 образцов сортов и гибридов картофеля. В исследуемой выборке наибольшее распространение имеют $r1$ (98,5%) и $r0$ (95,5%), в то время как варианты $r2$ и $r3$ распространены значительно меньше – 45,6 и 17,6% соответственно.

Для определения видоспецифичности был использован генетический материал представителей семейства Solanaceae – *Solanum lycopersicum* L., *S. melongena* L., *S. nigrum* L., *S. bulbocastanum*, *S. stoloniferum*, *Capsicum annuum* L. В результате ПЦР-анализа у всех исследованных диких видов и сопутствующих культур были стабильно амплифицированы фрагменты размером 296 пн и 338 пн (рис. 5). Это свидетельствует о высокой консервативности участков отжига используемых праймеров в преде-

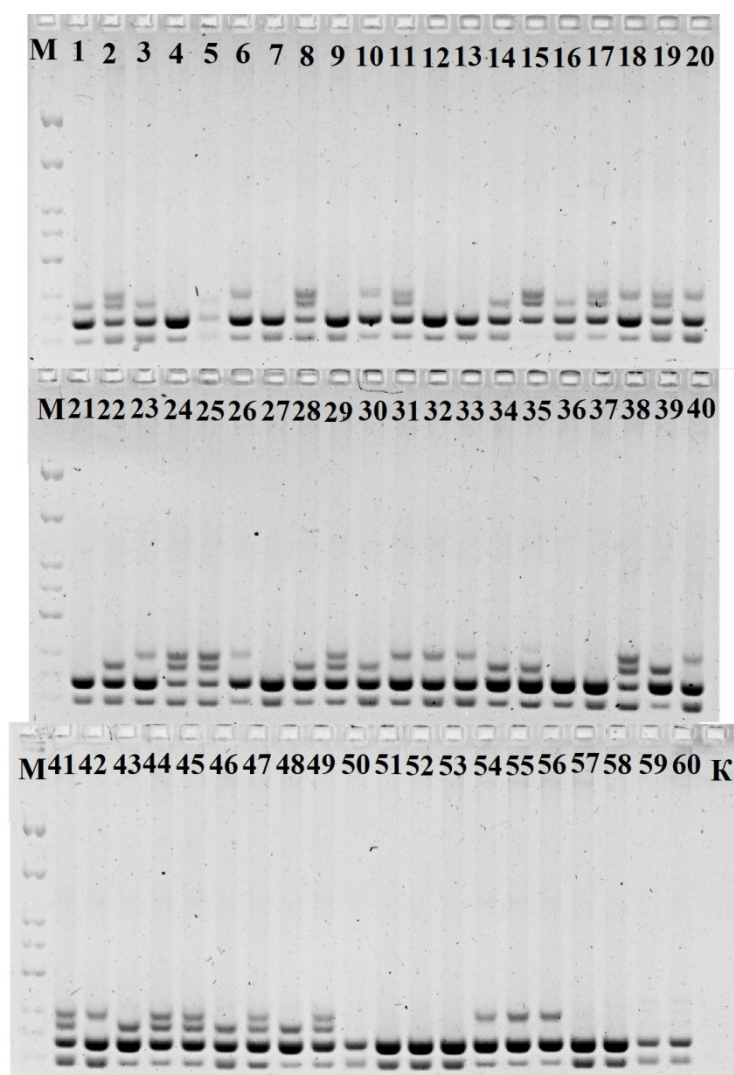


Рис. 4. Электрофореграмма продуктов амплификации полиморфного фрагмента третьего экзона *StAN1* гибридной популяции 'Ирбитский' × 'Дарница': 1–50 – индивидуальные гибридные растения, 51–53 – 'Метеор', 54–56 – 'Bellarosa', 57–58 – 'Gala', 59–60 – *Solanum bulbocastanum* Dunal (M – маркер длин фрагментов Step 50 plus; K – отрицательный контроль реакции)

Fig. 4. Electrophoresis gel image of an amplified polymorphic fragment from the third exon of *StAN1* in the 'Irbitskiy' × 'Darnitsa' hybrid population: 1–50 – individual hybrid plants, 51–53 – 'Meteor', 54–56 – 'Bellarosa', 57–58 – 'Gala', 59–60 – *Solanum bulbocastanum* Dunal (M – Step 50 plus marker of fragment lengths; K – negative control of the reaction)

Таблица 4. Распределение вариантов *StAN1* в гибридном потомстве 'Ирбитский' × 'Дарница'

Table 4. Distribution of *StAN1* variants in the 'Irbitskiy' × 'Darnitsa' hybrid progeny

Теоретическое расщепление	Теоретическое распределение	Фактическое расщепление вариантов <i>StAN1</i> в выборке (n = 50) / χ^2 (P _{0,05})			
		r0	r1	r2	r3
		49/1	50/0	29/21	26/24
1 : 1	25 : 25	– / 46,08 (1,1×10 ⁻¹¹)	–	+ / 1,28 (0,258)	+ / 0,08 (0,752)
3 : 1	37,5 : 12,5	– / 27,76 (1,4×10 ⁻⁷)	–	– / 7,71 (0,006)	– / 14,11 (1,5×10 ⁻⁴)
5 : 1	41,6 : 8,3	– / 18,25 (1,9×10 ⁻⁵)	–	– / 23,73 (1,1×10 ⁻⁶)	– / 34,16 (6,7×10 ⁻⁹)
11 : 1	45,8 : 4,16	± / 2,63 (0,052)	–	– / 83,54 (1,3×10 ⁻¹⁹)	– / 108,18 (2,3×10 ⁻²⁵)
35 : 1	48,6 : 1,38	+ / 0,11 (0,739)	–	– / 278,14 (1,4×10 ⁻⁶²)	– / 364,54 (2,3×10 ⁻⁸¹)

Примечание: (+) – соответствие гипотезе (критическое значение $\chi^2 < 3,84$ при $p \geq 0,05$); (–) – несоответствие; (±) – пограничное значение

Note: (+) – consistency with the hypothesis (critical value $\chi^2 < 3,84$ at $p \geq 0,05$); (–) – inconsistency; (±) – borderline value

лах семейства Solanaceae. Вероятно, данные праймеры могут быть успешно использованы для ПЦР-анализа гомологичных участков у широкого круга представителей семейства.

номным и хромосомным картам картофеля, локус *StAN1* (известный также как локус *D – Developer*) картирован на дистальном конце длинного плеча хромосомы 10 (Jung et al., 2009; Strygina, Khlestkina, 2017; Laimbeer et al., 2020;

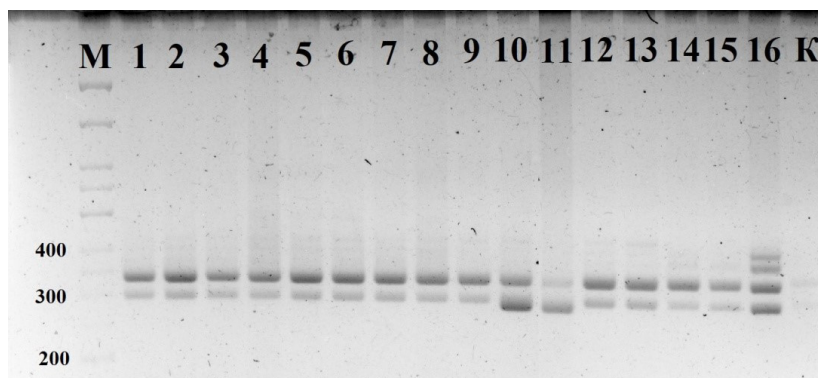


Рис. 5. Электрофореграмма продуктов амплификации полиморфного фрагмента третьего экзона *StAN1* у представителей семейства Solanaceae: 1–3 – *Solanum lycopersicum* L., 4–6 – *S. melongena* L., 7–9 – *Capsicum annuum* L., 10–11 – *Solanum nigrum* L., 12–13 – *S. bulbocastanum* Dunal, 14–15 – *S. stoloniferum* Schltdl. & C.D. Bouché, 16 – растение № 2 гибридной популяции 'Ирбитский' × 'Дарница' (см. рис. 4) (M – маркер длин фрагментов Step 50 plus; K – отрицательный контроль реакции)

Fig. 5. Electrophoresis gel image of an amplified polymorphic fragment from the third exon of *StAN1* in representatives of the Solanaceae family: 1–3 – *Solanum lycopersicum* L., 4–6 – *S. melongena* L., 7–9 – *Capsicum annuum* L., 10–11 – *Solanum nigrum* L., 12–13 – *S. bulbocastanum* Dunal, 14–15 – *S. stoloniferum* Schltdl. & C.D. Bouché, 16 – plant No. 2 from the 'Irbitskiy' × 'Darnitsa' hybrid population (see Fig. 4) (M – Step 50 plus marker of fragment lengths; K – negative control of the reaction)

В результате исследования не выявлено образцов с отсутствием всех четырех фрагментов одновременно. Это позволяет рассматривать исследуемую маркерную систему как удобный и универсальный инструмент для оценки препаратов ДНК картофеля при массовых скринингах и/или анализе гибридных популяций на пригодность к ПЦР с одновременным получением информации о генетической изменчивости образцов. В случае с редкими генотипами возможна их идентификация уже на начальных этапах исследования.

В нашем исследовании не выявлено однозначной зависимости между наличием вариантов *StAN1* и окраской органов растений картофеля. Более того, вызывает интерес влияние наличия вариантов гена с различной функциональностью на жизнеспособность растений и формирование окраски их органов.

Данные, полученные в результате анализа расщеплений в гибридных популяциях, указывают на независимое наследование вариантов *StAN1*, выявляемых данной маркерной системой, по доминантному типу. Такое наследование возможно только в случае свободной и независимой конъюгации в мейозе вариантов гена с выявляемыми отличиями для случайного распределения по гаметам. Таким образом, данные «аллели» должны довольно далеко друг от друга располагаться – в разных хромосомах или на разных плечах хромосом. Известно, что аллели одного и того же гена находятся в одинаковых участках (локусах) гомологичных хромосом. Следовательно, можно было бы сделать вывод, что исследуемые варианты не являются аллелями, а проявляют свойства самостоятельных генов, расположенных в разных локусах. Однако подобная интерпретация вступает в прямое противоречие с молекулярной природой используемой маркерной системы, фланкирующей полиморфные повторы строго внутри третьего экзона единого регуляторного гена *StAN1*. Согласно современным ге-

Du et al., 2025). Высокора разрешающее секвенирование генома *Solanum tuberosum* и сравнительный физический анализ последовательностей показали, что данный хромосомный регион представляет собой сложный мультигенный кластер, сформировавшийся в ходе эволюции секции *Petota* путем серии тандемных сегментных дупликаций (D'Amelia et al., 2014; Zhang Z. et al., 2025). В составе этого единого суперлокуса антоцианового каскада тандемно расположены несколько паралогичных копий гена (таких как *StAN1*, *StFLAN2* и др.), которые в процессе последующей дивергенции, субфункционализации и неравного кроссинговера зафиксировали разное число концевых 10-аминокислотных *r*-повторов (Liu et al., 2016; Strygina et al., 2017, 2019; Laimbeer et al., 2020; Du et al., 2025). Полученные нами данные по расщеплению для *r0* (а также гипотетически по *r1*, с учетом образца При-15-7-16 'Аскольд') в гибридной популяции 'Ирбитский' × 'Дарница' имеют слабую статистическую поддержку (на уровне 5%) в пользу теоретического расщепления 11:1, при высокой поддержке в пользу 35:1. Подобный промежуточный характер статистических показателей дает основания предполагать, что исследуемый локус *StAN1* удален от центромеры хромосомы 10 на расстояние, допускающее прохождение кроссинговера в мейозе. Тем не менее реальная частота кроссоверных событий и последующего двойного редукционного деления в гибридной комбинации 'Ирбитский' × 'Дарница' не достигает своего теоретического максимума. Это смещает фактическое распределение вариантов в сторону приоритетной модели хромосомного расхождения (35:1), что согласуется с современными данными о молекулярной архитектуре данного хромосомного кластера картофеля (Laimbeer et al., 2020; Du et al., 2025).

Новейшие исследования международного коллектива ученых показывают, что началом видообразования представителей секции *Petota* стал акт гибридизации

предковых форм томата с представителем секции *Etuberosum* порядка 9–8,5 млн лет назад. Данное событие привело не только к появлению нового органа – клубня – у представителей семейства, но и запустило взрывной процесс видообразования. Стоит отметить важный момент, затронутый в работе. Уже имеющиеся у предковых форм гены в новом окружении гибридного организма обеспечили формирование клубней возможностью образования функционального комплекса белков, связанных с клубнеобразованием, IT1 (репрессор клубнеобразования в воздушных пазушных почках) от *Etuberosum* и SP6A (основной мобильный сигнальный белок клубнеобразования) от томата (Zhang Z. et al., 2025). Вероятнее всего, образованный таким образом гибрид был диплоидным и не имел возможности полового размножения в связи с самонесовместимостью (Zoteyeva, Tarwaska, 2018; Jing et al., 2025). Наличие вегетативного размножения клубнями обеспечило его выживаемость и распространение. Дальнейшая эволюция видов картофеля обусловлена процессами полиплоидизации, что привело к восстановлению фертильности полиплоидов и огромному биоразнообразию картофеля (Makarova, 2020).

Дубликации разных уровней являются основной движущей силой эволюции растительных организмов. Появление дополнительных копий генов приводит к возникновению новых вариантов в результате мутаций. Чаще всего изменения в регуляторных и кодирующих областях способствуют псевдогенизации – потере геном своих функций, однако наблюдаются также процессы субфункционализации и неофункционализации (Panchy et al., 2016). Так как современные виды секции *Petota* образуют полный полиплоидный ряд от диплоидов ($2n = 2x = 24$) до гексаплоидов ($2n = 6x = 72$) (Makarova, 2020), нельзя отрицать события геномных дубликаций у картофеля в прошлом. Кроме того, показана большая скорость видообразования у представителей *Petota* (0,53 линии на млн лет) по сравнению с *Etuberosum* (0,39 линии на млн лет) и томатом (0,44 линии на млн лет) (Zhang Z. et al., 2025).

С учетом этих фундаментальных данных реальный механизм наследования исследуемой системы в гибридных популяциях носит монолокусный тетрасомический характер и управляется случайным хромосомным расхождением гомологов в мейозе автотетраплоида. Физическое присутствие гомологичных хромосом с индивидуальными аллельными гаплотипами в дозах симплекса и дуплекса воспроизводит математические пропорции 1 : 1 и 35 : 1. Это происходит без привлечения гипотезы о мультилокусном расщеплении маркеров по геному и указывает на комбинаторный характер наследования. Таким образом, высокая изменчивость длин ампликонов отражает не независимость локусов, а сложную внутрикластерную архитектуру паралогов единого региона на 10-й хромосоме картофеля.

В гибридном потомстве у группы сеянцев (в частности, образцов № 2, 8, 11, 17, 19, 24, 25, 29, 38, 41, 44, 45, 47, 49) обнаружено одновременное сочетание всех четырех вариантов ($r0$, $r1$, $r2$ и $r3$) в индивидуальном ПЦР-профиле (см. рис. 4). Этот факт снимает противоречия между расчетными дозами аллелей родительских форм и законами классического тетрасомического расхождения хромосом. В рамках канонической монолокусной модели автотетраплоида одновременное присутствие четырех альтернативных вариантов у потомков от скрещивания форм с предполагаемыми генотипами $r0$ -A2 / $r1$ -A2 / $r2$ -A1 (сорт 'Дарница') и $r0$ -A2 / $r1$ -A2 / $r3$ -A1 (сорт 'Ирбит-

ский') было бы математически невозможным, так как каждый родитель передает в гамете строго две хромосомы. Данный феномен полностью объясняется в рамках концепции мультигенного кластера тандемных дубликаций на хромосоме 10. Согласно современным данным секвенирования генома картофеля, исследуемые фрагменты с разным числом аминокислотных мотивов представляют собой паралогичные копии гена. Они физически сцеплены на одной хромосоме в виде сложных комплексных гаплотипов: например, сцепленные блоки $r1 + r2$ у материнской формы и $r1 + r3$ у отцовской.

Таким образом, появление всех четырех полос на геле у одного растения – результат комбинаторного наследования, то есть случайного сочетания крупных хромосомных блоков при мейотическом расхождении четырех гомологов автотетраплоида.

Выявляемые отличия в третьем экзоне гена связаны с количеством повторов 10-аминокислотного мотива на С-конце StAN1; наличие только одной копии этого мотива является оптимальным для активации биосинтеза антоцианов (Liu et al., 2016). Среди выявляемых вариантов полностью функциональным является только *StAN1-r1* (338 пн), содержащий один 10-аминокислотный мотив, в то время как у *StAN1-r0* (296 пн) он отсутствует, делая данный вариант нефункциональным, а у *StAN1-r2* (377 пн) и *StAN1-r3* (398 пн) данный мотив удвоен и утроен, что снижает их функциональность (Strygina et al., 2019). Исходя из полученных нами данных и анализа литературы, можно предположить псевдогенизацию и субфункционализацию копий генов в процессе эволюции.

Среди исследуемых нами гибридов выявлен уникальный образец При 15-7-16 ('Аскольд'), у которого отсутствует функциональный вариант гена, но при этом окрашена кожура клубня. Можно предположить, что регуляторную функцию обеспечивают варианты со сниженной функциональностью *StAN1-r2* и *StAN1-r3*. С теоретической точки зрения интересно изучить влияние полного отсутствия функциональных вариантов на фенотип и жизнедеятельность организма такого растения, которое можно получить методами селекции. Исходя из того, что варианты $r0$ и $r1$ амплифицируются у других представителей семейства, можно предположить их важную роль в процессах жизнедеятельности. Кроме того, для изучения особенностей эволюции гена было бы интересно исследовать его варианты у видов картофеля всех уровней плоидности.

Заключение

В результате исследования не удалось выявить строгой зависимости между наличием вариантов исследуемого гена и фенотипическим проявлением. Анализ характера расщепления вариантов в гибридных популяциях указывает на комбинаторный характер наследования по доминантному типу. Наблюдаемые различия в длине и числе ампликонов у тетраплоидного картофеля могут быть следствием сложной геномной организации данного локуса – в частности, наличия дублированных копий (паралогов) гена, возникших в процессе естественной полиплоидизации предковых форм секции *Petota*. Стабильное выявление вариантов $r0$ и $r1$ у других представителей семейства Solanaceae указывает на их филогенетическую древность, в то время как варианты $r2$ и $r3$ демонстрируют более узкую внутривидовую вариабельность, что делает их удобными молекулярными маркерами для сортовой идентификации и паспортизации.

References / Литература

- Achterfeldt S., Traka M., Martin C., Vauzour D., Kroon P.A. Do anthocyanins in purple tomatoes reduce the risk of cardiovascular disease? *Proceedings of the Nutrition Society*. 2015;74(OCE1):E85. DOI: 10.1017/S0029665115001007
- Ahmed N.U., Park J.I., Jung H.J., Yang T.J., Hur Y., Nou I.S. Characterization of *dihydroflavonol 4-reductase (DFR)* genes and their association with cold and freezing stress in *Brassica rapa*. *Gene*. 2014;550(1):46-55. DOI: 10.1016/j.gene.2014.08.013
- André C.M., Schafleitner R., Legay S., Lefèvre I., Aliaga C.A., Nomberto G. Et al. Gene expression changes related to the production of phenolic compounds in potato tubers grown under drought stress. *Phytochemistry*. 2009;70(9):1107-1116. DOI: 10.1016/j.phytochem.2009.07.008
- Brown C.R. Antioxidants in potato. *American Journal of Potato Research*. 2005;82(2):163-172. DOI: 10.1007/BF02853654
- Brown C.R., Culley D., Bonierbale M., Amorós W. Anthocyanin, carotenoid content, and antioxidant values in native South American potato cultivars. *HortScience*. 2007;42(7):1733-1736.
- Brown C.R., Culley D., Yang C.P., Durst R., Wrolstad R.E. Variation of anthocyanin and carotenoid contents and associated antioxidant values in potato breeding lines. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2005;130(2):174-180. DOI: 10.21273/JASHS.130.2.174
- Brown C.R., Durst R.W., Wrolstad R.E., De Jong W.S. Variability of phytonutrient content of potato in relation to growing location and cooking method. *European Potato Journal*. 2008;51(3-4):259-270. DOI: 10.1007/s11540-008-9115-0
- Brown C.R., Wrolstad R.E., Durst R., Yang C.P., Clevidence B. Breeding studies in potatoes containing high concentrations of anthocyanins. *American Journal of Potato Research*. 2003;80(4):241-249. DOI: 10.1007/BF02855360
- Chalker-Scott L. Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. *Photochemistry and Photobiology*. 1999;70(1):1-9. DOI: 10.1111/j.1751-1097.1999.tb01944.x
- D'Amelia V., Aversano R., Batelli G., Caruso I., Castellano Moreno M., Castro-Sanz A.B. et al. High *AN1* variability and interaction with basic helix-loop-helix co-factors related to anthocyanin biosynthesis in potato leaves. *The Plant Journal*. 2014;80(3):527-540. DOI: 10.1111/tpj.12653
- Du H., Zhai Z., Pu J., Liang J., Wang R., Zhang Z. Et al. Two tandem R2R3 MYB transcription factor genes cooperatively regulate anthocyanin accumulation in potato tuber flesh. *Plant Biotechnology Journal*. 2025;23(5):1521-1534. DOI: 10.1111/pbi.14602
- Gadjiev N.M., Lebedeva V.A., Rybakov D.A., Ivanov A.V., Zheltova V.V., Fomina N.A. et al. On using data from marker-assisted selection of source material and intervarietal hybrids in practical potato breeding. *Agricultural Biology*. 2020;55(5):981-994. [in Russian] [Гаджиев Н.М., Лебедева В.А., Рыбаков Д.А., Иванов А.В., Желтова В.В., Фомина Н.А. и др. Использование в практической селекции картофеля результатов ДНК-маркирования исходных родительских форм и межсортовых гибридов. *Сельскохозяйственная биология*. 2020;55(5):981-994]. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.5.981rus
- Guo J., Han W., Wang M.H. Ultraviolet and environmental stresses involved in the induction and regulation of anthocyanin biosynthesis: a review. *African Journal of Biotechnology*. 2008;7(25):4966-4972. Available from: <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/59709> [accessed Jun. 22, 2019].
- Harborne J.B., Williams C.A. Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry*. 2000;55(6):481-504. DOI: 10.1016/S0031-9422(00)00235-1
- Jing X., Qian D., Jiang X., Wang P., Bao H., Li D. et al. Genetic diversity of the self-incompatibility locus in diploid potato. *Journal of Integrative Agriculture*. 2025;24(4):1448-1460. DOI: 10.1016/j.jia.2024.12.011
- Joseph J.A., Denisova N.A., Arendash G., Gordon M., Diamond D., Shukitt-Hale B. et al. Blueberry supplementation enhances signaling and prevents behavioral deficits in an Alzheimer disease model. *Nutritional Neuroscience*. 2003;6(3):153-162. DOI: 10.1080/1028415031000111282
- Jung C.S., Griffiths H.M., De Jong D.M., Cheng S., Bodis M., Kim T.S. et al. The potato developer (D) locus encodes an R2R3 MYB transcription factor that regulates expression of multiple anthocyanin structural genes in tuber skin. *Theoretical and Applied Genetics*. 2009;120(1):45-57. DOI: 10.1007/s00122-009-1158-3
- Kim I., Vozniuk V., Volkov D., Klykov A. Study of anthocyanins in tubers of potato hybrids (*Solanum tuberosum* L.) of Primorsky Krai selection. In: A. Muratov, S. Ignateva (eds). *Agricultural Innovation Systems, Vol. 1: Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2021)*. Cham: Springer; 2022. p.113-121. DOI: 10.1007/978-3-030-91402-8
- Kim I.V., Volkov D.I., Zakharenko V.M., Zakharenko A.M., Golohvast K.S., Klykov A.G. Composition and quantification of antocianins in healthy-diet potato (*Solanum tuberosum* L.) varieties for growing and selection in the Russian Far East. *Agricultural Biology*. 2020;55(5):995-1003. [in Russian] [Ким И.В., Волков Д.И., Захаренко В.М., Захаренко А.М., Голохваст К.С., Клыков А.Г. Состав и содержание антоцианов в диетических сортах картофеля (*Solanum tuberosum* L.), перспективных для выращивания и селекции в условиях Дальнего Востока России. *Сельскохозяйственная биология*. 2020;55(5):995-1003]. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.5.995rus
- Koes R., Verweij W., Quattrocchio F. Flavonoids: A colorful model for the regulation and evolution of biochemical pathways. *Trends in Plant Science*. 2005;10(5):236-242. DOI: 10.1016/j.tplants.2005.03.002
- Laimbeer F.P.E., Bargmann B.O.R., Holt S.H., Pratt T., Peterson B., Doulis A.G. et al. Characterization of the *F* locus responsible for floral anthocyanin production in potato. *G3: Genes, Genomes, Genetics*. 2020;10(10):3871-3879. DOI: 10.1534/g3.120.401684
- Lee J., Lee H.K., Kim C.Y., Hong Y.J., Choe C.M., You T.W. et al. Purified high-dose anthocyanoside oligomer administration improves nocturnal vision and clinical symptoms in myopia subjects. *The British Journal of Nutrition*. 2005;93(6):895-899. DOI: 10.1079/BJN20051438
- Liu Y., Li-Wang K., Espley R.V., Wang L., Yang H., Yu B. et al. Functional diversification of the potato R2R3 MYB anthocyanin activators AN1, MYBA1, and MYB113 and their interaction with basic helix-loop-helix cofactors. *Journal of Experimental Botany*. 2016;67(8):2159-2176. DOI: 10.1093/jxb/erw014
- Makarova T.O. The use of molecular cytogenetic methods in the investigation of distant potato hybrids. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(2):30-38. [in Russian] [Макарова Т.О. Использование методов молекулярной цитогенетики в исследованиях отдаленных гибридов картофеля. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(2):30-38]. DOI: 10.30901/2658-6266-2020-2-04
- Montefiori M., Brendolise C., Dare A.P., Lin-Wang K., Davies K.M., Hellens R.P. et al. In the Solanaceae, a hierar-

- chy of bHLHs confer distinct target specificity to the anthocyanin regulatory complex. *Journal of Experimental Botany*. 2015;66(5):1427-1436. DOI: 10.1093/jxb/eru494
- Panchy N., Lehti-Shiu M., Shiu S.H. Evolution of gene duplication in plants. *Plant Physiology*. 2016;171(4):2294-2316. DOI: 10.1104/pp.16.00523
- Payyavula R.S., Singh R.K., Navarre D.A. Transcription factors, sucrose, and sucrose metabolic genes interact to regulate potato phenylpropanoid metabolism. *Journal of Experimental Botany*. 2013;64(16):5115-5131. DOI: 10.1093/jxb/ert303
- Polivanova O.B., Gins E.M. Antioxidant activity of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) and anthocyanin content, its biosynthesis and physiological role. *Vegetable Crops of Russia*. 2019;(6):84-90. [in Russian] [Поливанова О.Б., Гинс Е.М. Антиоксидантная активность пигментированного картофеля (*Solanum tuberosum* L.), содержание антоцианов, их биосинтез и физиологическая роль. *Овощи России*. 2019;(6):84-90]. DOI: 10.18619/2072-9146-2019-6-84-90
- Ramsay N.A., Glover B.J. MYB-bHLH-WD40 protein complex and the evolution of cellular diversity. *Trends in Plant Science*. 2005;10(2):63-70. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.12.011
- Strygina K.V., Khlestkina E.K. Anthocyanins synthesis in potato (*Solanum tuberosum* L.): genetic markers for smart breeding (review). *Agricultural Biology*. 2017;52(1):37-49. [in Russian] [Стрыгина К.В., Хлесткина Е.К. Синтез антоцианов у картофеля (*Solanum tuberosum* L.): генетические маркеры для направленного отбора (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2017;52(1):37-49]. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.37rus
- Strygina K.V., Kochetov A.V., Khlestkina E.K. Genetic control of anthocyanin pigmentation of potato tissues. *BMC Genetics*. 2019;20 Suppl 1:27. DOI: 10.1186/s12863-019-0728-x
- Tian J., Chen J., Ye X., Chen S. Health benefits of the potato affected by domestic cooking: A review. *Food Chemistry*. 2016;202:165-175. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.01.120
- Zhang Y., Jung C.S., De Jong W.S. Genetic analysis of pigmented tuber flesh in potato. *Theoretical and Applied Genetics*. 2009;119(1):143-150. DOI: 10.1007/s00122-009-1024-3
- Zhang Z., Zhang P., Ding Y., Wang Z., Ma Z., Gagnon E. et al. Ancient hybridization underlies tuberization and radiation of the potato lineage. *Cell*. 2025;188(19):5249-5265. DOI: 10.1016/j.cell.2025.06.034
- Zoteyeva N.M., Tarwacka Yu. The Mexican potato species *Solanum neoantipoviczii* BUK. (= *S. stoloniferum* Schlecht.) from the taxonomic series Longipedicellata BUK. and its use in interspecific hybridization. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(3):188-193. [in Russian] [Зотеева Н.М., Тарвацка Ю. Мексиканский вид картофеля *Solanum neoantipoviczii* BUK. (= *S. stoloniferum* Schlecht.) из таксономической серии Longipedicellata Buk. для использования в межвидовой гибридизации. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(3):188-193]. DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-188-193

Информация об авторах

Петр Викторович Фисенко, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, phisenko@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1727-4641>

Ирина Вячеславовна Ким, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, kimira-80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0656-0645>

Наталья Валериевна Мацишина, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, mnathalie134@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0165-1716>

Information about the authors

Petr V. Fisenko, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settle., Ussuriysk 692539, Russia, phisenko@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1727-4641>

Irina V. Kim, Dr. Sci. (Agriculture), Chief Researcher, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settle., Ussuriysk 692539, Russia, kimira-80@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0656-0645>

Nathaliya V. Matsishina, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settle., Ussuriysk 692539, Russia, mnathalie134@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0165-1716>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена после рецензирования 09.02.2026; принята к публикации 08.07.2026. The article was submitted on 10.07.2025; approved after reviewing on 09.02.2026; accepted for publication on 08.07.2026.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.41:575.22
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-06

SSR-генотипирование и оценка генетического полиморфизма образцов свеклы (*Beta vulgaris* L.) из коллекции ВИР

М. Б. Хакимов¹, Д. В. Соколова², Е. А. Салина³

¹ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

² Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мухаммадали Бахтиёр угли Хакимов, m.khakimov@g.nsu.ru

Актуальность. Микросателлитные маркеры (SSR) широко используются для изучения генетического разнообразия коллекций различных сельскохозяйственных культур, в том числе свеклы (*Beta vulgaris* L.), а также для генотипирования отдельных образцов. Мировое биоразнообразие свеклы представлено в коллекции ВИР. Коллекция, имеющая 100-летнюю историю, включает 2422 образца, собранных по всему миру. Многие из этих образцов ранее не изучались с помощью микросателлитных маркеров.

Материалы и методы. Изучено 96 образцов коллекции ВИР, объединенных в девять групп по отдельным признакам, с использованием набора из 35 транскриптомных SSR-маркеров. Фрагментный анализ проводили на генетическом анализаторе «НАНОФОР 05». При расчете длины фрагмента и генетическом анализе использовались программы Peak Scanner, Excel, GenAIEx, PHYLIP и Unipro UGENE.

Результаты. У 96 образцов свеклы коллекции ВИР выявлено суммарно 293 аллеля для тридцати пяти изученных локусов. Количество аллелей на локус варьировало от 4 (Unigene10114 и Unigene77067) до 13 (Unigene24552 и Unigene25611). Уровень гетерозиготности (*He*) был довольно высоким и составлял 0,75. Кластерный анализ, проведенный по результатам исследования, выявил дифференциацию согласно разновидностям. Выявлено 50 уникальных аллелей для идентификации столовой свеклы, для кормовой и сахарной – 28 и 9 соответственно.

Заключение. Выявлен высокий уровень полиморфизма 96 образцов свеклы, входящих в состав коллекции ВИР, с использованием тридцати пяти транскриптомных SSR-маркеров. Полученные данные могут быть использованы для уточнения происхождения образцов свеклы. Используемый набор SSR-маркеров позволяет эффективно паспортизовать образцы свеклы.

Ключевые слова: SSR-маркеры, аллельное разнообразие, генетическая паспортизация, филогенетический анализ, структурно-популяционный анализ

Благодарности: работа была выполнена в рамках государственного задания: FWNR-2026-0029 «Генетический контроль формирования и развития хозяйственно ценных признаков растений, генетические технологии селекции сельскохозяйственных культур».

Для цитирования: Хакимов М.Б., Соколова Д.В., Салина Е.А. SSR-генотипирование и оценка генетического полиморфизма образцов свеклы (*Beta vulgaris* L.) из коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):152-165. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-06

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o6

Genotyping with SSR markers and assessment of the genetic polymorphism in beet (*Beta vulgaris* L.) accessions from the VIR collectionMukhammadali B. Khakimov¹, Diana V. Sokolova², Elena A. Salina³¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia² N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia³ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia**Corresponding author:** Mukhammadali B. Khakimov, m.khakimov@g.nsu.ru

Background. Microsatellite markers (SSR) continue to be the most effective way to study the genetic diversity in crop genebanks, including beet (*Beta vulgaris* L.) germplasm. They are also used for identifying individual genotypes. The worldwide diversity of beet is preserved in the VIR genebank, which has a history of over a hundred years and incorporates 2,422 accessions from all over the world. Because of the multitude of accessions in the collection, a significant number of them have not yet been analyzed with SSR markers. Thus, there is an opportunity for their genetic characterization at a deeper level.

Materials and methods. A set of 35 transcriptome-derived SSR markers were employed to analyze 96 randomly selected beet accessions, grouped according to their specific traits. Fragment analysis was performed with a NANOFOR 05 genetic analyzer, and the data were processed using the Peak Scanner, Excel, GenAlEx, PHYLIP, and Unipro UGENE software packages.

Results. As a result, 293 alleles in total were found in 35 loci, with allele numbers varying from 4 to 13 per locus. The observed heterozygosity (*He*) level was quite high, about 0.75, thus indicating a high level of genetic variability. It turned out that there were 50 unique alleles for table beet identification, 28 for fodder beet, and 9 for sugar beet. These figures revealed a divergence in diversity levels of these groups. The study provided further confirmation of the high polymorphism in beet germplasm accessions.

Conclusion. The data obtained summarily demonstrate the capacity of the selected marker set to characterize genetic variation in VIR's beet collection, provide more knowledge about the origin of the accessions, and ensure their correct genotyping. Furthermore, the set can serve as an effective tool for genetic certification and management of beet germplasm, thus contributing to future breeding and conservation efforts.

Keywords: SSR markers, allelic diversity, genetic certification, phylogenetic analysis, population structure analysis

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task: FWNR-2026-0029 "Genetic control of the formation and development of valuable agronomic plant traits, and genetic technologies for crop breeding".

For citation: Khakimov M.B., Sokolova D.V., Salina E.A. Genotyping with SSR markers and assessment of the genetic polymorphism in beet (*Beta vulgaris* L.) accessions from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):152-165. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o6

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Свекла обыкновенная (*Beta vulgaris* L.) – вид, относящийся к роду *Beta* L., входящему в семейство Амарантовые (Amaranthaceae Juss.). Наибольшую ценность представляют три разновидности свеклы: сахарная, кормовая и столовая (McGrath, Panella, 2019).

Сахарная свекла (*B. vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *saccharifera* L.) – единственная техническая культура, которую можно использовать для крупномасштабного производства сахара в умеренном климате (Biancardi et al., 2010). На сахарную свеклу приходится около 25% мирового производства сахара. (Tayyab et al., 2023). Объем посевов сахарной свеклы в мире составляет около 5 млн га. Россия занимает первое место в мире по посевным площадям (Smolentseva et al., 2019). Отходы переработки сахарной свеклы широко используются в животноводстве, пищевой промышленности, медицине и фармакологии (Sabetova, Levina, 2017).

Кормовая свекла (*B. vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *crassa* Alef.) является предком сахарной свеклы, и именно из нее путем целенаправленной селекции были выведены первые сорта сахарной свеклы. Кормовая свекла – высокоурожайная культура, широко используется в качестве корма в животноводстве, особенно для продления периода лактации и повышения продуктивности в пастбищных и молочных хозяйствах, а также рассматривается как устойчивая альтернатива кукурузному силосу (Roshanzamir et al., 2024).

Столовая свекла (*B. vulgaris* subsp. *vulgaris* var. *conditiva* Alef.) – одна из трех наиболее распространенных корнеплодных сельскохозяйственных культур в Российской Федерации. Столовая свекла по-прежнему пользуется большим спросом у населения России (Vetrova et al., 2023). Содержащиеся в ней органические кислоты, пигменты и азотистые вещества формируют характерный вкус корнеплода. Столовая свекла главным образом используется как пищевой продукт в кулинарии и медицине (Pivovarov et al., 2017).

Коллекция свеклы Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) является крупнейшей в Российской Федерации и насчитывает 2422 образца, среди которых имеются образцы с различными фенотипическими признаками. Коллекция ВИР сформирована из сортов отечественной и зарубежной селекции и гибридов различного происхождения. В коллекции сохраняются и поддерживаются образцы свеклы разного происхождения, созданные в разные годы в разных странах. Несмотря на богатую коллекцию, которая может быть использована в качестве исходного материала для создания новых сортов и гибридов, пригодных для возделывания на территории РФ, гибриды зарубежного происхождения преобладают над отечественными и до последнего времени занимали около 97–98% посевных площадей, что в свою очередь создает сильную зависимость от иностранных поставщиков семян, угрожая продовольственной безопасности страны (Goncharov, 2024).

Для обеспечения качественной кормовой базы животноводства, стабильного развития сахарной промышленности и в целом продовольственной безопасности и независимости страны необходимо разрабатывать отечественные селекционные программы по селекции свеклы. Ключевым моментом в селекционной работе является выбор родительского материала. Отбор только по фенотипическим признакам недостаточно эффективен

в селекционной работе, и в последние годы в селекции активно применяется маркер-ассоциированная селекция (MAS). В этом контексте изучение генетического разнообразия ядерного генома трех разновидностей свеклы с использованием микросателлитных маркеров необходимо для идентификации ценных генотипов и является важным шагом в развитии отечественной селекции (Nalbandyan et al., 2024).

Современные методы изучения и сохранения растений включают ряд современных методов, позволяющих проводить качественную и количественную оценку образцов. Генетические методы исследования являются неотъемлемой частью современной селекции. Изучение генетического разнообразия коллекции свеклы ВИР и создание генетических паспортов с использованием ДНК-маркеров является важным этапом в развитии отечественной селекции.

Метод SSR-маркирования (Simple Sequence Repeats) представляет собой анализ, основанный на изменчивости tandemно повторяющихся последовательностей, которые характеризуют повторяющиеся единицы, состоящие из 1–6 нуклеотидов, и широко используется для генотипирования растений (Taheri et al., 2018). На сегодняшний день известно множество микросателлитных маркеров, обладающих высоким уровнем полиморфизма и используемых при изучении генетического разнообразия и для генотипирования образцов (Fugate et al., 2014; Chen et al., 2024; Peng et al., 2024; Zhao et al., 2025). Широкое распространение получило использование микросателлитных маркеров, разработанных на данных транскриптомного анализа. Такие маркеры стали активно использоваться при анализе генотипов свеклы (Nalbandyan et al., 2022, 2024; Sun et al., 2024; Wu et al., 2024; Kuznetsova et al., 2025). Однако большинство образцов из коллекции ВИР ранее не изучались с помощью данных маркеров.

Цель исследования: SSR-генотипирование 96 образцов свеклы из коллекции ВИР и оценка их генотипического разнообразия.

Полученные результаты могут быть использованы для анализа всех трех разновидностей свеклы, для определения и уточнения родословной образцов и выделения лучших кандидатов для скрещивания путем определения генетической отдаленности друг от друга.

Материалы и методы

Материалом для проведения исследований служили 96 образцов свеклы из коллекции ВИР. Из образцов, взятых в анализ, 39 относятся к сахарной свекле, 47 – к столовой и 10 – к кормовой. В состав изучаемой выборки входят образцы из 22 стран, в частности: из России – 29 образцов; из Нидерландов – 10 образцов; из Украины – 9; из США – 7; из Франции – 6; из Германии – 5; из Великобритании – 4 образца; из Канады, Дании, Японии, Польши и Республики Беларусь – по 3 образца; из Грузии – 2 образца; из Молдовы, Италии, Алжира, Мадагаскара, Югославии, Финляндии, Кыргызстана и Литвы – по 1 образцу. Образцы различались по морфологическим и физиологическим признакам (табл. 1).

Для генотипирования использовали по одному растению каждого образца. ДНК выделяли из свежих молодых листьев 12-дневных растений с использованием буфера на основе ЦТАБ (цетилтриметиламмония бромид) для проведения анализов было выбрано 35 маркеров, разработанных к транскриптомным микросателлитным локу-

Таблица 1. Характеристика опытных образцов свеклы коллекции ВИР**Table 1. Description of the studied beet accessions from the VIR collection**

№ по каталогу ВИР	Название образца	Происхождение	Разновидность	Комментарий
Образцы с контрастной окраской гипокотилия				
26	‘Non Plus Ultra’	Нидерланды	столовая	красная
3551	‘Сахарная Округлая’	Россия	кормовая	зеленая
143	‘Сахарная Округлая Многосемянная’	Россия	кормовая	зеленая
Образцы с контрастной окраской корнеплода				
3	‘Rouge srapaudine ecorse’	Франция	столовая	темно-красная
3962	‘Леди Ночь’	Россия	столовая	темно-красная
3151	‘Бордо Односемянная’	Россия	столовая	темно-красная
3881	‘Аваланч’	Нидерланды	столовая	белая
3985	‘MAR 1404 Гамлет’	Дания	сахарная	белая
1967	‘Кубанская Борщевая’	Россия	столовая	светло-красная
4017	‘Сердолик’	Россия	столовая	желтая
Образцы с разной формой корнеплода				
3980	‘Баргузин’	Россия	столовая	плоская
1673	Zwaan’s Early Red Chief	Нидерланды	столовая	плоская
3160	Rouge – noir plate d’Egypte	Алжир	столовая	плоская
3977	Фалькон F1	Япония	столовая	округлая
3183	Свекла столовая	Мадагаскар	столовая	округлая
3540	‘Полигибрид-1’	Украина	кормовая	округлая
22	‘Granat’	Нидерланды	столовая	цилиндрическая
2367	‘Cilyndra’	Югославия	столовая	цилиндрическая
3818	‘Волшебница’	Россия	столовая	цилиндрическая
2999	‘Poly Vauriac’	Франция	кормовая	цилиндрическая
3978	Внучка F1	Россия	столовая	цилиндрическая
1986	‘Jaune de Puiseux’	Франция	кормовая	цилиндрическая
1698	‘Эрфуртская Горийская’	Грузия	столовая	коническая
1699	‘Дигомская № 570’	Грузия	столовая	коническая
1679	‘Красная Длинная Местная’	Россия	столовая	коническая
2153	‘Ивановская Односемянная 31’	Украина	сахарная	коническая
Образцы с мелкой листовой розеткой				
4014	‘Герман’	Россия	столовая	
3961	‘Bresco F1’	Нидерланды	столовая	
3718	‘Baby Beat’	Нидерланды	столовая	

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continued

№ по каталогу ВИР	Название образца	Происхождение	Разновидность	Комментарий
Образцы с оригинальной окраской листовых пластинок				
3880	‘Болдор’	Нидерланды	столовая	зеленые
1825	‘Gutz Green Leaf’	США	столовая	зеленые
1968	‘Зеленолистная 42’	Россия	столовая	зеленые
1333	‘Barres Stiux 6’	Германия	кормовая	зеленые
1444	‘Egyptian’	Канада	столовая	красные
1603	‘Halblange Rote’	Германия	столовая	красные
1983	‘Rounde Nois Longue’	Франция	столовая	красные
2237	‘Славянка’	Россия	столовая	красные
3802	‘Красная Королева’	Россия	столовая	зелено-красные
1487	‘Китайская Плоская’	Китай	столовая	зелено-красные
3199	Red Tester 2001 ДАБ	Россия	столовая	темно-бордовые
3622	Red Tester 2004	Россия		красные
Раздельноплодные формы				
2059	‘Monoking Explorer’	Нидерланды	столовая	
2080	‘Односемянная’	Россия	столовая	
2929	‘Mona LD’	Финляндия	столовая	
2939	‘Monogram’	Великобритания	столовая	
2940	‘Monodet’	Великобритания	столовая	
2945	‘Monrondo’	Дания	столовая	
2983	‘Monogerme Explorer’	Франция	столовая	
583/1	Экспериментальный материал	Россия	столовая	
270/6	Экспериментальный материал	Россия	столовая	
2404	‘Frizo mono’	Нидерланды	кормовая	
3224	Stamm 6927	Германия	кормовая	
2948	‘Тимиразевская Односемянная’	Россия	кормовая	
1890	‘626-Mono’	Канада	сахарная	
1891	‘CS 36-Mono’	Канада	сахарная	
1597	‘DSS 05’	Литва	сахарная	
2194	‘Euromono’	Германия	сахарная	
2036	‘Mono-Lepeuple’	Франция	сахарная	
3442	‘Annomo 2’	Польша	сахарная	
3443	‘PN Mono 5’	Польша	сахарная	
3444	‘PN Mono 3’	Польша	сахарная	

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continued

№ по каталогу ВИР	Название образца	Происхождение	Разновидность	Комментарий
1969	‘Ялтушковская Односемянная 4’	Украина	сахарная	
2047	‘Ялтушковская Односемянная 24’	Украина	сахарная	
2160	‘Немерчанская Односемянная 33’	Украина	сахарная	
2200	‘Верхнячская Односемянная 36’	Украина	сахарная	
2205	‘Рамонская Односемянная 32’	Россия	сахарная	
2207	‘Молдавская Односемянная 26’	Молдова	сахарная	
2255	‘Mono Hy A2’	США	сахарная	
2300	‘Киргизская Односемянная 25’	Киргизия	сахарная	
2334	‘Ялтушковская Односемянная 38’	Украина	сахарная	
2344	‘Улановская Односемянная 39’	Украина	сахарная	
2347	‘Льговская Односемянная 44’	Россия	сахарная	
3732	‘ОП 1/603, 15’	Беларусь	сахарная	
3780	‘Вымпел F1’	Россия	сахарная	
3996	‘BTS 1830’	Германия	сахарная	
Образцы, устойчивые к цветущности				
2931	‘Fire Chief’	США	столовая	
2988	‘Detroit Bolivar’	Нидерланды	столовая	
3114	‘Ruval’	Дания	столовая	
3598	‘Crimson Globe Selected’	Великобритания	столовая	
1396	‘Бордо Хибинская’	Россия	столовая	
Образцы, устойчивые к курчавости листьев				
1523	‘Curly Top Resistant’	США	столовая	
2097	‘Moris Qanquard’	Великобритания	кормовая	
Образцы со стерильной пылью и закрепители ЦМС				
3530	‘L 53 CMS’	США	сахарная	СФ
3531	‘L 53 O-type’	США	сахарная	ЗС
3445	‘TK-84-CMS’	Япония	сахарная	СФ
3446	‘TK-84-mm-0’	Япония	сахарная	ЗС
3481	‘C 562 CMS’	США	сахарная	СФ
3496	‘S36’ (MS equivalent)	Италия	сахарная	СФ
3729	‘ОП 1/603, 17’	Беларусь	сахарная	ЗС
3730	‘ОП 1/672, 181’	Беларусь	сахарная	ЗС
3467	‘МС-линия № 57’	Россия	сахарная	СФ
3468	‘О-тип № 57’	Россия	сахарная	ЗС

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

№ по каталогу ВИР	Название образца	Происхождение	Разновидность	Комментарий
Финал 3А	Экспериментальный материал	ВИР	сахарная	АСЛ
Вентура 5А	Экспериментальный материал	ВИР	сахарная	АСЛ
Каскад 3	Экспериментальный материал	ВИР	сахарная	АСЛ
Рамоза 4г	Экспериментальный материал	ВИР	сахарная	АСЛ

Примечание: СФ – стерильная форма; ЗС – закрепитель стерильности; АСЛ – апомиктичная стерильная линия

Note: СФ – sterile form; ЗС – sterility maintainer; АСЛ – apomictic sterile line

сам (Fugate et al., 2014). Информация о транскриптомных SSR-маркерах приведена в Приложении в таблице 1S (Electronic Supplementary Materials, Table 1S)¹.

ПЦР проводили на амплификаторе T100 Thermal Cycler (Bio-Rad) с использованием полимеразного реагента HS Taq color производства Biolabmix и праймеров производства ООО «Синтол» в соответствии с К.К. Fugate et al. (2014). Используемые праймеры были помечены флуоресцентными метками FAM, R6G, TAMRA или ROX. Полученные ПЦР-фрагменты анализировали с помощью автоматического генетического анализатора «НАНОФОР 05» в ЦКП геномных исследований ИЦиГ СО РАН. Полученные результаты анализировали с использованием программ Peak Scanner v1.0.

Для расчета генетических параметров использовали программу GenAlEx 6.5 (настройка к Excel). Проводили расчеты следующих генетических параметров: доля полиморфных локусов, общее (наблюдаемое) число аллелей (N_o), эффективное число аллелей (N_e) (Kimura, Crow, 1964), информационный индекс Шеннона (I) (Shannon, Weaver, 1949), наблюдаемая гетерозиготность (H_o), ожидаемая гетерозиготность (H_e), а также индекс полиморфного информационного контента (PIC) (Peakall, Smouse, 2006, 2012; Smouse et al., 2017). Визуализацию распределения общих и уникальных аллельных вариантов проводили с помощью построения диаграмм Венна в веб-приложении InteractiVenn (Heberle et al., 2015).

Для оценки генетического разнообразия рассчитывали следующие параметры (1–5):

Число эффективных аллелей (N_e):

$$N_e = \frac{e^I}{\sum p_i^2} \quad (1),$$

где p_i – частота i -го аллеля в локусе. Показывает количество равновероятных аллелей, необходимых для достижения того же уровня гетерозиготности.

Информационный индекс Шеннона (I):

$$I = -\sum p_i^2 \ln p_i \quad (2),$$

характеризует степень полиморфизма локуса с учетом редкости аллелей.

Наблюдаемая гетерозиготность (H_o):

$$H_o = \frac{N_{het}}{N} \quad (3),$$

где N_{het} – число гетерозиготных особей по данному локусу, N – общий объем выборки.

Ожидаемая гетерозиготность (H_e):

$$H_e = 1 - \sum p_i^2 \quad (4),$$

рассчитанная по М. Нею (Nei, 1973) для каждой разновидности.

Индекс полиморфного информационного контента (PIC):

$$PIC = 1 - \sum_{i=1}^m p_i^2 - \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=j+1}^m 2p_i p_j \quad (5),$$

где m – общее число аллелей в локусе, p_i и p_j – частоты i -го и j -го аллелей. Показатель используется для оценки информативности микросателлитных локусов.

Анализ популяционной структуры проводился с помощью программы STRUCTURE на основе данных полиморфизма микросателлитных (SSR-) маркеров. Анализ выполнялся для диапазона значений K от 1 до 10 с пятью независимыми повторами для каждого K (Length of Burning Period: 50000 / Number of MCMC Reps after Burning: 100000). Результаты были обработаны и оценены с использованием программы StructureSelector, с применением статистических критериев Пьюшайля (MedK) и Эванно (ΔK) для идентификации биологически наиболее обоснованного значения K .

Филогенетическое дерево было построено с применением программного пакета PHYLIP v3.695 (Felsenstein, 2005) с применением метода UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean) и программы Unipro UGENE v51.0 для визуализации (Okonechnikov et al., 2012). Дерево построено методом UPGMA на основе генетических дистанций Нея (Nei, 1972).

Результаты и обсуждение

Данные анализа изучаемых 96 образцов свеклы с использованием 35 SSR-маркеров представлены в таблице 2 и в таблицах 2S и 3S Приложения (Supplementary Materials, Table 2S, Table. 3S)^{2, 3}. Все микросателлитные локусы оказались высокополиморфными и в целом содержали 293 аллельных варианта. Число аллелей варьировало

¹ Приложение «Таблица 1S» представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06> / Electronic Supplementary Materials, Table 1S. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06>

² Приложение «Таблица 2S» представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06> / Electronic Supplementary Materials, Table 2S. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06>

³ Приложение «Таблица 3S» представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06> / Electronic Supplementary Materials, Table 3S. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06>

Таблица 2. Сравнительная таблица полученных результатов с результатами из литературы
Table 2. Comparative table showing the obtained results along with the results reported by published sources

Маркеры	N_e^*	N_e	I^*	I	H_o^*	H_o	H_e^*	H_e
Unigene11965	4,57	4,15	1,72	1,57	0,63	0,98	0,78	0,75
Unigene9667	2,00	4,26	1,04	1,58	0,38	0,82	0,50	0,76
Unigene27374	1,85	2,39	0,90	1,02	0,29	0,44	0,46	0,55
Unigene10114	1,68	2,13	0,74	0,86	0,00	0,42	0,41	0,52
Unigene15915	3,20	2,49	1,44	1,13	0,50	0,44	0,69	0,59
Unigene15403	3,12	3,15	1,35	1,27	0,50	0,89	0,68	0,66
Unigene11240	2,61	3,19	1,16	1,32	0,38	0,74	0,62	0,68
Unigene11506	2,58	2,33	1,22	1,10	0,43	0,51	0,61	0,55
Unigene14118	2,84	3,02	1,07	1,21	0,13	0,99	0,65	0,66
Unigene14805	3,56	3,23	1,49	1,32	0,63	0,72	0,72	0,66
Unigene17923	3,28	4,16	1,47	1,63	0,38	0,72	0,70	0,75
Unigene27906	3,05	3,41	1,21	1,37	0,50	0,68	0,67	0,69
Unigene18963	3,88	2,90	1,46	1,29	0,13	0,72	0,74	0,64
Unigene78820	1,60	3,14	0,56	1,34	0,25	0,75	0,38	0,68
Unigene24552	5,82	6,22	1,91	1,98	0,75	0,91	0,83	0,83
Unigene26753	3,05	3,39	1,39	1,44	0,50	0,80	0,67	0,70
Unigene15907	2,72	4,89	1,33	1,77	0,50	0,84	0,63	0,79
Unigene29209	1,86	2,29	0,78	0,95	0,13	0,80	0,46	0,55
Unigene72402	3,00	1,90	1,24	0,95	0,00	0,55	0,67	0,46
Unigene4157	1,68	2,32	0,74	1,11	0,00	0,54	0,41	0,54
Unigene26319	3,12	4,54	1,22	1,61	0,38	0,77	0,68	0,76
Unigene27833	6,40	3,66	1,89	1,45	0,63	0,83	0,84	0,72
Unigene77067	2,72	3,29	1,14	1,24	0,25	0,70	0,63	0,67
Unigene22354	4,57	3,79	1,57	1,44	0,25	0,91	0,78	0,72
Unigene62524	4,41	5,11	1,54	1,85	0,63	0,66	0,77	0,80
Unigene2170	2,84	3,25	1,18	1,33	0,38	0,96	0,65	0,69
Unigene25611	3,00	3,52	1,24	1,44	0,00	0,88	0,67	0,70
Unigene26133	2,98	4,64	1,30	1,67	0,50	0,71	0,66	0,77
Unigene75234	3,66	3,62	1,41	1,47	0,38	0,94	0,73	0,72
Unigene23788	2,18	2,41	1,03	1,11	0,14	0,43	0,54	0,57
Unigene4192	1,94	2,19	0,92	0,98	0,50	0,70	0,48	0,53
Unigene53607	3,12	3,37	1,23	1,43	0,75	0,89	0,68	0,70
Unigene48657	1,68	2,46	0,74	1,10	0,00	0,89	0,41	0,59
Unigene11422	4,80	4,00	1,59	1,52	0,17	0,93	0,79	0,74
Unigene16898	3,56	3,66	1,49	1,50	0,50	0,74	0,72	0,71

Примечание: N_e – количество эффективных аллелей; I – индекс информации Шеннона; H_o – наблюдаемая гетерозиготность; H_e – ожидаемая гетерозиготность; * – данные по К. К. Fugate et al. (2014)

Note: N_e – number of effective alleles; I – Shannon information index; H_o – observed heterozygosity; H_e – expected heterozygosity; * – data according to K. K. Fugate et al. (2014)

от 4 до 13 в зависимости от используемого SSR-маркера. Так, например, максимальное число аллелей (13) выявлено у образцов свеклы при использовании маркеров Unigene25611 и Unigene24552, а минимальное число (4) – при использовании маркеров Unigene10114 и Unigene77067. Среднее количество аллелей на локус составило 8,37 (см. Electronic Supplementary Materials, Table 2S). По сравнению с данными других авторов количество обнаруженных нами аллелей (293) почти вдвое превышает количество обнаруженных ранее аллелей (164) (Fugate et al., 2014, 2019; Peng et al., 2024). Это в первую очередь связано с разнообразием образцов, отобранных из коллекции ВИР с учетом происхождения и различий по фенотипическим и физиологическим признакам. Эта гипотеза подтверждается данными К. К. Fugate с соавторами, которые изучили 196 образцов, включая как культурные, так и дикие сорта, а также потомство, полученное в результате их скрещивания (Fugate et al., 2021). Кроме того, фрагменты некоторых маркеров полностью отличались по размеру от полученных другими авторами (см. Supplementary Materials, Table 3S). Наши результа-

В трех группах встречаемость аллельных вариантов была неравномерна. Из 293 аллелей в образцах столовой свеклы обнаружено 246, в сахарной – 224, а в кормовой – 178. Распределение аллельного разнообразия между группами наглядно представлено на диаграмме Венна (рис. 1). Выявлено общее «ядро» из 149 аллельных вариантов, характерных для всех трех разновидностей. Количество уникальных (приватных) аллелей, встречающихся только в одной группе, существенно различалось: у образцов столовой свеклы обнаружено 50 таких аллелей, у сахарной – 28, а у кормовой – всего 9. Генетическая близость столовой и сахарной разновидностей подтверждается наличием 37 общих аллелей, не выявленных у кормовых форм.

У 73 образцов (44 столовой, 24 сахарной и 5 кормовой) свеклы были обнаружены уникальные аллели от 1 до 8 (Electronic Supplementary Materials, Table 4S)⁴. Самое большое количество (8) уникальных аллелей содержал сорт столовой свеклы 'Зеленолистная 42'. Среди образцов сахарной свеклы максимально было обнаружено 4 уникальных аллеля у образца из Германии – 'Euromono'.

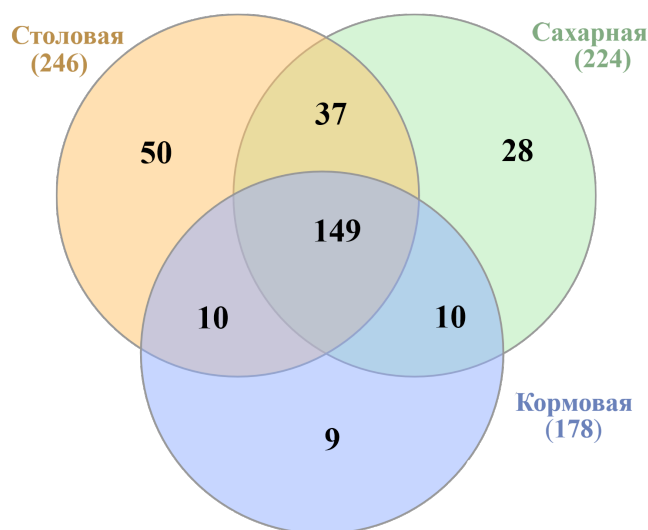


Рис. 1. Диаграмма Венна, отражающая распределение общих и уникальных аллельных вариантов SSR-маркеров между тремя разновидностями свеклы (*Beta vulgaris* L.) (в скобках указано общее число выявленных аллелей для каждой группы)

Fig. 1. Venn diagram showing the distribution of shared and unique allelic variants of SSR-markers among three beet varieties (*Beta vulgaris* L.) (the total number of identified alleles for each group is shown in parentheses)

ты показали в основном более высокий уровень гетерозиготности, в частности не было ни одного маркера, показывающего уровень наблюдаемой гетерозиготности (H_o) на нулевом уровне, в отличие от данных разработчиков маркеров К. К. Fugate с соавторами (Fugate et al., 2014) (см. табл. 2). Такие результаты ожидаемы, так как разработчики маркеров к транскриптомным микросателлитным локусам первоначально проверяли их только на 8 образцах.

Сравнительный анализ распределения транскриптомных SSR-маркеров между образцами столовой, сахарной и кормовой свеклы

При проведении генетического анализа в GenAIEx коллекционный материал был разделен на три группы согласно разновидностям (столовая, сахарная, кормовая).

Среди образцов кормовой свеклы максимальное число (3) уникальных аллелей было обнаружено у сорта из Германии 'Barres Stiux 6' и у сорта из Франции 'Jaune de Puiseux'.

Сравнительный анализ распределения аллельных вариантов микросателлитных локусов между образцами столовой, сахарной и кормовой свеклы выявил генетическую дифференциацию по некоторым локусам (например, маркированных Unigene14805, Unigene26753, Unigene77067) (Electronic Supplementary Materials, Table. 5S)⁵,

⁴ Приложение «Таблица 4S» представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06> / Electronic Supplementary Materials, Table 4S. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06>

⁵ Приложение «Таблица 5S» представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06> / Electronic Supplementary Materials, Table 5S. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06>

что указывает на их возможное участие в формировании разновидностей свеклы. В то же время по ряду локусов отмечается стабильное распределение частот между всеми анализированными разновидностями (например, Unigene48657, Unigene29209, Unigene72402), что может говорить о консервативности этих генетических регионов. Образцы кормовой свеклы часто занимают промежуточные положение или демонстрируют уникальные паттерны (например, Unigene11965, Unigene11422), что может отражать специфику ее отбора в селекции или меньший размер выборки. Кроме того, во многих локусах один аллель явно доминирует в конкретной группе, что является признаком низкого генетического разнообразия по этому локусу в данной выборке или характеризует отличительный признак у образцов группы. Средние значения уровня генетического разнообразия у разновидностей свеклы были умеренно высокими (табл. 3).

Наименее полиморфным локусом для популяции столовой и кормовой свеклы был Unigene72402 (0,32), для популяции сахарной свеклы – Unigene23788 (0,45) и Unigene4192 (0,45).

Оценка эффективности использования транскриптомных SSR-маркеров для анализа генетической дивергенции образцов свеклы из коллекции ВИР

По результатам анализа использованный набор из 35 микросателлитных маркеров является высокоинформативным. Средняя ожидаемая гетерозиготность (H_e) – 0,67 и среднее число аллелей (N_a) – 6,17 (табл. 4).

Оценка генетической кластеризации образцов по данным SSR-анализа в программе STRUCTURE с использованием как метода Пьюшмайля, так и метода Эванно привела

Таблица 3. Средние значения параметров популяционного-генетического анализа трех разновидностей свеклы (*Beta vulgaris* L.)

Table 3. Mean values of the parameters of the population genetic analysis of three beet (*Beta vulgaris* L.) varieties

Средние показатели популяций свеклы	столовая	сахарная	кормовая	всего
Среднее количество аллелей на популяцию	7,02	6,40	5,08	6,17
Количество различных аллелей с частотой $\geq 5\%$	4,02	4,05	5,08	4,39
Количество эффективных аллелей	3,31	3,41	3,43	3,39
Индекс информации Шеннона	1,36	1,36	1,34	1,35
Среднее число уникальных (приватных) аллелей на локус (N_{priv})	1,42	0,80	0,25	0,82
Количество локально распространенных аллелей (частота $\geq 5\%$), обнаруженных в 25% или менее популяций	0,00	0,00	0,00	0
Количество аллелей LComm ($\leq 50\%$) Количество локально распространенных аллелей (частота $\geq 5\%$), обнаруженных в 50% или менее популяций	0,00	0,00	0,00	0
Ожидаемая гетерозиготность	0,66	0,67	0,68	0,67
Несмещенная ожидаемая гетерозиготность	0,66	0,68	0,71	0,69
Число уникальных аллелей	50	28	9	293 (все)
Среднее значение показателя PIC	0,70	0,68	0,68	0,69

Примечание: параметры рассчитаны в программе GenAlEx 6.5 на основе анализа представительной выборки из 96 коллекционных образцов

Note: the parameters were calculated using the GenAlEx 6.5 software, based on analyzing the representative set of 96 accessions

Количество уникальных аллелей (N) варьировалось в трех популяциях. Наибольшее количество уникальных аллелей наблюдалось в популяции столовой свеклы (50), за ней следовали популяции сахарной (28) и кормовой свеклы (9).

Наиболее полиморфный локус во всех трех разновидностях был Unigene24552, в котором PIC столовой, сахарной и кормовой свеклы было равно 0,88, 0,87 и 0,90 соответственно (Electronic Supplementary Materials, Table 6S)⁶.

⁶ Приложение «Таблица 6S» представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06> / Electronic Supplementary Materials, Table 6S. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06>

к согласованным результатам, достоверно идентифицируя $K = 2$ в качестве оптимального количества генетических кластеров. Это позволяет предположить, что 96 образцов подразделяются на две основные, генетически различные группы.

Последующие анализы и визуализация популяционной структуры были поэтому сфокусированы на модели $K = 2$ для облегчения биологической интерпретации. Столбчатая диаграмма для $K = 2$, созданная с помощью CLUMPAK, наглядно иллюстрирует распределение образцов свеклы, относящихся к трем различным разновидностям, между двумя основными генетическими кластерами (рис. 2).

Таблица 4. Средние показатели полученных результатов

Table 4. Mean values of the obtained results

Показатель	Обозначение	Значение	Интерпретация
Число аллелей	N_a	6,17	В среднем на каждом локусе найдено более 6 аллелей, что говорит о высоком полиморфизме
Ожидаемая гетерозиготность	H_e	0,67	Это главный показатель информативности. Значение выше 0,5 считается высоким. SSR-маркеры в среднем очень информативны
Наблюдаемая гетерозиготность	H_o	0,75	Значение выше ожидаемой (H_e) указывает на избыток гетерозигот в популяциях, что интересно с биологической точки зрения (возможно, действие отбора или гибридизация)
Индекс Шеннона (I)	I	1,35	Также показывает высокое генетическое разнообразие. Значения > 1 считаются высокими.
F-статистика (Fis)	F	-0,11	Отрицательное значение означает избыток гетерозигот (гетерозиготность выше ожидаемой), что согласуется с высоким значением H_o

Красный кластер состоит в основном из столовой свеклы, в то время как в синем кластере преобладает образцы сахарной свеклы.

Более детальную оценку генетического сходства/различия образцов можно выявить при построении филогенетического древа.

По полученным результатам фрагментарного анализа, используя программный пакет PHYLIP (метод UPGMA) и программу Unipro UGENE, было построено филогенетическое древо. На полученном дереве популяции столовой и сахарной свеклы формировали две больших ветви, которые делятся на более мелкие, что коррелирует с данными, полученными с использованием програм-

мы STRUCTURE (рис. 3). Образцы кормовой свеклы не формировали ни одной ветви и распределялись среди образцов столовой и сахарной свеклы. Семь из десяти образцов кормовой свеклы заняли места в большой ветви образцов сахарной свеклы. Еще два находились в составе большой ветви столовой свеклы, и один был в составе внешней ветви. От всех образцов максимально отделился образец столовой свеклы из Франции (к-3, 'Rouge Crapaudine Ecorse'), который поступил в коллекцию в 1928 г. Наиболее отделенной от двух крупных ветвей была ветвь, содержащая только два образца: образец кормовой свеклы к-1333 ('Barres Stiux 6') из Германии и образец столовой свеклы к-1825 ('Gutz Green Leaf') из США (см.

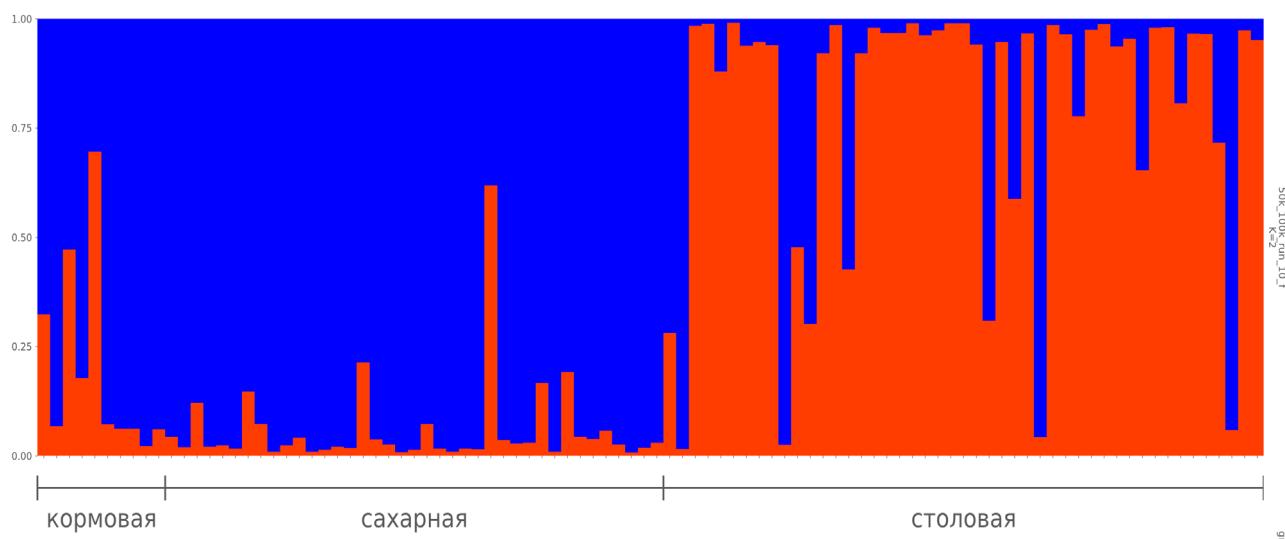


Рис. 2. Генетическая структура 96 образцов свеклы при $K = 2$. Каждый столбец соответствует отдельному образцу; вклад каждого из двух кластеров в генотип обозначен красным и синим цветами. Границы между хозяйственно-биологическими группами указаны под графиком

Fig. 2. Genetic structure of 96 beet accessions at $K = 2$. Each column corresponds to an individual accession; the contribution of each of the two clusters to the genotype is marked in red and blue. The boundaries between the agronomic and biological groups are indicated below the graph

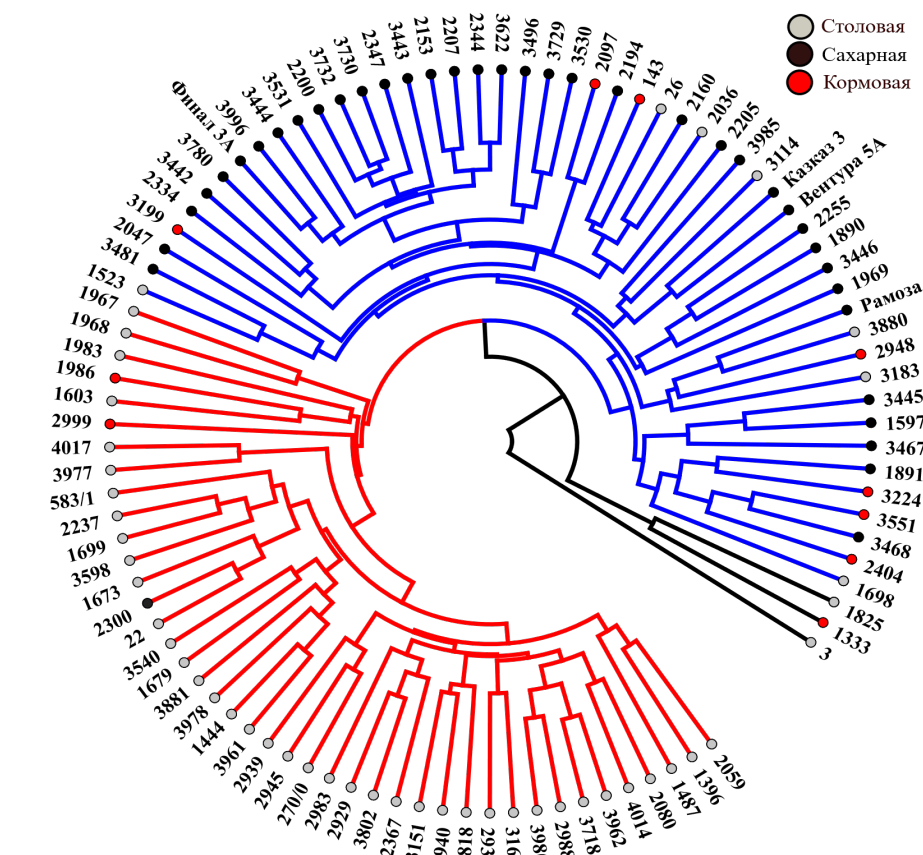


Рис. 3. Дендрограмма 96 образцов свеклы из коллекции ВИР, построенная в программе Unipro UGENE на основе данных анализа полиморфизма транскриптомных SSR-маркеров в программном пакете PHYLIP

Fig. 3. Dendrogram of 96 beet accessions from the VIR collection, constructed with the Unipro UGENE software and based on the data provided by analyzing the polymorphism of transcript-based SSR markers with the PHYLIP software package

рис. 3). Детальная филограмма с указанием расстояния по Нейю приведена в дополнительных материалах (Electronic Supplementary Materials, Figure 1S)⁷.

Достоверной связи между распределением 293 аллелей SSR-маркеров и признаков из различных фенотипических групп, указанных в таблице 1, выявлено не было.

Заключение

Проведенный анализ показал высокий уровень полиморфизма микросателлитных локусов, полученных на основе анализа транскриптома (Fugate et al., 2014) у изученных 96 образцов свеклы из коллекции ВИР. Были выявлены новые аллели для всех изученных локусов, в том числе специфичные аллели для каждой из трех разновидностей свеклы. Полученные данные о специфичном составе аллелей для каждой разновидности свеклы могут быть использованы при работе с коллекционным материалом, а также при работе с материалом неизвестного происхождения для его идентификации. Дальнейшие исследования с интерпретацией данных с маркерами качественных и количественных признаков помогут облегчить селекционный процесс с целью создания более совершенных форм свеклы.

⁷ Приложение «Рисунок 1S» представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06> / Electronic Supplementary Materials, Figure 1S. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2026-3-06>

References / Литература

- Biancardi E., McGrath J.M., Panella L.W., Lewellen R.T., Stevanato P. Sugar beet. In: J.E. Bradshaw (ed.). *Handbook of Plant Breeding. Vol 7. Root and Tuber Crops*. New York, NY: Springer; 2010. p.173-219. DOI: 10.1007/978-0-387-92765-7_6
- Chen P., Chen S., Pi Z., Li S., Wu Z. Genetic diversity analysis of monogerm cytoplasmic male sterile and maintainer lines of sugar beet. *Agronomy*. 2024;14(10): 2217. DOI: 10.3390/agronomy14102217
- Felsenstein J. PHYLIP (Phylogeny Inference Package) version 3.6. Distributed by the author. Seattle, WA: University of Washington; 2005.
- Fugate K.K., Campbell L.G., Covarrubias-Pazaran G., Rodriguez-Bonilla L., Zalapa J. Genetic differentiation and diversity of sugarbeet germplasm resistant to the sugar beet root maggot. *Plant Genetic Resources*. 2019;17(6):514-521. DOI: 10.1017/S1479262119000388
- Fugate K.K., Campbell L.G., Covarrubias-Pazaran G., Rodriguez-Bonilla L., Zalapa J.E. Genetic diversity is enhanced in Wild × Cultivated hybrids of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) despite multiple selection cycles for cultivated traits. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2021;68(6):2549-2563. DOI: 10.1007/s10722-021-01149-w
- Fugate K.K., Fajardo D., Schlautman B., Ferrareze J.P., Bolton M.D., Campbell L.G. et al. Generation and characterization of a sugarbeet transcriptome and transcript-based SSR markers. *The Plant Genome*. 2014;7(2):0038.

- DOI: 10.3835/plantgenome2013.11.0038
- Goncharov S.V. Import substitution risks for sugar beet cultivars in Russia (Riski importozameshcheniya sortimenta sakharnoy svyokly v Rossii). *Sugar*. 2024;(2):60-64. [in Russian] [Гончаров С.В. Риски импортозамещения сорти-мента сахарной свёклы в России. *Сахар*. 2024;(2):60-64]. DOI: 10.24412/2413-5518-2024-2-60-64
- Heberle H., Meirelles G.V., da Silva P.S., Telles G.P., Minghim R. InteractiVenn: a web-based tool for the analysis of sets through Venn diagrams. *BMC Bioinformatics*. 2015;16(1):169. DOI: 10.1186/s12859-015-0611-3
- Kimura M., Crow J.F. The number of alleles that can be maintained in a finite population. *Genetics*. 1964;49(4):725-738. DOI: 10.1093/genetics/49.4.725
- Kuznetsova T.V., Aniskina J.V., Kolobova O.S., Velishaeva N.S., Logvinov A.V., Mischenko V.N. et al. Multiplex microsatellite analysis technology for genetic identification of sugar beet lines and hybrids. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2025;61(8):1632-1639. DOI: 10.1134/S0003683825700425
- McGrath J.M., Panella L. Sugar beet breeding. In: I. Goldman (ed.). *Plant Breeding Reviews*. Vol. 42. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.; 2019: p.167-218. DOI: 10.1002/9781119521358.ch5
- Nalbandyan A.A., Fedulova T.P., Cherepukhina I.V., Rudenko T.S., Bagmutova T.N. Molecular genetic identification and certification of sugar beet hybrids using microsatellite markers. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2024;(4):70-88. [in Russian] [Налбандян А.А., Федуллова Т.П., Черепухина И.В., Руденко Т.С., Багмутова Т.Н. Молекулярно-генетическая идентификация и паспортизация гибридов сахарной свеклы с использованием микросателлитных маркеров. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2024;(4):70-88]. DOI: 10.26897/0021-342X-2024-4-70-88
- Nalbandyan A.A., Fedulova T.P., Kryukova T.I., Cherepukhina I.V., Kulikova N.V. Polymorphic microsatellite markers to study sugar beet (*Beta vulgaris* L.) genetic diversity. *Russian Agricultural Sciences*. 2022;(6):3-8. [in Russian] [Налбандян А.А., Федуллова Т.П., Крюкова Т.И., Черепухина И.В., Куликова Н.В. Полиморфные микросателлитные маркеры для изучения генетического разнообразия сахарной свеклы *Beta vulgaris* L. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022;(6):3-8]. DOI: 10.31857/S2500262722060011
- Nei M. Analysis of gene diversity in subdivided populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1973;70(12):3321-3323. DOI: 10.1073/pnas.70.12.3321
- Nei M. Genetic distance between populations. *The American Naturalist*. 1972;106(949):283-292. DOI: 10.1086/282771
- Okonechnikov K., Golosova O., Fursov M.; the UGENE team. Unipro UGENE: a unified bioinformatics toolkit. *Bioinformatics*. 2012;28(8):1166-1167. DOI: 10.1093/bioinformatics/bts091
- Peakall R., Smouse P.E. GenAlEx 6: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. *Molecular Ecology Notes*. 2006;6(1):288-295. DOI: 10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x
- Peakall R., Smouse P.E. GenAlEx 6.5: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update. *Bioinformatics*. 2012;28(19):2537-2539. DOI: 10.1093/bioinformatics/bts460
- Peng F., Pi Z., Li S., Wu Z. Genetic diversity and population structure analysis of excellent sugar beet (*Beta vulgaris* L.) germplasm resources. *Horticulturae*. 2024;10(2):120. DOI: 10.3390/horticulturae10020120
- Pivovarov V.F., Pyshnaya O.N., Gurkina L.K. Vegetables are products and raw material for functional nutrition. *Problems of Nutrition*. 2017;86(3):121-127. [in Russian] [Пивоваров В.Ф., Пышная О.Н., Гуркина Л.К. Овощи – продукты и сырье для функционального питания. *Вопросы питания*. 2017;86(3):121-127].
- Roshanzamir H., Rouzbehan Y., Aghashahi A., Rezaei J. Effects of feeding different dietary rates of mixed fodder beet tops-wheat straw silage on the performance of Holstein lactating cows. *Journal of Animal Science*. 2024;102:skae179. DOI: 10.1093/jas/skae179
- Sabetova L.A., Levina M.V. Perspective directions of secondary waste utilization sugar beet production. *Technologies for the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*. 2017;5(19):132-141. [in Russian] [Сабетова Л.А., Левина М.В. Направления использования вторичных отходов свеклосахарного производства. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2017;5(19):132-141].
- Shannon C.E., Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana, IL: The University of Illinois Press; 1949.
- Smolentseva E.V. Sugar production in the world and factors affecting it (Proizvodstvo sakhara v mire i faktory na nego vliyayushchiye). *Moscow Economic Journal*. 2019;(8):584-599. [in Russian] [Смоленцева Е.В. Производство сахара в мире и факторы на него влияющие. *Московский экономический журнал*. 2019;(8):584-599]. DOI: 10.24411/2413-046X-2019-18026
- Smouse P.E., Banks S.C., Peakall R. Converting quadratic entropy to diversity: Both animals and alleles are diverse, but some are more diverse than others. *PLoS One*. 2017;12(10):e0185499. DOI: 10.1371/journal.pone.0185499
- Sun B., Li S., Pi Z., Wu Z., Wang R. Assessment of genetic diversity and population structure of exotic sugar beet (*Beta vulgaris* L.) varieties using three molecular markers. *Plants (Basel)*. 2024;13(21):2954. DOI: 10.3390/plants13212954
- Taheri S., Lee Abdullah T., Yusop M.R., Hanafi M.M., Sahebi M., Azizi P. et al. Mining and development of novel SSR markers using next generation sequencing (NGS) data in plants. *Molecules*. 2018;23(2):399. DOI: 10.3390/molecules23020399
- Tayyab M., Wakeel A., Mubarak M.U., Artyszak A., Ali S., Hakki E.E. et al. Sugar beet cultivation in the tropics and subtropics: challenges and opportunities. *Agronomy*. 2023;13(5):1213. DOI: 10.3390/agronomy13051213
- Vetrova S.A., Stepanov V.A., Zayachkovsky V. Ecological testing of varieties beetroot selection of FSBSI FSVC. *Vegetable Crops of Russia*. 2023;(1):60-68. [in Russian] [Ветрова С.А., Степанов В.А., Заячковский В.А. Экологическое испытание сортов свеклы столовой селекции ФГБНУ ФНЦО. *Овощи России*. 2023;(1):60-68]. DOI: 10.18619/2072-9146-2023-1-60-68
- Wu X., Pi Z., Li S., Wu Z. Exploring sampling strategies and genetic diversity analysis of red beet germplasm resources using SSR markers. *Horticulturae*. 2024;10(9):1008. DOI: 10.3390/horticulturae10091008
- Zhao J.J., Sun L.L., Pi Z., Li S.N., Wu Z.D. Genetic diversity analysis of 89 monogerm maintainer lines of sugar beet. *Sugar Tech*. 2025;27(6):873-887. DOI: 10.1007/s12355-025-01545-x

Информация об авторах

Мухаммадали Бахтиёр угли Хакимов, аспирант, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 630090 Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, m.khakimov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0336-8324>

Диана Викторовна Соколова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, d.sokolova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9967-7454>

Елена Артемовна Салина, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, salina@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8590-847X>

Information about the authors

Mukhammadali B. Khakimov, Postgraduate Student, Novosibirsk State University, 1 Pirogova St., Novosibirsk 630090, Russia, m.khakimov@g.nsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0336-8324>

Diana V. Sokolova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, d.sokolova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9967-7454>

Elena A. Salina, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the RAS, Chief Researcher, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, salina@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8590-847X>

Вклад авторов: Хакимов М. Б. – проведение эксперимента (выращивание растений, выделение ДНК, ПЦР-анализ, фрагментный анализ); статистическая и биоинформатическая обработка данных; написание текста статьи; подготовка иллюстраций; работа с рецензией. Соколова Д. В. – предоставление растительного материала (образцов свеклы из коллекции ВИР); консультирование по паспортным данным образцов. Салина Е. А. – общее руководство исследованием; разработка концепции; подбор и заказ SSR-маркеров; научное консультирование; редактирование текста.

Contribution of the authors: Khakimov M. B. – performance of the experiment (plant cultivation, DNA extraction, PCR analysis, and fragment analysis); statistical and bioinformatic data processing; writing of the manuscript; preparation of illustrations; working with the review. Sokolova D. V. – provision of the plant material (beet accessions from the VIR collection); consulting on the passport data of accessions. Salina E. A. – general supervision of the study; development of the concept; selection and ordering of SSR markers; scientific consultations; text editing.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена после рецензирования 26.05.2026; принята к публикации 30.06.2026. The article was submitted on 12.02.2026; approved after reviewing on 26.05.2026; accepted for publication on 30.06.2026.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья

УДК 631.526.32

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-01

Новый сорт лапчатки белой (*Potentilla alba* L.) 'Снежка' селекции ВИЛАР

А. Ю. Аникина, В. Р. Тхаганов, Н. С. Тропина, Р. Р. Тхаганов

*Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Северо-Кавказский филиал, Краснодарский край, Россия***Автор, ответственный за переписку:** Анна Юрьевна Аникина, vilar8@rambler.ru

Актуальность. Естественные запасы лапчатки белой ограничены и сегодня не могут обеспечить потребность фармацевтических предприятий в лекарственном сырье. Поэтому, наряду с разработкой препаратов, особую актуальность приобретает создание новых высокопродуктивных сортов для закладки промышленных плантаций этого уникального лекарственного растения.

Материалы и методы. Селекционная работа проводилась в Северо-Кавказском филиале ВИЛАР в условиях Краснодарского края. Сорт выведен из местной популяции, возделываемой в коллекционном питомнике, с оценкой по потомству, методом индивидуально-семейного отбора. Наблюдения и учеты проводились по методикам, общепринятым и разработанным для лекарственных растений в ВИЛАР.

Результаты. Проведена комплексная оценка нового сорта 'Снежка' по ценным признакам: высота растения, облиственность, количество цветоносов и соцветий, диаметр цветка, длина вегетационного периода, урожайность корневища с корнями и надземной массы, сумма фенольных соединений. Возделывание нового сорта позволит получать с 1 га до 6 тонн воздушно-сухого сырья корневищ с корнями с общим содержанием действующего вещества в среднем 19,95%. Повышение урожайности лекарственного сырья, по сравнению с сортом-стандартом, составляет 0,54 тонны, а содержания фенольных соединений – до 2,08%.

Заключение. В 2023 г. новый сорт лапчатки белой 'Снежка' включили в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений. Рекомендуются для промышленного выращивания в связи с высокой урожайностью корневищ с корнями и повышенным содержанием суммы фенольных соединений.

Ключевые слова: *Potentilla alba*, селекция, сорт, урожайность, корневище с корнями, фенольные соединения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану, код темы FGUU-2025-0006 «Определение ресурсного потенциала дикорастущих видов лекарственных растений, разработка адаптивных агротехнологий и создание устойчивых сортов лекарственных культур».

Для цитирования: Аникина А.Ю., Тхаганов В.Р., Тропина Н.С., Тхаганов Р.Р. Новый сорт лапчатки белой (*Potentilla alba* L.) 'Снежка' селекции ВИЛАР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):166-172. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-01

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o1

‘Snezhka’: a new cultivar of white cinquefoil (*Potentilla alba* L.) released by VILAR

Anna Yu. Anikina, Vitaly R. Thaganov, Nina S. Tropina, Ruslan R. Thaganov

*All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, North Caucasus Branch, Krasnodar Territory, Russia***Corresponding author:** Anna Yu. Anikina, vilar8@rambler.ru

Background. Natural reserves of white cinquefoil are limited and cannot meet the present-day needs of pharmaceutical enterprises for medicinal raw materials. Therefore, along with the development of drugs, releasing new high-yielding cultivars for large-scale plantations of this unique medicinal plant is of particular relevance.

Materials and methods. The breeding work was carried out at the North Caucasus Branch of the All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants (VILAR), Krasnodar Territory. The new cultivar was developed from a local population cultivated in the collection nursery, with progeny testing, through individual-family selection. Observations and assessments were performed in line with conventional methods and those developed for medicinal plants at VILAR.

Results. Comprehensive evaluation of cv. ‘Snezhka’ was based on important plant characters: plant height, leafiness, number of peduncles and inflorescences, flower diameter, growing season duration, yield of the rhizome with roots, aboveground biomass yield, and total phenolic compounds. The new cultivar is expected to yield up to 6 tons/ha of air-dry raw materials from the rhizome with roots, with a total active ingredient content of 19.95%, on average. The increase in the yield of medicinal raw materials over the reference cultivar is 0.54 tons, and in total phenolics up to 2.08%.

Conclusion. In 2023, white cinquefoil cv. ‘Snezhka’ was included in the State Register for Selection Achievements Protected. It is recommended for commercial cultivation due to its high rhizome/root yield and increased content of total phenolic compounds.

Keywords: *Potentilla alba*, breeding, cultivar, yield, rhizome with roots, phenolic compounds

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task according to the thematic plan, Topic Code FGUU-2025-0006: “Determination of the resource potential for wild species of medicinal plants, development of adaptable agricultural practices, and creation of resistant medicinal crop cultivars”.

For citation: Anikina A.Yu., Thaganov V.R., Tropina N.S., Thaganov R.R. ‘Snezhka’: a new cultivar of white cinquefoil (*Potentilla alba* L.) released by VILAR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):166-172. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o1

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal’s opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Несмотря на большое количество синтетических препаратов, используемых в современной медицине, в последние десятилетия интерес к лечению средствами народной медицины не исчез, а наоборот возрос, что до некоторой степени объясняется значительным ростом аллергических реакций на прием синтетических препаратов (Vyukova et al., 2016). Больные все более охотно прибегают к лечению настоями и отварами целебных трав, что поднимает на должную высоту многовековой опыт народной медицины. В связи с этим определенную научную и практическую значимость представляет введение в культуру новых лекарственных растений из природной флоры. Среди них наиболее перспективным источником биологически активных веществ тиреотропного действия является лапчатка белая, которая произрастает в центральных районах европейской части России, Республике Крым, на территориях Европы.

Potentilla alba L. (семейство Rosaceae) – многолетнее растение, в природе размножается семенами, а за счет наращивания на маточном растении новых побегов замещения происходит вегетативное возобновление (Zhurba, Dmitriev, 2005). Корневище с корнями, содержащее углеводы (крахмал), фенолкарбоновые кислоты, флавоноиды, п-кумаровую и эллаговую кислоты, иридоиды, кверцетин, сапонины, галлотанин, является лекарственным сырьем для производства фармпрепаратов. Следует отметить, что в них содержится также анион йодистой кислоты и элементарный йод (Sidelnikov et al., 2017).

Лапчатка белая применяется для производства препаратов, корректирующих гипер- и гипопункции щитовидной железы, устраняющих сопутствующие токсические явления в организме. Терапевтическая продуктивность *P. alba* засвидетельствована клинически. Биологически активные вещества растения благотворно влияют на работу миокарда, усиливают гемопоэз, нормализуют артериальное давление, понижают уровень холестерина, помогают восстановлению организма после перенесенных инсультов и инфарктов. На основе экстракта корневищ с корнями лапчатки выпускают БАДы: «Тирео-Вит лапчатка белая», капсулы «Эндокринол» и крем-гель «Эндокринол», «Эндонорм», «Эндопротект», «Настойка лапчатки белой», «Лапчатка белая экстракт» (Smyk, 1976; Arkhipova et al., 2014).

Обеспечить фармацевтическую промышленность медицинским сырьем на основе дикорастущей лапчатки белой не представляется возможным. В природе данная культура встречается отдельными экземплярами и не образует зарослей (Vodoryanova et al., 2011).

В связи с этим необходимо возделывать данную культуру в промышленных масштабах. Для этого важно закладывать плантации высокоурожайным сортом, содержащим повышенный процент действующих веществ, адаптивным к внешним условиям среды, устойчивым к вредителям и болезням, а также пригодным для механизированной уборки.

Материалы и методы

Исследования по выведению нового сорта проводили с 2015 по 2022 г. на полях селекции и семеноводства Северо-Кавказского филиала Всероссийского научно-ис-

следовательского института лекарственных и ароматических растений (ВИЛАР).

В качестве исходного селекционного материала использовались образцы местной популяции лапчатки белой. Сорт выведен методом индивидуально-семейного отбора с оценкой по потомству.

Питомники закладывали вегетативным способом – делением вручную куста растений 3–4 лет вегетации ранней весной на части (делёнки), состоящие из корневища с корешками, почками возобновления и листочками. В 2017–2019 гг. закладывали делянки четырехрядные, длиной 15 м с междурядьями 70 см, в четырех повторениях. В питомнике конкурсного сортоиспытания сорт-стандарт размещали через каждые четыре делянки. Площадь делянки составляла 42 м².

Подготовка почвы и агротехника соответствовали требованиям культуры и агрорекомендациям для возделывания лекарственных культур. Отбор лучших растений осуществлялся в оптимальных агротехнических условиях их выращивания (Tsitsilin et al., 2022). Для оценки сортообразцов в качестве стандарта использовали сорт 'Весна'.

Фенологические наблюдения вели по методике изучения фенологии растений и растительных сообществ (Beideman, 1974), учеты и оценку в селекционных питомниках проводили по «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур». При обработке экспериментальных данных в ходе работы руководствовались «Методикой полевого опыта» (Dospikhov, 2014).

Сушку корневищ с корнями изучаемой лапчатки белой производили естественным путем, без дополнительного прогрева, после промывки проточной водой. Процентное содержание фенольных соединений в корневищах с корнями определяли на базе ВИЛАР-центра (г. Москва) в лаборатории химии и фармацевтической технологии спектрофотометрическим методом с использованием реактивов Фолина – Дениса (Zargometov, 1968).

Морфобиологическая характеристика и хозяйственно ценные признаки сортов приведены по трехлетним средним данным по каждому году вегетации, то есть 1-й год вегетации (2017–2019 гг.), 2-й год вегетации (2018–2020 гг.), 3-й год вегетации (2019–2021 гг.), 4-й год вегетации (2020–2022 гг.).

Агрометеорологические условия Краснодарского края в 2015–2022 гг. к началу вегетации были благоприятны для приживаемости и развития растений лапчатки. Неравномерным выпадением осадков и повышенными температурами были отмечены 2015 и 2016 г. Обилие влаги и невысокие температуры отличали 2017 г. В 2018 и 2019 г. наблюдались осадки значительно ниже нормы, высокая температура воздуха, суховеи. Условия 2020–2022 гг. в течение весенне-летнего периода характеризовались большим количеством осадков и повышенным температурным фоном. Осадки менее климатической нормы второй половины вегетации не причинили вред укоренившимся растениям.

Почва селекционного питомника – выщелоченный малогумусный чернозем, отличительной чертой является гумусовый горизонт с большой мощностью (А + В до 160 см). Содержание подвижной S – 6,2 мг/кг, обменного K – 243 мг/кг, подвижного P – 27 мг/кг, незначительное количество цинка, меди, кобальта, подвижных форм марганца. Имеет близкую к нейтральной реакцию почвенной среды, pH = 5,0–5,4.

Результаты и обсуждение

Метод многократного индивидуального отбора с оценкой по потомству являлся приоритетным при повышении результативности селекции лапчатки на накопление содержания действующего вещества и иных хозяйственно ценных признаков. В результате многолетнего отбора из местной популяции в 2015 г. выделили селекционный образец № 37-18, из которого в дальнейшем был создан сорт 'Снежка'. В результате работы установили, что новый сорт превосходит аналогичные показатели сорта-стандарта 'Весна'.

Малое стационарное испытание выбранного селекционного образца осуществлялось в 2016–2018 гг. В период с 2019 по 2021 г. проходило конкурсное стационарное испытание с участием этого образца.

В последующие годы проводили комплексную оценку выделенного селекционного образца по ценным признакам: урожайность корневища с корнями и надземной массы, высота растения, облиственность, количество цветоносов и соцветий, диаметр цветка, длина вегетационного периода. При определении перспективности также учитывались: зимостойкость, отрастание после перезимовки, приживаемость посадочного материала, устойчивость к болезням и вредителям, содержание суммы фенольных соединений.

Начало вегетации культуры, по наблюдениям за сезонным циклом развития на территории Краснодарского края, происходит при наступлении положительных среднесуточных температур. В 2015–2022 гг. при проведении испытаний наиболее ранний срок начала вегетации (отрастание) селекционного образца наблюдался в середине февраля 2017 г., а в конце марта 2019 г. – наиболее поздний. Дальнейшее прохождение фенологических фаз при позднем отрастании происходило быстрее.

В условиях Краснодарского края при вегетативном размножении (посадка делёнками) ранней весной, в первый год жизни лапчатки, фаза цветения наблюдается только на единичных растениях в ноябре.

Со второго и последующих лет жизни массовое цветение начинается во II–III декаде марта и длится до конца апреля. С середины апреля и до конца мая происходит созревание семян. Различия по прохождению фенологических фаз по годам вегетации не выявлены, а по сортам составляют менее десяти дней (табл. 1).

У сорта 'Снежка' форма куста сжатая, среднерослая (рисунок). Степень облиственности средняя и равна 64%. Растения лапчатки покрыты прижатыми короткими волосками серебристого цвета. Белые цветки собраны по 2–5 штук в верхушечные полузонтики на длинных цветоносах, в диаметре до 24 мм, которые располагаются

практически на одном уровне с листьями. Тычинок и пестиков большое количество. Завязь верхняя. Пятинадрезанные чашечки с подчашием опушенные. Венчик включает в себя пять свободных лепестков. Плодики – многочисленные односемянные морщинистые орешки. Корневища с корнями светлые на срезе, маловетвистые, толстые, с укороченными многолетними вегетативными и однолетними генеративными побегами, образуют прикорневую розетку. Длина корня – 16–20 см. Листья крупного размера, темно-зеленого цвета (Mizina, Morozov, 2021) (рисунок).

От весеннего отрастания до созревания семян вегетационный период сорта 'Снежка' составляет 126 дней.

Новый сорт зимостойкий, устойчив к болезням, вредителям и обладает высокой засухоустойчивостью в условиях Краснодарского края.

Морфологическое описание и биометрические учеты проводили ежегодно в фазе массового цветения.

Как видно из таблицы 2, сорт 'Снежка' характеризуется наибольшим количеством цветоносов по сравнению со стандартом. Цветок более крупный, в диаметре может достигать 24 мм. Число цветоносов на одном растении у сорта 'Снежка' на 5,1 шт. больше, длина цветоноса колеблется от 13 до 18 см, число цветков на одном цветоносе на 23% больше, чем у стандарта. Продолжительность цветения практически не различалась.

Проведенные сравнительные исследования по годам вегетации показали преимущество нового сорта по облиственности, числу укороченных стеблей, массы надземной части и корневищ с корнями по отношению к сорту-стандарту 'Весна'.

Так как в корневищах с корнями содержится флавоноид кверцетин, который определяет лечебные свойства лапчатки, процесс создания нового культивируемого сорта был акцентирован на нарастание подземной массы растения. Согласно данным таблицы 3, этот показатель в среднем, независимо от года вегетации, у сорта 'Снежка' превышает стандартный сорт на 52–80 г с одного куста со второго года вегетации.

Сорта также различаются и по основным хозяйственным ценным признакам.

В зависимости от возраста растений наибольший прирост надземной массы и корневищ с корнями выявлен на третьем году вегетации, затем эти показатели несколько снижаются. Уборку в условиях Краснодарского края на лекарственное сырье проводят в ноябре месяце.

Представленные в таблице 4 данные показывают превосходство нового сорта по урожайности корневищ на 10%, надземной массы – на 6%, а по содержанию действующего вещества – на 12%.

Таблица 1. Наблюдения за прохождением фенологических фаз двух сортов 'Снежка' и 'Весна'*

Table 1. Observations of the passage of phenological phases by two cultivars: 'Snezhka' and 'Vesna'*

Сорт	Фенологические фазы развития лапчатки белой				Длина вегетационного периода, дней
	весеннее отрастание – бутонизация	бутонизация – начало цветения	начало цветения – массовое цветение	массовое цветение – созревание семян	
'Снежка'	20.02–10.03	10.03–15.03	15.03–15.04	15.04–15.05	126
'Весна' (стандарт)	22.02–15.03	15.03–23.03	23.03–20.04	20.04–15.05	129

Примечание: * – в таблице приведены средние данные за пять лет наблюдений

Note: * – the table shows mean data for five years of observations



Рисунок. Сорт лапчатки белой 'Снежка' третьего года вегетации (фаза «цветение», III декада марта)
Figure. *Potentilla alba* L. 'Snezhka': third year of growing (flowering phase, last ten days of March)

Таблица 2. Сравнительная характеристика сортов лапчатки
Table 2. Comparative characterization of *Potentilla alba* L. cultivars

Сорт	Диаметр цветка, мм	Количество цветоносов, шт.	Длина цветоноса, см	Число цветков на одном цветоносе, шт.	Продолжительность цветения, дни
'Снежка'	21,5 ± 1,07	38,0 ± 1,90	18,1 ± 0,91	4,3 ± 0,21	29,5 ± 1,41
'Весна' (стандарт)	17,8 ± 0,89	32,9 ± 1,67	13,6 ± 0,69	3,5 ± 0,17	27,7 ± 1,36
Отклонения от стандарта	+3,7	+5,1	+4,5	+0,8	+1,8

Таблица 3. Морфобиологическая характеристика сортов *Potentilla alba* L. по годам вегетации (средние данные 2017–2022 гг.)

Table 3. Morphobiological indicators of *Potentilla alba* L. cultivars across their growing seasons (averaged for 2017–2022)

Сорт	Высота растений, см	Облиственность, %	Число укороченных стеблей, шт.	Сухая масса, г	
				надземной части	корневищ с корнями
1-й год вегетации					
‘Снежка’	15,4 ± 0,76	71,6	7,5 ± 0,36	22,6 ± 1,11	31,5 ± 1,61
‘Весна’ (стандарт)	13,9 ± 0,72	68,2	4,2 ± 0,21	20,2 ± 1,05	27,7 ± 1,39
2-й год вегетации					
‘Снежка’	24,0 ± 1,12	68,9	22,7 ± 1,13	80,7 ± 4,16	171,5 ± 7,82
‘Весна’ (стандарт)	21,4 ± 1,10	61,7	18,4 ± 0,91	64,4 ± 3,28	110,8 ± 5,44
3-й год вегетации					
‘Снежка’	26,5 ± 1,33	61,4	35,0 ± 1,78	122,1 ± 6,06	230,6 ± 11,29
‘Весна’ (стандарт)	25,2 ± 1,21	50,5	21,1 ± 1,10	115,4 ± 5,65	178,8 ± 8,29
4-й год вегетации					
‘Снежка’	26,5 ± 1,23	56,8	48,0 ± 2,35	170,8 ± 8,54	286,5 ± 14,32
‘Весна’ (стандарт)	26,1 ± 1,27	43,3	42,1 ± 2,14	152,1 ± 7,45	206,2 ± 9,89

Таблица 4. Хозяйственно ценные признаки сортов лапчатки белой (средние данные 2018–2022 гг.)**Table 4. Agronomic characters of *Potentilla alba* L. cultivars (averaged for 2018–2022)**

Сорт	Урожайность		Содержание суммы фенольных соединений, % в корневище	Повреждаемость болезнями, балл
	корневища с корнями, т/га	надземной массы, т/га		
2-й год вегетации				
‘Снежка’	4,24 ± 0,21	0,53 ± 0,02	14,76 ± 0,73	0
‘Весна’ (стандарт)	3,84 ± 0,19	0,50 ± 0,02	13,22 ± 0,66	0
НСР ₀₅	0,335	0,022	1,201	
3-й год вегетации				
‘Снежка’	5,73 ± 0,28	0,72 ± 0,03	19,95 ± 0,99	0
‘Весна’ (стандарт)	5,19 ± 0,25	0,68 ± 0,03	17,87 ± 0,89	1
НСР ₀₅	0,385	0,031	1,633	
4-й год вегетации				
‘Снежка’	5,04 ± 0,25	0,63 ± 0,03	17,56 ± 0,87	0
‘Весна’ (стандарт)	4,57 ± 0,22	0,60 ± 0,03	15,73 ± 0,78	1
НСР ₀₅	0,365	0,021	1,584	

Проведенные испытания нового перспективного сорта лапчатки белой ‘Снежка’ доказали, что его возделывание позволит получать с 1 га до 6 т воздушно-сухого сырья корневищ с корнями с общим содержанием действующего вещества в среднем 19,95%. У нового сорта повышение урожайности лекарственного сырья (корневища с корнями), по сравнению с сортом-стандартом, составляет 0,54 тонны. Повышение количественного содержания фенольных соединений достигает 2,08%.

Заключение

Итогом многолетней селекционной работы явилось создание нового сорта лапчатки белой ‘Снежка’ для промышленного выращивания, с высокой урожайностью корневищ с корнями и повышенным содержанием сумм фенольных соединений.

В 2023 г. сорт лапчатки белой ‘Снежка’ включили в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений. Новый сорт рекомендуется использовать на территории России.

References / Литература

- Arkhipova E.V., Shantanova L.N., Mondodoev A.G. Thyrotropic properties of *Potentilla alba* L. *BSU Bulletin*. 2014;(12):118-122. [in Russian] (Архипова Э.В., Шантанова Л.Н., Мондодоев А.Г. Тиреотропные свойства *Potentilla alba* L. *Вестник Бурятского государственного университета*. 2014;(12):118-122).
- Beideman I.N. Methodology for studying the phenology of plants and plant communities (Metodika izucheniya fenologii rasteniy i rastitelnykh soobshchestv). Novosibirsk: Nauka; 1974. [in Russian] (Бейдеман И.Н. Методика изучения фенологии растений и растительных сообществ. Новосибирск: Наука; 1974).
- Bykova O.A., Kadatskaya T.G., Thaganov R.N., Anikina A.Y. Bioproductivity *Potentilla alba* (*Potentilla alba* L.) introduced in the central zone of the Krasnodar region. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2016;19(9):19-23. [in Russian] (Быкова О.А., Кадацкая Т.Г., Тхаганов Р.Н., Аникина А.Ю., Биопродуктивность лапчатки белой (*Potentilla alba* L.) при интродукции в условиях центральной зоны Краснодарского края. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2016;19(9):19-23).
- Dospekhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Alyans; 2014. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Альянс; 2014).
- Mizina P.G., Morozov A.I. White cinquefoil, Rosaceae family (Lapchatka belaya, semeystvo Rozovtvetnye). In: Sidelnikov N.I. (ed.). *Atlas of Medicinal Plants in Russia (Atlas lekarstvennykh rasteniy Rossii)*. 2nd ed. Moscow: Nauka; 2021. p.291-295. [in Russian] (Мизина П.Г., Морозов А.И. Лапчатка белая, семейство Розоцветные. В кн.: *Атлас лекарственных растений России*. 2-е изд. / под ред. Н.И. Сидельникова. Москва: Наука; 2021. С.291-295).
- Sidelnikov A.N., Khazieva F.M., Pushkina G.P., Bushkovskaya L.M. Biological fundamentals of the white cinquefoil (*Potentilla alba* L.) cultivation technology (Biologicheskiye osnovy tekhnologii vozdelvaniya lapchatki beloy [*Potentilla alba* L.]). Moscow: FILIN; 2017. [in Russian] (Сидельников А.Н., Хазиева Ф.М., Пушкина Г.П., Бушковская Л.М. Биологические основы технологии возделывания лапчатки белой (*Potentilla alba* L.). Москва: ФИЛИНЪ; 2017).
- Smyk G.K. Utilization of white cinquefoil as a new medicinal plant, restoration of its reserves in nature, and possibilities of cultivation (Ispolzovaniye lapchatki beloy kak novogo

lekarstvennogo rasteniya, vosstanovleniye zapasov yeye v prirode i vozmozhnosti kultury). In: *New Crops in the National Economy and Medicine (Novye kultury v narodnom khozyaystve i meditsine)*. Kyiv; 1976. p.41-42. [in Russian] (Смык Г.К. Использование лапчатки белой как нового лекарственного растения, восстановление запасов ее в природе и возможности культуры. В кн.: *Новые культуры в народном хозяйстве и медицине*. Киев; 1976. С.41-42).

Tsitsilin A.N., Kovalev N.I., Korotkikh I.N., Kudrinskaya I.V., Babenko L.V., Savchenko O.M., Khazieva F.M. Research methodology for the introduction of medicinal and essential oil plants (Metodika issledovaniy pri introduktsii lekarstvennykh i efirnomaslichnykh rasteniy). Moscow: VILAR; 2022. [in Russian] (Цицилин А.Н., Ковалев Н.И., Коротких И.Н., Кудринская И.В., Бабенко Л.В., Савченко О.М., Хазиева Ф.М. Методика исследований при интродукции лекарственных и эфирномасличных растений. Москва: ВИЛАР; 2022).

Vodopyanova A.M., Arkhipova E.V., Shantanova S.M., Nikolayev S.M. *Potentilla alba* L. as a remedy with good prospects for the treatment of thyroid diseases. *Acta Biomedica Scientifica*. 2011;1-2(77):131-134 [in Russian] (Водопьянова А.М., Архипова Э.В., Шантанова С.М., Николаев С.М. Лапчатка белая как перспективное средство для лечения заболеваний щитовидной железы. *Acta Biomedica Scientifica*. 2011;1-2(77):131-134).

Zaprometov M.N. Fundamentals of the biochemistry of phenolic compounds (Osnovy biokhimii fenolnykh soyedineniy). Moscow: Vysshaya Shkola; 1968. [in Russian] (Запрометов М.Н. Основы биохимии фенольных соединений. Москва: Высшая школа; 1968).

Zhurba O.V., Dmitriev M.Ya. Medicinal, poisonous, and harmful plants (Lekarstvennye, yadovitye i vrednye rasteniya). Moscow: Kolos; 2005. [in Russian] (Журба О.В., Дмитриев М.Я. Лекарственные, ядовитые и вредные растения. Москва: Колос; 2005).

Информация об авторах

Анна Юрьевна Аникина, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Северо-Кавказский филиал, 353225 Россия, Краснодарский край, Динской район, ст. Васюринская, vilar8@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7782-687X>

Виталий Рамазанович Тхаганов, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Северо-Кавказский филиал, 353225 Россия, Краснодарский край, Динской район, ст. Васюринская, krasnodarvilar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0518-354X>

Нина Сергеевна Тропина, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Северо-Кавказский филиал, 353225 Россия, Краснодарский край, Динской район, ст. Васюринская, tropinans@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2457-0609>

Руслан Рамазанович Тхаганов, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Северо-Кавказский филиал, 353225 Россия, Краснодарский край, Динской район, ст. Васюринская, r1123r@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2834-3131>

Information about the authors

Anna Yu. Anikina, Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, North Caucasus Branch, Vasyurinskaya Station, Dinskoy District, Krasnodar Territory 353225, Russia, vilar8@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7782-687X>

Vitaly R. Thaganov, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, North Caucasus Branch, Vasyurinskaya Station, Dinskoy District, Krasnodar Territory 353225, Russia, krasnodarvilar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0518-354X>

Nina S. Tropina, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, North Caucasus Branch, Vasyurinskaya Station, Dinskoy District, Krasnodar Territory 353225, Russia, tropinans@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2457-0609>

Ruslan R. Thaganov, Senior Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, North Caucasus Branch, Vasyurinskaya Station, Dinskoy District, Krasnodar Territory 353225, Russia, r1123r@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2834-3131>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 17.01.2025; одобрена после рецензирования 20.05.2026; принята к публикации 23.06.2026. The article was submitted on 17.01.2025; approved after reviewing on 20.05.2026; accepted for publication on 23.06.2026.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья

УДК 634.226

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-02

Новый районированный сорт *Prunus domestica* L. – ‘Венгерка Курсакова’

Р. Е. Богданов

Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, Мичуринск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Роман Евгеньевич Богданов, vniigispr3@yandex.ru

Актуальность. Слива домашняя является одной из наиболее распространенных косточковых культур в Центрально-Черноземном регионе. В Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в 2024 г., включено 14 сортов сливы домашней, из которых восемь – селекции Федерального научного центра имени И.В. Мичурина (ФНЦ им. И.В. Мичурина). Однако существующий сортимент в полной мере не отвечает требованиям, предъявляемым к современному сорту. Необходимо повысить устойчивость сортов к абиотическим стрессорам зимнего и вегетационного периодов, устойчивость к наиболее вредоносным заболеваниям, совместить в генотипе адаптивность к агроклиматическим условиям зоны культивирования с продуктивностью и высокими товарно-потребительскими качествами плодов.

Материал и методы. В ФНЦ им. И.В. Мичурина создан новый сорт сливы домашней ‘Венгерка Курсакова’ в результате опыления сорта ‘Ренклед Тамбовский’ сортом ‘Венгерка Кодринская’. Авторы сорта: Г. А. Курсаков, Р. Е. Богданов. Опытные насаждения расположены на участке Селекционно-генетического центра им. И.В. Мичурина (г. Мичуринск). Оценку проводили согласно общепринятым методикам сортоизучения плодовых культур.

Результаты и заключение. Сорт сливы домашней ‘Венгерка Курсакова’ адаптирован к агроклиматическим условиям Центрально-Черноземного региона. Он обладает морозостойкостью и высокой засухоустойчивостью. У растений сорта отмечена повышенная устойчивость к класпероспориозу (2,0 балла) и не выявлены признаки поражения красной пятнистостью листьев. Новый сорт характеризуется стабильным ежегодным урожаем, хорошим вкусом (4,5 балла) и ценным химическим составом плодов. Сорт сливы домашней ‘Венгерка Курсакова’ рекомендуется для широкого использования в насаждениях Центрально-Черноземного региона.

Ключевые слова: селекция, слива, адаптивность, урожайность, качество плодов

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального научного центра имени И.В. Мичурина по теме FGSU-2025-0013 «Усовершенствовать методы направленной и маркер-опосредованной селекции, выявить закономерности наследования важнейших агробиологических признаков садовых культур и создать новые конкурентоспособные генотипы с комплексной устойчивостью к био- и абиострессорам, высокой продуктивностью и улучшенным качеством плодов».

Для цитирования: Богданов Р.Е. Новый районированный сорт *Prunus domestica* L. – ‘Венгерка Курсакова’. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):173-179. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-02

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, автору и его/ее месту работы.

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o2

‘Vengerka Kursakova’: a new approved cultivar of *Prunus domestica* L.

Roman E. Bogdanov

I.V. Michurin Federal Scientific Center, Michurinsk, Russia

Corresponding author: Roman E. Bogdanov, vniigispr3@yandex.ru

Background. European plum is one of the most widespread stone-fruit crops in the Central Black Earth Region. The State Register for Selection Achievements Admitted for Usage in 2024 included 14 cultivars of European plum. Eight of them were developed at the I.V. Michurin Federal Scientific Center. However, the existing assortment fails to meet the requirements for modern cultivars. It is necessary to increase the resistance of cultivars to the abiotic stressors of the winter and growing seasons, and to the most harmful diseases. A genotype should combine adaptability with high yield and fruit quality.

Material and methods. A new cultivar of European plum, ‘Vengerka Kursakova’, was developed at the I.V. Michurin Federal Scientific Center, as a result of pollinating cv. ‘Renclod Tambovsky’ with the pollen of ‘Vengerka Kodrinskaya’. The authors of the cultivar are G. A. Kursakov and R. E. Bogdanov. The experimental plantings are located on the site of the I.V. Michurin Breeding and Genetic Center (Michurinsk). The evaluation was performed using conventional techniques of variety testing for fruit crops.

Results and conclusions. ‘Vengerka Kursakova’ is adapted to the agroclimatic conditions of the Central Black Earth Region. It manifested frost resistance and high drought resistance. Its plants showed increased resistance to shothole blight (2.0 points) and were not affected by red spot. The new cultivar demonstrated stable annual yields, good taste (4.5 points), and valuable chemical composition of its fruit. *Prunus domestica* ‘Vengerka Kursakova’ is recommended for widespread cultivation in the Central Black Earth Region.

Keywords: breeding, plum, adaptability, yield, fruit quality

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task assigned to the I.V. Michurin Federal Scientific Center, Topic FGSU-2025-0013 “To improve the methods of targeted and marker-mediated breeding, to identify patterns of inheritance of the most important agrobiological traits in garden crops, and to develop new competitive genotypes with complex resistance to bio- and abiotic stressors, high productivity, and improved fruit quality”.

For citation: Bogdanov R.E. ‘Vengerka Kursakova’: a new approved cultivar of *Prunus domestica* L. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):173-179. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o2

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal’s opinion is neutral to the presented materials, the author or his/her employers.

Введение

Фрукты – это неотъемлемая и очень важная часть здорового питания. Они являются источником незаменимых витаминов, клетчатки и антиоксидантов. Рацион, основанный на разнообразии свежих фруктов, является фундаментом профилактического питания. Обеспечение населения свежей плодовой продукцией, в первую очередь – традиционно выращиваемыми в регионе культурами, является одной из главных задач садоводства.

В промышленных насаждениях Центрально-Черноземного региона (Черноземья) культивируется преимущественно яблоня домашняя (*Malus domestica* Borkh.). У населения большой популярностью пользуются плоды сливы, как в свежем, так и в переработанном виде. Следует отметить, что слива характеризуется большим видовым разнообразием. Она представлена такими видами, как слива домашняя (*Prunus domestica* L.), с. китайская (*P. salicina* Lindl.), алыча (*P. cerasifera* Ehrh.), с. русская (*P. rusica* Erem.), с. американская (*P. americana* Marsh.). Они характеризуются существенными различиями по биологии развития, морфологическим, помологическим признакам, используются как самостоятельные культуры (Eremin, 2003). В насаждениях Центрально-Черноземного региона преобладает слива домашняя.

Черноземье характеризуется хорошо развитым аграрным сектором, что обусловлено главным образом богатыми плодородными почвами и благоприятными погодно-климатическими условиями. Климат региона умеренно континентальный, с теплым летом и умеренно холодной зимой. Среднемесячная температура июля составляет +19,5...+21,8°C, января – –8,8...–10,2°C. Сумма активных температур на крайнем северо-западе составляет 2300–2400°C, на юго-востоке – 2800–3000°C, вегетационный период продолжается 180–200 дней. Важной особенностью климата Черноземья является расположение региона в зоне неустойчивого увлажнения. Очень часто наблюдаются засухи и суховеи. Среднегодовое количество осадков колеблется от 500–550 мм в лесостепной зоне до 450–490 мм в степной зоне. Сумма осадков за период активной вегетации варьирует от 230 до 305 мм (https://bstudy.net/967132/agro/pochvenno_klimaticheskie_usloviya). Следует также отметить, что высокая интенсивность летних осадков приводит к тому, что значительная часть влаги не успевает поглотиться почвой.

Почвенно-климатические условия Центрально-Черноземного региона пригодны для культивирования сливы домашней. Однако производство сливы в Черноземье сталкивается с рядом лимитирующих факторов, которые существенно ограничивают стабильность и продуктивность данной культуры. Основным повреждающим фактором являются зимние морозы, которые зачастую наступают после продолжительной оттепели. Наиболее уязвимыми к данному воздействию являются цветковые почки (Bogdanov, 2023, 2025). Погодные катаклизмы могут послужить причиной не только потери урожая в текущем году, но и гибели плодоносящих насаждений (Kashin, 1995; Zaremuk, 2013; Yushkov, 2019). Во время цветения сливы домашней отмечаются возвратные заморозки, под воздействием которых может погибнуть значительная часть, а иногда и весь урожай (Bogdanov, 2025). Это один из наиболее непредсказуемых и опасных факторов в регионе. Периодически повторяющиеся засухи являются причиной снижения продуктивности и товарно-потребительских качеств плодов сливы как в те-

кущий, так и последующий год. В вегетационные периоды с избыточным увлажнением негативное влияние на урожайность и качество плодов оказывают эпифитотийные грибные заболевания (клястероспориоз, монилиоз, полистигмоз).

Районированный в регионе сортимент сливы домашней характеризуется недостатком сортов, сочетающих комплекс ценных хозяйственно-биологических признаков. В этой связи целью исследования являлось выделение нового продуктивного сорта сливы домашней, обладающего устойчивостью к неблагоприятным биотическим и абиотическим факторам среды и комплексом высоких потребительских качеств плодов.

Материалы и методы

Сорт сливы домашней (*P. domestica*) 'Венгерка Курсакова' создан в Центральной генетической лаборатории имени И.В. Мичурина (в настоящее время ФНЦ им. И.В. Мичурина) в результате опыления сорта 'Ренклед Тамбовский' сортом 'Венгерка Кодринская' в 1975 г. Год посева – 1976, год отбора элитного сеянца – 1986. Начало стационарного изучения элиты – 2006 г. Заявление на допуск селекционного достижения к использованию подали в 2018 г. (заявка № 77641). В Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, сорт включили в 2024 г. (код сорта 8154754). Авторы сорта: Г. А. Курсаков, Р. Е. Богданов.

Сравнительное изучение сорта сливы домашней 'Венгерка Курсакова' проводилось на опытном участке Селекционно-генетического центра – ВНИИГиСПР им. И.В. Мичурина, который занимает равнинный участок, окруженный по периметру лесозащитными полосами. Основной тип почвы – серая лесная с суглинистым составом. В междурядьях поддерживался черный пар. В качестве контроля использовали районированный в Центрально-Черноземном регионе сорт 'Этюд', обладающий комплексом ценных хозяйственно-биологических показателей. Растения посажены в 2005 г. по схеме 6 × 3 м в количестве 20 растений каждого сорта. Повторность двукратная. Подвой – СВГ 11-19, формировка кроны разреженно-ярусная. Период проведения исследований – с 2006 по 2023 г.

Оценка проводилась с использованием методов наблюдения, моделирования стрессовых условий, а также сравнительного анализа данных. Изучение хозяйственно-биологических особенностей осуществляли по общепринятой методике Е. Н. Седова, Т. П. Огольцовой (Sedov, Ogoltsova, 1999). Морозостойкость тканей и почек определяли лабораторным методом (Tyurina et al., 2002). Засухоустойчивость растений определяли по общему содержанию воды в листьях, водному дефициту, способности к восстановлению тургора и водоудерживающей способности по общепринятым методикам (Eremeev, Lishchuk, 1974). Статистическую обработку данных осуществляли с применением компьютерных программ Microsoft Excel 2007, Statistica 10.

Результаты и обсуждение

Дерево сорта 'Венгерка Курсакова' среднерослое, крона густая, слегка раскидистая. Побеги коричневатобурые, тонкие и прямые. Почки мелкие, с острой вершиной, слегка отклоненные, подушечка крупная. Листья средние, эллиптической формы, зеленого цвета, гладкие, блестящие. Пластинка листа плоская, опушенность отсут-

стует. Вершина постепенно заостренная, основание заостренное. Край листа ровный, зазубренность пильчато-городчатая. Прилистники короткие, слаборассеченные, рано опадающие. Черешок средней длины и ширины, слабоопушенный, пигментированный. Железки мелкие, по 2 штуки. Цветки свободные, среднего размера, с белыми лепестками эллиптической формы (рис. 1). Сорт характеризовался ранним цветением. Данная фенологическая фаза наступала 1–3 мая. У контрольного сорта 'Этюд' начало распускания цветковых почек проходило 2–4 мая. Продолжительность цветения за годы исследований составила у сорта 'Венгерка Курсакова' $9,6 \pm 0,60$ дня, у контрольного сорта 'Этюд' – $8,2 \pm 0,51$ дня.

прикрепление к косточке прочное. Основная окраска плода красная, покровная – темно-фиолетовая, однородная.

Кожица средней прочности, голая, с сильным восковым налетом, с плода не снимается. Мякоть желтовато-зеленая, сочная, плотная. Сок красный. Вкус кисло-сладкий, дегустационная оценка – 4,5 балла. В плодах сорта 'Венгерка Курсакова' накапливается сухого вещества 15,8%, сахаров 11,0%, титруемых кислот 1,63%, витамина С 8,3 мг/100 г. Сахарокислотный индекс у нового сорта составляет 6,7, а у контроля – 4,1 (см. таблицу). Плоды столового назначения. Транспортабельность хорошая.



Рис. 1. Цветущая ветвь сливы сорта 'Венгерка Курсакова', 2023 г. (фото Р. Е. Богданова)

Fig. 1. Flowering branch of European plum cv. 'Vengerka Kursakova', 2023 (photo by R. E. Bogdanov)

В условиях Тамбовской области созревание плодов нового сорта наступает 15–25 августа. У контрольного сорта 'Этюд' данная фенологическая фаза наступает на 5 дней раньше (10–20 августа). Плоды сорта 'Венгерка Курсакова' крупные (средняя масса – 37,8 г, максимальная – 50,5 г), средней одномерности, продолговатые (таблица, рис. 2). Вершина плода плоская, воронка мелкая, основание плода с углублением и вытянутое, ямка мелкая. Брюшной шов мелкий, малозаметный. Плодоножка средней длины, тонкая, отделяемость от ветки хорошая,

Дегустационная оценка продуктов переработки плодов (компота) сливы сорта 'Венгерка Курсакова' составила 4,6 балла, что превосходит показатель стандарта. Сироп в данном продукте прозрачный, без помутнения, взвешенные частицы фруктовой мякоти отсутствуют. Окраска плодов однородная, без пятен. Количество плодов с треснувшей, но не сползшей кожицей, а также с трещинами мякоти не превышает 10%. Разваренные или частично утратившие форму плоды отсутствуют. Гармоничное сочетание сахаров и кислот определяет высокие



Рис. 2. Плоды сливы сорта 'Венгерка Курсакова', 2018 г. (фото Р. Е. Богданова)

Fig. 2. Fruits of European plum cv. 'Vengerka Kursakova', 2018 (photo by R. E. Bogdanov)

Таблица. Основные хозяйственно ценные признаки сорта сливы домашней 'Венгерка Курсакова'
(Мичуринск, 2006–2023 гг.)

Table. Main useful agronomic characters of European plum cv. 'Vengerka Kursakova' (Michurinsk, 2006–2023)

Сорт / Cultivar		'Венгерка Курсакова' / 'Vengerka Kursakova'	'Этюд' (контроль) / 'Etyud' (reference)	HCP ₀₅ / LSD ₀₅
Показатель / Indicator		$\bar{X} \pm m_x$		
Степень подмерзания древесины (–35°C) ¹ , балл		1,5 ± 0,11	1,3 ± 0,09	–
Гибель цветков от заморозка (–1,6°C) ² , %		12,0 ± 1,58	8,0 ± 1,69	–
Устойчивость к засухе		высокая	высокая	–
Дырчатая пятнистость листьев ³ , балл	$\bar{X}$	2,0 ± 0,15	3,9 ± 0,10	–
	$X_{\max}$	3,0	4,0	–
Полистигмоз ³ , балл	$\bar{X}$	0	3,0 ± 0,11	–
	$X_{\max}$	0	4,0	–
Монилиальная гниль плодов ³ , балл	$\bar{X}$	3,0 ± 0,17	2,5 ± 0,19	–
	$X_{\max}$	4,0	3,0	–
Начало плодоношения, лет		4–5	4–5	–
Урожай в молодом возрасте, кг/дер.		11,0 ± 0,80	9,5 ± 0,64	1,1
Урожай в период полного плодоношения, кг/дер.		14,1 ± 0,95	12,2 ± 0,83	1,5
Масса плода, г	$\bar{X}$	37,8 ± 1,52	35,6 ± 1,39	2,7
	$X_{\max}$	50,5 ± 2,38	47,3 ± 2,0,9	3,6
Внешний вид, балл		4,6	4,5	–
Содержание в плодах:				
сухого вещества, %		15,8	15,7	–
сахаров, %		11,0	10,1	–
титруемых кислот, %		1,63	2,46	–
витамина С, мг/100 г		8,3	7,4	–
Сахарокислотный индекс		6,7	4,1	–
Дегустационная оценка в свежем виде, балл		4,5	4,4	–
Дегустационная оценка продуктов переработки, балл		4,6	4,4	–
Транспортабельность плодов		хорошая	хорошая	–
Основное назначение сорта		столовый	столовый	–

Примечание: ¹ – в контролируемых условиях, ² – в полевых условиях, ³ – степень поражения листьев в эпифитотийные годы; $\bar{X}$ – среднее значение; m_x – ошибка средней; $X_{\max}$ – максимальное значение; HCP₀₅ – наименьшая существенная разность при 5-процентном уровне значимости

Note: ¹ – under controlled conditions, ² – in the field, ³ – the degree of leaf damage in epiphytotic years; $\bar{X}$ – mean value; m_x – error of the mean; $X_{\max}$ – maximum value; LSD₀₅ – least significant difference at the 5% significance level

органолептические качества продукта. Более высокая кислотность свежих плодов контрольного сорта 'Этюд' также сохраняется при переработке, что снижает вкусовые качества компота.

В плодоношение новый сорт на подвое СВГ 11-19 вступает на 4–5-й год после посадки (см. таблицу). Сорт

плодоносит на букетных веточках, шпорцах и однолетних ветвях (рис. 3). В молодом возрасте урожай составил 11,0 кг/дер., в период полного плодоношения средний урожай достигал 14,1 кг/дер., что существенно превышало показатели контрольного сорта. Самоплодность сорта 'Венгерка Курсакова', как и стандарта, низкая. Лучшими



Рис. 3. Плодоносящая ветвь сливы сорта 'Венгерка Курсакова', 2019 г. (фото Р. Е. Богданова)

Fig. 3. Fruiting branch of European plum cv. 'Vengerka Kursakova', 2019 (photo by R. E. Bogdanov)

опылителями для 'Венгерки Курсакова' являлись сорта 'Ренклюд Харитоновой' и 'Ренклюд Тамбовский'.

Одним из важнейших направлений селекционной работы является создание сортов с высоким адаптивным потенциалом. Существенное влияние на ареал сливы домашней (*P. domestica*) оказывает температура. В условиях Тамбовской области подмерзание растений сливы наблюдается как после сильных морозов в середине зимы, так и при понижении температуры после оттепелей. Основываясь на анализе температуры зимних месяцев (декабрь – февраль) за период с 1990 по 2023 г. (Bogdanov, 2023), следует отметить сохраняющуюся тенденцию снижения минимальных и повышения максимальных температур на территории Тамбовской области. Крайне нестабильным является обеспечение растений влагой в вегетационный период на фоне высоких положительных температур. Обезвоживание и перегрев оказывают существенное негативное влияние как на общее состояние, так и на продуктивность насаждений, а также закладку и качественное развитие генеративных органов, что приводит к снижению урожайности в последующий год.

Новый сорт имеет хорошие показатели морозостойкости вегетативных органов. После искусственного промораживания при -35°C в середине зимы кора и камбий однолетних побегов не имели повреждений, средняя степень подмерзания древесины составила 1,5 балла, у контроля – 1,2 балла (см. таблицу). Следует отметить, что за годы исследований степень подмерзания у изученных сортов не превышала 2 баллов, повреждения имели обратимый характер. Данный показатель за годы исследований изменялся в средней степени, коэффициент вариации составил у сорта 'Венгерка Курсакова' 17,01%, у сорта 'Этюд' – 15,38%. Вегетативные почки нового сорта и контроля при данном режиме промораживания имели незначительные повреждения паренхимы под почкой, что не оказывало сильного влияния на последующий рост. Цветковые почки характеризовались более сильными повреждениями, часть бутонов, как нового сорта, так и контроля, погибли.

В вегетационном периоде 2023 г. во время цветения растений сливы домашней отмечены возвратные заморозки до $-1,6^{\circ}\text{C}$, которые вызвали подмерзание цветков. Наиболее уязвимой частью цветка оказался пестик. У нового и контрольного сортов отмечено слабое подмерзание (менее 25%). Количество погибших цветков у сорта

'Венгерка Курсакова' не превышало 12%. У сорта 'Этюд' данный показатель составил 8% (см. таблицу).

Оценку состояния водного режима растений проводили в период без осадков на фоне повышенных температур. Показатель водного дефицита у сорта 'Венгерка Курсакова' в среднем за годы исследований составил $5,2 \pm 1,15\%$, у контрольного сорта 'Этюд' – $7,6 \pm 1,93\%$. Общее содержание воды в листьях у нового сорта составило $66,5 \pm 1,01\%$, а у контроля – $66,1 \pm 1,17\%$ от массы сырой навески. Исследуемые сорта характеризовались высокой водоудерживающей способностью. При искусственном обезвоживании в течение четырех часов выветривания потеря воды у сорта 'Венгерка Курсакова' составила $15,6 \pm 1,18\%$, у контрольного сорта 'Этюд' – $12,5 \pm 2,03\%$. Изученные сорта также характеризовались высокой способностью восстанавливать тургор листьев. При помещении увядших листьев во влажную камеру на один час степень восстановления оводненности составила у нового сорта $94,4 \pm 5,33\%$, а у контроля – $92,2 \pm 4,34\%$ от количества отданной воды.

Вегетационный период 2016 г. характеризовался повышенной влажностью воздуха при дефиците положительных активных температур (https://rp5.ru/погода_в_Мичуринске_Тамбовская_область), что способствовало эпифитотийному развитию дырчатой пятнистости листьев и монилиальной гнили плодов на растениях сливы домашней. Признаки клостероспориоза были отмечены у каждого растения, однако степень развития имела сортовые различия. У сорта 'Венгерка Курсакова' выявлена повышенная устойчивость к дырчатой пятнистости листьев, интенсивность развития заболевания в среднем составила 2 балла. Максимальный балл поражения у отдельных растений не превышал 3,0 балла (см. таблицу). Контрольный сорт 'Этюд' характеризовался повышенной восприимчивостью к дырчатой пятнистости листьев. Степень развития болезни составила 3,9 балла, а максимальное поражение растений – 4,0 балла. Средний балл поражения плодов монилиальной гнилью у сорта 'Венгерка Курсакова' составил 3 балла, максимальное значение у отдельных растений достигало 4 баллов. У контрольного сорта 'Этюд' степень развития заболевания составила 2,5 балла, а максимальное значение не превышало 3 баллов.

В вегетационном периоде 2020 г. в насаждениях сливы домашней отмечено массовое распространение полистигмоза. У сорта 'Венгерка Курсакова' не выявлено при-

знаков заболевания. Степень развития болезни у контрольного сорта 'Этюд' составила 3,0 балла при максимальном ее значении у отдельных растений 4,0 балла (см. таблицу).

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что новый сорт сливы домашней 'Венгерка Курсакова' адаптирован к агроклиматическим условиям Центрально-Черноземного региона. Сорт характеризуется морозостойкостью, устойчивостью к класпероспориозу и полистигмозу, стабильной ежегодной урожайностью. Свежие плоды обладают гармоничным вкусом, пригодны как для потребления в свежем виде, так для промышленной переработки, характеризуются хорошей транспортабельностью. Период потребления свежей продукции – II–III декады августа. Сорт сливы домашней 'Венгерка Курсакова' рекомендуется для широкого использования в зоне испытания, а также для дальнейших селекционных программ, направленных на повышение продуктивности и качества плодов.

References / Литература

- Bogdanov R.E. The influence of winter and spring season weather conditions on the productivity of stone crops. *Contemporary Horticulture*. 2025;(4):77-89. [in Russian] (Богданов Р.Е. Влияние погодных условий зимнего и весеннего периодов на продуктивность косточковых культур. *Современное садоводство*. 2025;(4):77-89).
- Bogdanov R.Ye. Adverse factors effect of the winter and growing seasons of 2022–2023 on the productivity of domestic plum plants. *Contemporary Horticulture*. 2023;(4):106-114. [in Russian] (Богданов Р.Е. Влияние неблагоприятных факторов зимнего и вегетационного периодов 2022–23 г. на продуктивность растений сливы домашней. *Современное садоводство*. 2023;(4):106-114). DOI: 10.52415/23126701_2023_0410
- Bstudy.net. Soil and climate conditions of the Central Black Earth Region: [website]. [in Russian] (Bstudy.net. Почвенно-климатические условия ЦЧР: [сайт]). URL: https://bstudy.net/967132/agro/pochvenno_klimaticheskie_usloviya [дата обращения: 08.06.2026].
- Eremeev G.N., Lishchuk A.I. Selection of drought-resistant cultivars and rootstocks of fruit plants. Guidelines (Otbor zasukhoustoychivyykh sortov i podvoyev plodovykh rasteniy. Metodicheskiye ukazaniya). Yalta: Nikita State Botanical Gardens; 1974. [in Russian] (Еремеев Г.Н.,
- Лищук А.И. Отбор засухоустойчивых сортов и подвоев плодовых растений. Методические указания. Ялта: Государственный Никитский ботанический сад; 1974).
- Eremeev G.V. Plum and cherry plum (Sliva i alycha). Kharkov: Folio; Moscow: AST; 2003. [in Russian] (Еремеев Г.В. Слива и алыча. Харьков: Фолио; Москва: АСТ; 2003).
- Kashin V.I. Scientific fundamentals of adaptive horticulture (Nauchnye osnovy adaptivnogo sadovodstva). Moscow: Kolos; 1995. [in Russian] (Кашин В.И. Научные основы адаптивного садоводства. Москва: Колос; 1995).
- rp5.ru. Weather in Michurinsk (Pogoda v Michurinske): [website]. [in Russian] (rp5.ru. Погода в Мичуринске: [сайт]). URL: https://rp5.ru/погода_в_Мичуринске_Тамбовская_область [дата обращения: 08.12.2025].
- Sedov E.N., Ogoltsova T.P. (eds). Program and methodology of variety studies for fruit, berry and nut crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kultur). Orel: VNIISP; 1999. [in Russian] (Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999).
- Tyurina M.M., Gogoleva G.A., Efimova N.V., Goloulina L.K., Morozova N.G., Echedi Y.Y., Volkov F.A., Arsenyev A.P., Matyash N.A. Assessment of fruit and berry crops for resistance to stressors of the cold season under field and controlled conditions: guidelines (Opredeleniye ustoychivosti plodovykh i yagodnykh kultur k stressoram kholodnogo vremeni goda v polevykh i kontroliruyemykh usloviyakh: metodicheskiye rekomendatsii). V.I. Kashin (ed.). Moscow: VSTISP; 2002. [in Russian] (Тюрина М.М., Гоголева Г.А., Ефимова Н.В., Голоулина Л.К., Морозова Н.Г., Эчедеи Й.Й., Волков Ф.А., Арсентьев А.П., Матяш Н.А. Определение устойчивости плодовых и ягодных культур к стрессорам холодного времени года в полевых и контролируемых условиях: методические рекомендации / под ред. В.И. Кашина. Москва: ВСТИСП; 2002).
- Yushkov A.N. Breeding of fruit plants for resistance to abiotic stressors (Selektsiya plodovykh rasteniy na ustoychivost k abioticheskim stressoram). Michurinsk; 2019. [in Russian] (Юшков А.Н. Селекция плодовых растений на устойчивость к абиотическим стрессорам. Мичуринск; 2019).
- Zaremuk R. Adaptive assortment of plum for ecological stable production in the Krasnodar region. *Fruit Growing and Viti-culture of South Russia*. 2013;20(2):1-7. [in Russian] (Заремук Р.Ш. Адаптивный сортимент сливы для экологически устойчивого производства плодов в Краснодарском крае. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2013;20(2):1-7).

Информация об авторе

Роман Евгеньевич Богданов, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, 393774 Россия, Тамбовская область, Мичуринск, ул. Мичурина, 30, vniigispr3@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4432-3245>

Information about the author

Roman E. Bogdanov, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, I.V. Michurin Federal Scientific Center, 30 Michurina St., Michurinsk, Tambov Province 393774, Russia, vniigispr3@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4432-3245>

Статья поступила в редакцию 10.12.2025; одобрена после рецензирования 20.05.2026; принята к публикации 23.06.2026. The article was submitted on 10.12.2025; approved after reviewing on 20.05.2026; accepted for publication on 23.06.2026.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья

УДК 633.112.1:631.52(470.61)

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o15

Сравнительная оценка сортов и линий озимой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) в условиях Ростовской области

О. А. Дубинина, Н. А. Ковтунова, А. С. Иванисова

Аграрный научный центр «Донской», зерноград, Россия

Автор, ответственный за переписку: Наталья Александровна Ковтунова, n-beseda@mail.ru

Актуальность. Изучение и использование экологически адаптированных генотипов позволяет минимизировать потери продуктивности при воздействии абиотических и биотических стрессоров. Цель данной работы – определить изменчивость основных хозяйственно ценных признаков у сортов озимой твердой пшеницы различного эколого-географического происхождения в условиях Ростовской области.

Материалы и методы. Исследования проводились в южной зоне Ростовской области на базе Аграрного научного центра «Донской» (АНЦ «Донской»). Для исследований взяли 38 сортов и линий озимой твердой пшеницы селекции АНЦ «Донской», НЦЗ им. П.П. Лукьяненко, СГИ – НЦСС и др.

Результаты и заключение. По урожайности зерна превысили стандарт на 0,63–1,14 т/га 'Юбилейка', 'Динас', 'Хризолит', 'Каравелла', Л 4089 h 94, 'Белла', 'Агат Донской', Гордеиформе 771 p 46-18-26 и 'Придонье'. К I классу качества зерна по стекловидности относились сорта 'Придонье' и 'Добрыня', по натуре зерна и содержанию белка – практически все сорта и линии, выделенные по урожайности зерна, по содержанию клейковины – 'Кристелла' и 'Добрыня'. Высокая и средняя изменчивость отмечена по урожайности зерна, стекловидности, массе 1000 зерен. Наибольшей стабильностью по урожайности отличались сорта 'Синьора' ($C_v = 12,8\%$) и 'Агат Донской' ($C_v = 13,6\%$). По натуре и содержанию белка, клейковины и каротиноидов наблюдалась стабильность признака. Средняя связь отмечена между урожайностью и содержанием каротиноидов ($r = -0,46 \pm 0,20$); стекловидностью и массой 1000 зерен ($r = -0,45 \pm 0,20$), белка ($r = 0,45 \pm 0,20$) и клейковины ($0,48 \pm 0,20$); массой 1000 зерен и содержанием белка ($r = -0,44 \pm 0,20$), клейковины ($r = -0,45 \pm 0,20$) и каротиноидов ($r = -0,51 \pm 0,19$); содержанием белка и клейковины ($r = 0,76 \pm 0,14$).

Ключевые слова: урожайность, качество, клейковина, белок, масса 1000 зерен, каротиноиды, корреляция, стабильность

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации государственного задания АНЦ «Донской» FNFN-2025-0006 «Создать новые высокопродуктивные сорта зерновых колосовых культур, устойчивые к стресс-факторам на основе комплексного изучения генофонда».

Для цитирования: Дубинина О.А., Ковтунова Н.А., Иванисова А.С. Сравнительная оценка сортов и линий озимой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) в условиях Ростовской области. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):180-191. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o15

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o15

Comparative evaluation of winter durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars and lines in Rostov Province

Olga A. Dubinina, Natalia A. Kovtunova, Anna S. Ivanisova

Donskoy Agricultural Research Center, Zernograd, Russia

Corresponding author: Natalia A. Kovtunova, n-beseda@mail.ru

Background. Studying and utilizing environmentally adapted genotypes helps to minimize crop productivity losses under the effect of abiotic and biotic stressors. The objective of the current study was to assess the variability of key agronomic traits in winter durum wheat cultivars and lines of different ecogeographic origin in Rostov Province.

Materials and methods. The study was conducted in the southern part of Rostov Province at the Donskoy Agricultural Research Center. Thirty-eight winter durum wheat cultivars and lines developed by the Donskoy Center, P.P. Lukyanenko National Grain Center, PBGI-NCSCI, etc. were studied.

Results and conclusion. Grain yield of 'Yubilyarka', 'Dinas', 'Khrizolit', 'Karavella', L 4089 h 94, 'Bella', 'Agat Donskoy', Gordeiforme 771 p 46-18-26, and 'Pridonye' exceeded the reference by 0.63–1.14 t/ha. Cvs. 'Pridonye' and 'Dobryana' were attributed to the first class of grain quality for their vitreousness, almost all the cultivars for grain test weight and protein content, and cvs. 'Kristella' and 'Dobryana' for gluten content. High and medium variability was identified in grain yield, vitreousness, and 1000-grain weight. Cvs. 'Sinyora' ($C_v = 12.8\%$) and 'Agat Donskoy' ($C_v = 13.6\%$) had the greatest stability in yield. Test weight, and the content of protein, gluten and carotenoids were stable. Medium correlations were identified between yield and carotenoid content ($r = -0.46 \pm 0.20$); vitreousness and 1000-grain weight ($r = -0.45 \pm 0.20$), protein content ($r = 0.45 \pm 0.20$), and gluten content (0.48 ± 0.20); 1000-grain weight and the content of protein ($r = -0.44 \pm 0.20$), gluten ($r = -0.45 \pm 0.20$), and carotenoids ($r = -0.51 \pm 0.19$); protein content and gluten content ($r = 0.76 \pm 0.14$).

Keywords: yield, quality, gluten, protein, 1000-grain weight, carotenoids, correlation, stability

Acknowledgments: the work was carried out as part of the implementation of the state task assigned to the Donskoy Agricultural Research Center, Project FNFN-2025-0006 "To develop new highly productive cultivars of cereal grain crops resistant to stress factors, based on a comprehensive study of their gene pools".

For citation: Dubinina O.A., Kovtunova N.A., Ivanisova A.S. Comparative evaluation of winter durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars and lines in Rostov Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):180-191. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o15

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Посевы твердой пшеницы в мире составляют около 16 млн га, что составляет около 8% от общей площади под пшеницей (<https://www.igc.int/en>). По данным Минсельхоза РФ, на 2025 год посевные площади под твердой пшеницей составили 0,859 млн га, в том числе 40 тыс. га – под озимой (Crop cultivation areas..., 2025). Наибольший ареал распространения в Российской Федерации приходится на яровую твердую пшеницу, но она формирует в несколько раз меньшую урожайность, чем озимая. Растения твердой озимой пшеницы благодаря биологическим особенностям более продуктивны, чем яровой, а по качеству не уступают ей. Это свидетельствует о неплохой для этого вида приспособленности к местным условиям (Samofalova et al., 2013).

Зерно твердой пшеницы является незаменимым сырьем для производства крупы, макарон, кондитерских изделий и т. д. К качеству зерна пшеницы всегда предъявляются высокие требования. Высококачественное зерно необходимо для внутреннего потребления и для экспорта в другие страны. Поэтому требуется, чтобы зерно пшеницы было крупным, стекловидным, с высокой натурной массой, имело хорошие мукомольные и хлебопекарные качества. Важными технологическими качествами твердой пшеницы являются также прочная клейковина и высокое содержание желтого пигмента, представляющие важную цель для селекционеров (Vida et al., 2021). Сорта твердой пшеницы отличаются упругой и прочной клейковиной, используются для выработки макарон, вермишели, манной крупы и в кондитерской промышленности. Установлено, что процентное содержание белка в зерне твердой пшеницы вносит наибольший вклад в индекс качества (40%), за ним следует клейковина (30%) (Giunta et al., 2020).

Урожайность озимой пшеницы демонстрирует положительный прирост в основном благодаря улучшенной генетике и методам ведения сельского хозяйства, но может испытывать значительное варьирование под влиянием стресс-факторов (Zhao et al., 2023). Явления, сочетающие в себе неблагоприятные климатические переменные, не все из которых обязательно являются экстре-

мальными, могут привести к более значительному воздействию на урожайность пшеницы, чем любой отдельный тип стрессора, действующий сам по себе. Засуха является одной из наиболее распространенных проблем, с которыми сталкивается эта культура в ряде регионов. Информация о влиянии внешних условий (содержания влаги, температуры) на качество и урожайность имеет первостепенное значение в свете глобального потепления и последующих изменений климата (Kovtunova, Kovtunov, 2024; Khlystunov, Kovtunov, 2024). Изучение, выделение и использование экологически адаптированных генотипов позволяет в полной мере реализовать биоклиматический потенциал в благоприятных условиях возделывания, а также минимизировать потери продуктивности при воздействии абиотических и биотических стрессоров.

Цель данной работы – определить изменчивость основных хозяйственно ценных признаков у сортов и линий озимой твердой пшеницы различного эколого-географического происхождения в условиях Ростовской области, выявить корреляционные связи между ними.

Материалы и методы

Исследования проводились в 2023–2025 гг. в южной зоне Ростовской области на базе Аграрного научного центра «Донской» (АНЦ «Донской»). Для исследований взяли 38 сортов озимой твердой пшеницы селекции АНЦ «Донской» (г. Зерноград, Ростовская область), Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко (НЦЗ им. П.П. Лукьяненко, г. Краснодар), Селекционно-генетического института Национального центра семеноведения и сортоизучения (СГИ – НЦСС, г. Одесса, Украина), ООО «Кошелевский посад» (пос. Кошелевка, Самарская обл.), Северо-Кавказского федерального научного аграрного центра (ФНАЦ, г. Михайловск, Ставропольский край) (табл. 1).

Стандартом служил сорт 'Кристелла'. Посев проводился по предшественнику (сидеральный пар) сеялкой Wintersteiger Plottseed S, расположение делянок систематическое, учетная площадь делянок – 10 м², повторность двукратная, норма высева – 5 млн всхожих семян на 1 га.

Таблица 1. Происхождение сортов и линий из питомника экологического испытания

Table 1. Origin of cultivars and lines grown in the environmental testing nursery

Оригинатор	Сорт (год включения в Госреестр), линия
АНЦ «Донской» (г. Зерноград, Ростовская область)	'Кристелла' (2013), 'Агат Донской' (2012), 'Диона' (2016), 'Юбиларка' (2019), 'Лакомка' (2022), 'Динас' (2022), 'Хризолит' (2024), 'Придонье' (2025), 'Графит' (2026), 'Амазонка' (2009), 'Эйрена' (2017), 'Яхонт' (2018), 'Янтарина' (2020), 'Услада' (2021), 'Эллада' (2024)
НЦЗ им. П.П. Лукьяненко (г. Краснодар)	'Одари' (2017), 'Синьора' (2022), 'Белла' (2024), 'Белка' (2025), 'Крупинка' (2005) 'Кордон', 'Добрыня', 'Цель', Л 4089 h 94, Л 3596 h 5615-22, Гордеиформе 771 p 46-18-26, Л 4336 h 24, Л 3596 h 5615-69
ООО «Кошелевский посад» (пос. Кошелевка, Самарская область)	'Кошелевская' (2023)
СКФНЦ Прикумская ОСС	'Живица'
ФНАЦ (г. Михайловск, Ставропольский край)	'Прикумская 142' (2006), 'Степной Янтарь' (2014), 'Цитрина'
СГИ – НЦСС (г. Одесса, Украина)	'Континент', 'Каравелла', 'Бурштин', 'Андромеда', 'Гавань'

Агротехника выращивания и система ухода за посевами в опыте соответствовали научно обоснованным рекомендациям для данной природно-климатической зоны (Zonal farming systems..., 2022). Уборку проводили комбайном Wintersteiger Classic в фазу полной спелости.

Качество зерна у сортов и линий озимой твердой пшеницы определяли по следующим методикам: количество клейковины – согласно ГОСТ Р 54478-2011 (ГОСТ Р 54478-2011..., 2012), натуру зерна – ГОСТ Р 10840-2017 (ГОСТ Р 10840-2017..., 2019), содержание белка – ГОСТ Р 10846-91 (ГОСТ Р 10846-91..., 2009), стекловидность – ГОСТ Р 70629-2023 (ГОСТ Р 70629-2023..., 2023), содержа-

за период с марта по июль выпало 83 мм при среднемноголетнем показателе за этот период 260 мм. Температурный режим практически во все месяцы был выше среднемноголетней температуры воздуха на 2,1–4,8°C. Частые суховеи в этот период привели к сокращению вегетационного периода, более раннему созреванию зерна. Сезон 2024/2025 г. характеризуется как острозасушливый. Сумма осадков за период с октября по июль составила 375 мм, из них 107 мм выпало в июне. Температурный режим в отдельные месяцы значительно отличался от среднемноголетних данных: так, в январе, марте и июне повышение составило 4,4–5,8°C (табл. 2).

Таблица 2. Метеорологические условия в 2023–2025 сельскохозяйственных годах (по данным метеостанции «Зерноград»)

Table 2. Meteorological conditions in the 2023–2025 agricultural years (according to the data of Zernograd Weather Station)

Месяц	Температура воздуха, °C				Осадки, мм			
	2022/2023	2023/2024	2024/2025	средне-многолетнее	2022/2023	2023/2024	2024/2025	средне-многолетнее
Октябрь	8,0	11,6	12,4	9,4	4	35	59	39
Ноябрь	1,9	5,5	7,4	3,4	42	24	155	51
Декабрь	0,2	0,5	2,3	–1,2	126	32	85	63
Январь	–0,6	–1,7	2,0	–3,8	17	106	32	45
Февраль	–1,4	2,4	–5,2	–3,0	76	16	31	37
Март	7,4	4,9	7,2	2,0	36	10	18	37
Апрель	11,5	16,6	11,6	10,7	88	13	36	43
Май	16,0	15,6	17,2	16,5	11,6	22	53	51
Июнь	20,5	24,7	21,1	20,5	37	13	107	71
Июль	24,0	27,9	27,5	23,1	52	25	14	58
Сумма	2682,8	3294,0	3184,0	2380,0	490	296	590	495

ние каротиноидов – колориметрическим методом. Разделение сортов озимой твердой пшеницы на классы по качеству зерна проводили в соответствии с ГОСТ 9353-2016 (ГОСТ 9353-2016..., 2019).

Математическую и статистическую обработку данных осуществляли методом дисперсионного анализа по Б. А. Доспехову (Dospikhov, 1985) с помощью программы Microsoft Office Excel.

Климатические условия в период вегетации и уборки озимой твердой пшеницы были нетипичными для роста и развития озимой твердой пшеницы в южной части Ростовской области.

В 2022/2023 г. с октября по июль сумма осадков составила 490 мм при норме 495 мм. Средняя температура воздуха в осенне-зимний период была выше среднемноголетней на 1,6–3,2°C, в марте это превышение составило 5,4°C, а в остальные месяцы температура воздуха была на уровне среднемноголетних данных. В 2023/2024 г. количество осадков было на уровне 504 мм. Однако большая часть осадков выпала в осенне-зимний период,

Результаты и обсуждение

Селекция любой культуры, в том числе и пшеницы, направлена в основном на увеличение урожайности. Ее зависимость от факторов внешней среды подтверждают полученные данные. Так, обильные осадки, зафиксированные в мае и июле 2023 г., оказали деструктивное влияние на состояние агроценозов. Избыточное увлажнение привело к массовому полеганию посевов и активизации фитопатогенных грибных микроорганизмов. Совокупность данных факторов обусловила формирование щуплости зерна и, следовательно, снижение урожайности у изучаемых сортов и линий до 4,27–7,70 т/га (стандарт 'Кристелла' – 5,17 т/га). Несмотря на сокращение вегетационного периода в 2024 г., урожайность у изучаемых сортов была значительно выше и составила 8,71–10,64 т/га (стандарт – 10,12 т/га). Интенсивные осадки, сопровождавшиеся усилением ветра в начале июня, оказали неблагоприятное воздействие на налив зерна озимой пшеницы, что привело к недобору урожая: 8,21–

10,19 т/га (стандарт – 9,39 т/га). В результате анализа урожайности отмечена ее существенная вариабельность в зависимости не только от условий возделывания, но и от генотипических особенностей. В среднем по сортам селекции АНЦ «Донской» коэффициент варьирования составил 22,9%, селекции НЦЗ им. П.П. Лукьяненко – 21,0%, СГИ – НЦСС – 18,8%. В 2023 г. значительно превысили по урожайности стандарт 'Кристелла' (5,19 т/га, $HCP_{05} = 0,51$ т/га) 26 сортов, в 2024 г. при урожайности стандарта 10,12 т/га и $HCP_{05} = 0,82$ т/га – 3 сорта, в 2025 г. при урожайности стандарта 9,39 т/га и $HCP_{05} = 0,40$ т/га – 13 сортов (рисунок).

В таблице 3 приведены сорта, сформировавшие наибольшую урожайность в среднем за 3 года.

Минимальные значения урожайности у выделенных сортов и линий получены в 2023 г. При этом они были выше аналогичного показателя у стандарта на 0,50–2,53 т/га. Максимальные значения урожайности в среднем за годы изучения варьировали от 9,51 до 11,30 т/га. Следует отметить линии Л 4089 h 94 и Гордеиформе 771 p 46-18-26 (НЦЗ им. П.П. Лукьяненко), сорт 'Придонье' (АНЦ «Донской») со значениями 11,00–11,30 т/га, что выше максимального значения у стандарта на 1,32–1,74 т/га. В среднем за 2023–2025 гг. наибольшую уро-

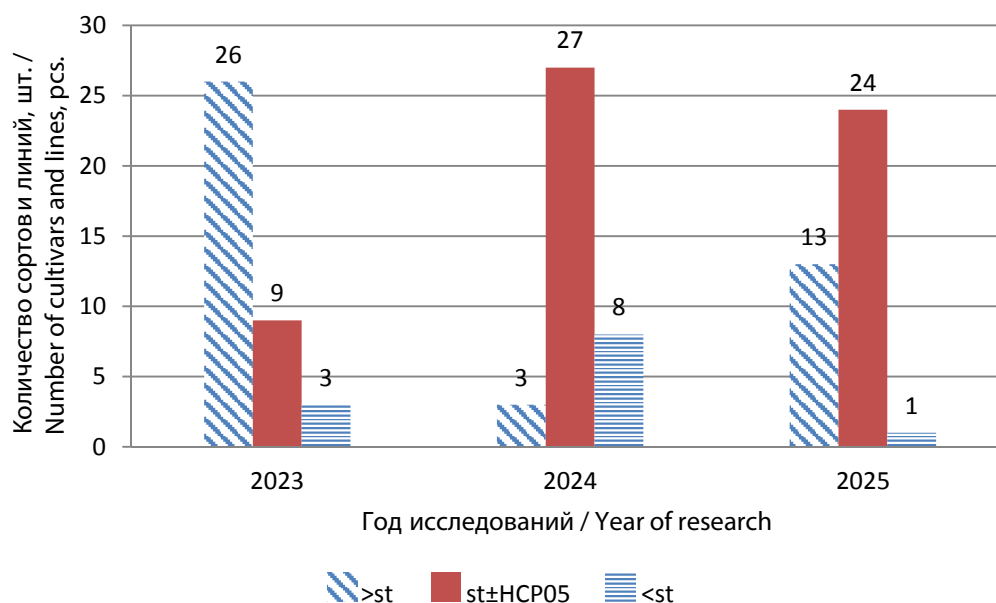


Рисунок. Распределение сортов и линий озимой твердой пшеницы по урожайности по отношению к стандарту (st), 2023–2025 гг.

Figure. Distribution of winter durum wheat cultivars and lines by their yield versus the reference (st), 2023–2025

Таблица 3. Урожайность зерна у сортов и линий озимой твердой пшеницы, 2023–2025 гг.

Table 3. Grain yield of winter durum wheat cultivars and lines, 2023–2025

Сорт, линии	Урожайность зерна, т/га						C _v , %
	min	± st	max	± st	Среднее	± st	
'Кристелла', st	5,17	–	10,12	–	8,23	–	32,5
'Агат Донской'	7,62	2,45	9,80	–0,32	9,04	0,81	13,6
'Диона'	6,38	1,21	10,13	0,01	8,68	0,45	23,2
'Юбилейка'	6,19	1,02	10,25	0,13	8,86	0,61	26,0
'Лакомка'	7,05	1,88	10,05	–0,07	8,80	0,57	17,7
'Динас'	6,34	1,17	10,39	0,27	8,87	0,59	24,6
'Хризолит'	6,11	0,94	10,64	0,52	8,93	0,70	27,5
'Придонье'	7,66	2,49	11,09	0,97	9,37	1,14	18,3
'Континент'	6,86	1,69	9,69	–0,43	8,56	0,34	17,5

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Сорт, линии	Урожайность зерна, т/га						C _v , %
	min	± st	max	± st	Среднее	± st	
‘Каравелла’	6,91	1,74	10,21	0,09	8,97	0,74	20,0
‘Одари’	7,05	1,88	9,62	–0,5	8,69	0,46	16,4
‘Добряна’	6,64	1,47	9,69	–0,43	8,63	0,40	19,6
‘Кордон’	6,24	1,07	10,19	0,07	8,64	0,42	24,4
‘Синьора’	7,70	2,53	9,95	–0,17	8,80	0,57	12,8
‘Белла’	6,79	1,62	10,20	0,08	9,00	0,77	21,3
‘Белка’	7,07	1,9	9,69	–0,43	8,77	0,54	16,8
‘Цель’	7,04	1,87	9,65	–0,47	8,68	0,45	16,4
‘Крупинка’	5,67	0,5	10,47	0,35	8,68	0,45	30,2
Л 4089 h 94	6,49	1,32	11,00	0,88	9,00	0,77	25,5
Л 3596 h 5615-22	5,90	0,73	10,70	0,58	8,82	0,59	20,5
Гордеифор- ме 771 p 46- 18-26	6,91	1,74	11,30	1,18	9,32	1,10	26,4
НСР ₀₅	–	–	–	–	0,62	–	–

Примечание: min – минимальное значение; max – максимальное значение, ± st – отношение к стандарту; C_v – коэффициент вариации

Note: min – minimum value; max – maximum value, ± st – ratio to the reference; C_v – coefficient of variation

жайность сформировали сорта ‘Хризолит’, ‘Каравелла’, ‘Агат Донской’, ‘Белла’, ‘Придонье’ и линии Л 4089 h 94, Гордеиформе 771 p 46-18-26. Превышение над стандартом у них составило 0,63–1,14 т/га, или 7,6–13,8%, при НСР₀₅ = 0,61 т/га. Отмечена значительная изменчивость показателя в зависимости от условий возделывания: коэффициент вариации имел значения от 12,7 до 32,4%. Наибольшей стабильностью отличились сорта ‘Синьора’ (C_v = 12,8%) и ‘Агат Донской’ (C_v = 13,6%) (см. табл. 3).

Для зерна как сырья для крупяной и макаронной промышленности большое технологическое значение имеют такие показатели, как стекловидность, натура, масса 1000 зерен, характеризующие качество зерна и влияющие на выбор технологических режимов переработки.

Стекловидность зерна – один из основных параметров качества, используемых в мировой пшеничной промышленности, – служит индикатором качества помола и варки, поскольку связан с текстурой эндосперма, содержанием белка и цветом макаронных изделий (Zhao et al., 2023). Считается, что стекловидные зерна характеризуются высоким содержанием белка и высоким индексом твердости, что делает их более подходящими для производства макаронных изделий (Fu et al., 2018; Özdoğan, Gowen, 2025). Данный показатель характеризуется значительной изменчивостью по годам. Сильная его зависимость от влажности почвы и воздуха во время уборки отмечены в исследованиях разных ученых (Fu

et al., 2018; Malkanduev et al., 2022; Pazin, 2026). В наших исследованиях обильные осадки в период созревания и уборки в 2023 г. привели к значительному снижению стекловидности в среднем по сортам до 53%, в 2024 и 2025 г. стекловидность достигала 92–100%. Согласно ГОСТ 9353-2016 (GOST 9353-2016..., 2019) на твердую пшеницу, за изучаемый период I классу качества зерна соответствовало 2 сорта (не менее 85%): ‘Придонье’ (АНЦ «Донской») и ‘Добряна’ (НЦЗ им. П.П. Лукьяненко), остальные имели значения 76–83% и относились ко II–III классам (табл. 4). Полученный коэффициент вариации (26,6–33,2%) свидетельствует о неустойчивости данного признака у исследуемых сортов и сильной зависимости стекловидности от метеорологических условий года.

Известно, что из зерна с большей натурой при прочих равных условиях производится больший выход готовой продукции лучшего качества и с наименьшими энергозатратами (Kostsova et al., 2018). Анализ полученных данных показал, что все сорта, кроме ‘Каравелла’ (763 г/л), характеризуются как высококачественные (свыше 770 г/л) и, согласно ГОСТ 9353-2016 (GOST R 9353-2016..., 2019), относятся к зерну твердой пшеницы I класса. Отрицательное действие на данный показатель оказывают поздние сроки сева, высокие дозы азотных удобрений, а также перестой пшеницы на корню после наступления полной спелости. Однако изменчивость признака «натура зерна» обусловлена в большей степени сортовыми

Таблица 4. Физические показатели качества зерна сортов и линий озимой твердой пшеницы, 2023–2025 гг.**Table 4. Physical indicators of grain quality in winter durum wheat cultivars and lines, 2023–2025**

Сорта	Стекловидность, %		Натура, г/л		Масса 1000 зерен, г	
	$\frac{\text{min-max}}{\text{среднее}}$	C _v , %	$\frac{\text{min-max}}{\text{среднее}}$	C _v , %	$\frac{\text{min-max}}{\text{среднее}}$	C _v , %
‘Кристелла’, st	$\frac{54-100}{84}$	30,4	$\frac{720-810}{776}$	6,2	$\frac{33,1-50,3}{43,1}$	20,8
‘Агат Донской’	$\frac{55-98}{81}$	27,5	$\frac{735-810}{783}$	5,3	$\frac{34,0-48,8}{41,7}$	14,2
‘Диона’	$\frac{51-100}{82}$	28,5	$\frac{743-828}{796}$	5,8	$\frac{30,3-44,1}{40,4}$	17,8
‘Юбилярка’	$\frac{56-99}{82}$	33,2	$\frac{722-832}{791}$	7,5	$\frac{33,9-49,6}{42,9}$	18,8
‘Лакомка’	$\frac{53-99}{81}$	26,6	$\frac{731-825}{791}$	6,6	$\frac{31,3-47,1}{40,6}$	19,9
‘Динас’	$\frac{54-94}{77}$	29,6	$\frac{741-818}{791}$	5,4	$\frac{33,4-47,4}{42,7}$	20,5
‘Хризолит’	$\frac{50-96}{80}$	28,1	$\frac{689-822}{772}$	9,3	$\frac{30,6-45,6}{40,5}$	18,9
‘Придонье’	$\frac{53-99}{85}$	31,8	$\frac{742-826}{797}$	6,0	$\frac{37,6-52,0}{45,8}$	26,5
‘Каравелла’	$\frac{51-95}{77}$	33,0	$\frac{707-795}{763}$	6,3	$\frac{39,4-49,7}{44,8}$	18,2
‘Континент’	$\frac{50-92}{71}$	30,6	$\frac{705-816}{772}$	7,6	$\frac{36,2-54,9}{46,9}$	20,4
‘Одари’	$\frac{52-97}{81}$	27,0	$\frac{740-822}{789}$	5,4	$\frac{36,8-53,8}{45,0}$	18,9
‘Кордон’	$\frac{53-100}{82}$	28,1	$\frac{746-823}{796}$	5,4	$\frac{38,2-48,1}{44,5}$	19,2
‘Добряна’	$\frac{56-100}{85}$	32,8	$\frac{746-822}{792}$	5,1	$\frac{32,5-49,0}{42,0}$	22,4
‘Синьора’	$\frac{52-100}{81}$	31,6	$\frac{728-823}{790}$	6,8	$\frac{35,1-46,7}{41,6}$	16,2
‘Белла’	$\frac{52-97}{81}$	30,2	$\frac{761-839}{807}$	5,0	$\frac{32,5-47,3}{41,4}$	11,5
‘Белка’	$\frac{53-99}{83}$	29,6	$\frac{742-828}{794}$	5,7	$\frac{35,2-48,9}{43,1}$	20,5
‘Цель’	$\frac{50-98}{76}$	28,5	$\frac{747-826}{798}$	5,5	$\frac{35,5-50,1}{44,7}$	12,4
‘Крупинка’	$\frac{51-98}{81}$	31,6	$\frac{749-828}{801}$	5,6	$\frac{31,6-51,6}{43,7}$	15,8
Л 4089 h 94	$\frac{52-98}{80}$	29,9	$\frac{739-831}{797}$	6,3	$\frac{37,4-50,8}{44,8}$	14,2
Л 3596 h 5615-22	$\frac{51-98}{80}$	32,2	$\frac{732-821}{789}$	6,2	$\frac{37,2-52,1}{45,0}$	12,4
Гордеиформе 771 p 46-18-26	$\frac{51-97}{80}$	30,7	$\frac{740-820}{792}$	5,6	$\frac{31,4-52,2}{42,9}$	18,9
HCP ₀₅	5,95		15,68		3,75	

Примечание: st – стандарт; HCP – наименьшая существенная разность

Note: st – the reference; HCP – least significant difference

особенностями. Этот показатель является генетически обусловленным и имеет высокую наследуемость (Bebyukin, Korobova, 1990). В наших исследованиях натура имела показатели коэффициента вариации 5,1–9,3%, следовательно изучаемая совокупность сортов характеризуется низкой степенью варьирования признака.

Масса 1000 зерен характеризует крупность, плотность и выполненность зерна. Это комплексный показатель, зависящий от линейных размеров зерна, накопления белка и крахмала, условий вегетации в период формирования, налива и созревания зерна. Установлено, что засушливые условия при возделывании пшеницы понижают ее натурную массу и массу 1000 зерен, вследствие чего ухудшаются мукомольные свойства зерна (Timoshenkova, Vashchenko, 2022). В исследованиях А. И. Кинчарова с соавторами засушливые условия привели к снижению массы зерна до 6% (Kincharov et al., 2020).

По крупности зерна значения варьировали от 30,3 г ('Диона') до 54,9 г ('Континент'). В среднем за 2023–2025 гг. все сорта характеризовались крупнозерностью (масса 1000 зерен выше 40 г); наибольшие средние значения имели сорта 'Континент' (46,9 г), 'Придонье' (45,8 г), 'Одари' (45,0 г) и линия Л 3596 h 5615-22 (45,0 г). Расчет коэффициента вариации показал сильную измен-

чивость этого признака (от 22,0% до 26,0%). Это указывает на существенное влияние на исследуемый показатель не только генотипа, но и метеорологических условий.

При определении качества пищевой ценности и потребительских достоинств пищевых продуктов важным является химический состав сырья. От его количества и качества зависят показатели качества крупы, макарон и т. д. У сортов твердой пшеницы содержание белка выше 13% желательно для приготовления макаронных изделий хорошего качества, в результате чего повышается устойчивость к перевариванию.

Содержание белка изученных сортов озимой твердой пшеницы имело значения от 12,37% (Л 3596 h 5615-22) до 16,54% ('Хризолит'). По средним данным этот показатель варьировал от 13,23% (Л 3596 h 5615-22) до 15,02% ('Добрыня'), то есть практически все сорта отвечают требованию I класса ГОСТ 9353-2016 (ГОСТ 9353-2016..., 2019) по данному показателю. Наибольшие значения отмечены у сортов 'Диона' (14,59%), 'Кристелла' (14,63%), 'Хризолит' (14,78%), 'Добрыня' (15,02%). Коэффициент вариации показал слабую изменчивость по данному признаку (2,9–8,7%), что свидетельствует о его стабильности (табл. 5).

Таблица 5. Химические показатели качества зерна сортов и линий озимой твердой пшеницы, 2023–2025 гг.

Table 5. Chemical indicators of grain quality in winter durum wheat cultivars and lines, 2023–2025

Сорт, линия	Белок, %		Клейковина, %		Каротиноиды, мкг/%	
	<u>min-max</u> среднее	C _v , %	<u>min-max</u> среднее	C _v , %	<u>min-max</u> среднее	C _v , %
'Кристелла', st	<u>13,49–15,21</u> 14,63	5,5	<u>26,5–30,0</u> 28,1	6,4	<u>492–565</u> 540	6,3
'Агат Донской'	<u>13,50–15,20</u> 14,43	6,6	<u>25,5–31,5</u> 27,7	11,9	<u>427–578</u> 528	13,4
'Диона'	<u>13,71–15,06</u> 14,59	4,9	<u>26,2–29,5</u> 27,6	6,1	<u>476–562</u> 531	7,3
'Юбилярка'	<u>13,38–14,56</u> 14,12	4,3	<u>25,1–29,1</u> 26,6	8,2	<u>425–649</u> 548	16,9
'Лакомка'	<u>13,40–14,48</u> 13,97	6,8	<u>25,1–27,9</u> 26,2	5,6	<u>465–594</u> 551	10,4
'Динас'	<u>13,15–14,93</u> 14,18	3,9	<u>25,0–28,7</u> 26,5	7,3	<u>462–609</u> 555	11,8
'Хризолит'	<u>13,48–16,54</u> 14,78	3,7	<u>24,5–28,0</u> 26,1	6,7	<u>497–594</u> 545	7,2
'Придонье'	<u>13,12–14,71</u> 14,12	2,9	<u>24,3–28,4</u> 26,3	7,8	<u>388–568</u> 484	15,2
'Каравелла'	<u>13,55–14,90</u> 14,31	4,1	<u>25,1–27,4</u> 26,1	4,4	<u>450–562</u> 524	9,9
'Континент'	<u>13,34–14,47</u> 13,73	3,2	<u>25,0–26,5</u> 25,6	3,1	<u>425–558</u> 508	11,6
'Одари'	<u>13,00–13,93</u> 13,59	5,3	<u>23,3–26,3</u> 24,5	6,5	<u>442–558</u> 514	10,0

Таблица 5. Окончание

Table 5. The end

Сорт, линия	Белок, %		Клейковина, %		Каротиноиды, мкг/%	
	$\frac{\text{min-max}}{\text{среднее}}$	C _v , %	$\frac{\text{min-max}}{\text{среднее}}$	C _v , %	$\frac{\text{min-max}}{\text{среднее}}$	C _v , %
‘Кордон’	$\frac{13,81-14,52}{14,25}$	3,9	$\frac{25,8-29,1}{27,4}$	6,0	$\frac{437-543}{507}$	9,7
‘Добряна’	$\frac{14,2-16,18}{15,02}$	8,7	$\frac{25,9-32,4}{29,0}$	11,2	$\frac{429-533}{483}$	8,8
‘Синьора’	$\frac{13,28-14,86}{14,28}$	5,0	$\frac{25,3-28,2}{26,4}$	5,8	$\frac{452-562}{517}$	9,1
‘Белла’	$\frac{13,36-14,36}{13,99}$	3,9	$\frac{24,5-29,6}{26,4}$	10,4	$\frac{423-551}{502}$	11,2
‘Белка’	$\frac{13,36-14,54}{13,85}$	3,8	$\frac{25,5-26,9}{26,0}$	3,0	$\frac{427-573}{521}$	12,7
‘Цель’	$\frac{12,84-14,95}{13,73}$	5,4	$\frac{25,9-26,9}{26,4}$	1,8	$\frac{448-609}{551}$	13,2
‘Крупинка’	$\frac{12,94-14,69}{13,95}$	4,3	$\frac{24,0-29,9}{26,1}$	12,7	$\frac{413-549}{501}$	12,4
Л 4089 h 94	$\frac{12,97-14,53}{13,83}$	3,5	$\frac{24,8-27,4}{26,0}$	5,0	$\frac{426-543}{502}$	10,6
Л 3596 h 5615-22	$\frac{12,37-13,72}{13,23}$	5,8	$\frac{22,3-27,8}{24,5}$	11,9	$\frac{404-540}{485}$	12,0
Гордеиформе 771 p 46-18-26	$\frac{12,75-13,89}{13,46}$	3,1	$\frac{23,1-27,0}{24,5}$	8,8	$\frac{411-560}{496}$	12,6
HCP ₀₅	0,72	–	1,49	–	40,98	–

Примечание: st – стандарт; HCP – наименьшая существенная разность

Note: st – the reference; HCP – least significant difference

Содержание клейковины у сортов и линий озимой твердой пшеницы по годам варьировало от 22,3 (Л 3596 h 5615-22) до 32,4% (‘Добряна’). В среднем за 2023–2025 гг. большая часть сортов, согласно ГОСТ 9353-2016 (ГОСТ 9353-2016..., 2019), относилась ко II классу по содержанию клейковины. Сорта ‘Кристелла’ и ‘Добряна’ со значениями 28,1–29,0% отвечают требованиям I класса к твердой пшенице. Данный показатель в изученных образцах является генетически детерминированным признаком с низким и средним уровнем варьирования (1,8–12,7%). Особую селекционную ценность представляют сорта ‘Белка’, ‘Континент’, ‘Каравелла’ и линия Л 4089 h 94, проявившие высокую стабильность (3,0–5,0%) и сохранявшие показатель «содержание клейковины» практически неизменным в различных условиях среды.

Каротиноидный пигмент влияет на цвет макаронных изделий. Для производства высококачественных макаронных изделий требуются высокое содержание пигмента и низкая активность окислительных ферментов (Shakir et al., 2026).

По содержанию каротиноидов в годы изучения наблюдались показатели от 388 (‘Придонье’) до 649 мкг/% (‘Юбиларка’). В селекционной практике по данному признаку ведется постоянный отбор, и образцы с уровнем

ниже 400 мкг/% выбраковываются (Ivanisova et al., 2026). Средние значения варьировали от 484 до 555 мкг/%, то есть все сорта отвечали данному требованию. Наибольшее содержание каротиноидов отмечено у сортов ‘Кристелла’ (540 мкг/%), ‘Хризолит’ (545 мкг/%), ‘Юбиларка’ (548 мкг/%), ‘Лакомка’ (551 мкг/%), ‘Цель’ (551 мкг/%) и ‘Динас’ (555 мкг/%). Согласно анализу коэффициента вариации, признак имеет слабую и среднюю изменчивость по годам (6,3–16,9%). Наибольшей стабильностью по содержанию каротиноидов характеризуются сорта ‘Кристелла’ (6,3%), ‘Хризолит’ (7,2%), ‘Диона’ (7,3%), ‘Добряна’ (8,8%).

В селекционной работе важно знать, насколько сочетаются в сортах определенные уровни продуктивности и качества зерна. Достоверная средняя отрицательная корреляция наблюдалась между урожайностью и содержанием каротиноидов ($r = -0,46 \pm 0,20$), стекловидностью и массой 1000 зерен ($r = -0,45 \pm 0,20$); массой 1000 зерен и содержанием белка, клейковины и каротиноидов ($r = -0,44 \pm 0,20$; $-0,45 \pm 0,20$; $-0,51 \pm 0,19$ соответственно). Средняя положительная связь выявлена между стекловидностью и содержанием белка и клейковины ($r = 0,45 \pm 0,20$; $0,48 \pm 0,20$), содержанием белка с клейковиной ($r = 0,76 \pm 0,14$) (табл. 6).

Таблица 6. Взаимосвязь основных хозяйственно ценных признаков у сортов и линий озимой твердой пшеницы, 2023–2025 гг.**Table 6. Interplay among the main agronomic characters in winter durum wheat cultivars and lines, 2023–2025**

Показатель	Коэффициент корреляции (r)					
	Урожайность, т/га	Стекловидность, %	Натура, г/л	Масса 1000 зерен, г	Содержание белка, %	Содержание клейковины, %
Стекловидность, %	0,14					
Натура, г/л	–0,02	–0,02				
Масса 1000 зерен, г	0,14	–0,46*	–0,21			
Содержание белка, %	–0,14	0,46*	0,24	–0,45*		
Содержание клейковины, %	–0,29	0,48*	0,33	–0,45*	0,76*	
Содержание каротиноидов, мкг/%	–0,46*	–0,12	0,10	–0,52*	0,16	0,18

Примечание: * – достоверная связь

Note: * – statistically significant correlation

Заключение

В результате сравнительной оценки сортов и линий озимой твердой пшеницы различных научных учреждений в условиях Ростовской области по урожайности выделены 'Хризолит', 'Каравелла', 'Агат Донской', 'Белла', 'Придонье', Л 4089 h 94 и Гордеиформе 771 р 46-18-26 селекции АНЦ «Донской» и НЦЗ им. П.П. Лукьяненко. Превышение над стандартом у них составило 0,63–1,14 т/га, или 7,6–13,8%. При значительной изменчивости урожайности зерна (до 32,4%) сорта 'Синьора' ($C_v = 12,8\%$) и 'Агат Донской' ($C_v = 13,6\%$) можно отнести к наиболее стабильным.

Распределение сортов и линий на классы по качеству зерна позволило установить, что к I классу по стекловидности (не менее 85%) относятся сорта 'Придонье' (АНЦ «Донской») и 'Добрыня' (НЦЗ им. П.П. Лукьяненко), по натуре зерна (свыше 770 г/л) и содержанию белка (более 13,5%) – практически все изученные сорта, по содержанию клейковины – 'Кристелла' (28,0%) и 'Добрыня' (29,0%).

По комплексу признаков следует выделить сорт 'Придонье', характеризующийся высокими значениями урожайности, натуры зерна, стекловидности, крупнозерности, содержания белка и каротиноидов, и сорт 'Добрыня', сочетающий в себе высокие значения натуры зерна, стекловидности, содержания белка, клейковины и каротиноидов.

References / Литература

Bebyakin V.M., Korobova N.I. Effect of interaction of genes controlling indicators of crop structure and grain quality of winter wheat (Effekt vzaimodeystviya genov, kontroliruyushchikh pokazateli struktury urozhaya i kachestvo zerna ozimoy pshenitsy). *Doklady VASKhNIL = Reports of VASKhNIL*. 1990;(5):2-6. [in Russian] [Бебякин В.М., Коробова Н.И. Эффект взаимодействия

генов, контролирующих показатели структуры урожая и качество зерна озимой пшеницы. *Доклады ВАСХНИЛ*. 1990;(5):2-6).

Crop cultivation areas by farm categories for the 2025 harvest (Posevnye ploshchadi selskohozyajstvennykh kultur po kategoriya hozyaystv pod urozhay 2025 goda). Pro-dovolstvie Group; 2025. [in Russian] (Посевные площади сельскохозяйственных культур по категориям хозяйств под урожай 2025 года. Группа Продовольствие; 2025). URL: <https://prodgrup.ru/posevnye-ploshchadi-selskohozyajstvennykh-kultur-po-kategoriya-hozyajstv-pod-urozhaj-2025-goda> [дата обращения: 22.04.2026].

Dospikhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Агропромиздат; 1985).

Fu B.X., Wang K., Dupuis B., Taylor D., Nam S. Kernel vitreousness and protein content: Relationship, interaction and synergistic effects on durum wheat quality. *Journal of Cereal Science*. 2018;79:210-217. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.09.003

Giunta F., Bassu S., Mefleh M., Motzo R. Is the technological quality of old durum wheat cultivars superior to that of modern ones when exposed to moderately high temperatures during grain filling? *Foods*. 2020;9(6):778. DOI: 10.3390/foods9060778

GOST 10840-2017. Interstate standard. Grain. Method for determination of hectolitre weight. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 10840-2017. Межгосударственный стандарт. Зерно. Метод определения натуры. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293741/4293741700.pdf> [дата обращения: 28.04.2026].

- GOST 10846-91. Interstate standard. Grain and products of its processing. Method for determination of protein. Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 10846-91. Межгосударственный стандарт. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. Москва: Стандартинформ; 2009). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023864> [дата обращения: 28.04.2026].
- GOST 9353-2016. Interstate standard. Wheat. Specifications. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 9353-2016. Межгосударственный стандарт. Пшеница. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200139414> [дата обращения: 28.04.2026].
- GOST R 54478-2011. National standard of the Russian Federation. Grain. Methods for determination of quantity and quality of gluten in wheat. Moscow: Standartinform; 2012. [in Russian] (ГОСТ Р 54478-2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. Москва: Стандартинформ; 2012). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200087804> [дата обращения: 28.04.2026].
- GOST R 70629-2023. National standard of the Russian Federation. Wheat. Determination of vitreousness by optical-computer method. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. [in Russian] (ГОСТ Р 70629-2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Пшеница. Определение стекловидности оптико-компьютерным методом. Москва: Российский институт стандартизации; 2023). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200195235> [дата обращения: 28.04.2026].
- International Grains Council: [website]. Available from: <https://www.igc.int/en> [accessed Apr. 22, 2026].
- Ivanisova A.S., Marchenko D.M., Ivanisov M.M., Podgorny S.V., Kravchenko N.S. Main grain quality indicators of promising winter durum wheat lines. *Agrarian Science*. 2026;(4):80-85. [in Russian] (Иванисова А.С., Марченко Д.М., Иванисов М.М., Подгорный С.В., Кравченко Н.С. Основные показатели качества зерна перспективных линий озимой твердой пшеницы. *Аграрная наука*. 2026;(4):80-85). DOI: 10.32634/0869-8155-2026-405-04-80-85
- Khlystunov V.F., Kovtunov V.V. Results of determining essential breeding traits of a standard grain sorghum sample. *Grain Economy of Russia*. 2024;16(5):13-20. [in Russian] (Хлыстунов В.Ф., Ковтунов В.В. Результаты определения существенных селекционных признаков эталонного образца сорго зернового. *Зерновое хозяйство России*. 2024;16(5):13-20). DOI: 31367/2079-8725-2024-94-5-13-20
- Kincharov A.I., Taranova T.Y., Demina E.A., Chekmasova K.Y. Breeding evaluation of the trait mass of 1000 grains in arid conditions. *Advances in Current Natural Sciences*. 2020;(5):7-12. [in Russian] (Кинчаров А.И., Таранова Т.Ю., Дёмина Е.А., Чекмасова К.Ю. Селекционная оценка признака масса 1000 зерен в засушливых условиях. *Успехи современного естествознания*. 2020;(5):7-12). DOI: 10.17513/use.37384
- Kostsova I.S., Lysenkova A.I., Godun E.V. Durum wheat as a raw material for cereals industry. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovol'stviya = Bulletin of Mogilev State University of Food Science*. 2018;1(24):67-74. [in Russian] (Косцова И.С., Лысенкова А.И., Годун Е.В. Твердая пшеница как сырье для крупяной промышленности. *Вестник Могилевского государственного университета продовольствия*. 2018;1(24):67-74).
- Kovtunova N.A., Kovtunov V.V. The effect of the moisture availability rate on the productivity and nutritional value of sorghum crops. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2024;54(2):22-30. [in Russian] (Ковтунова Н.А., Ковтунов В.В. Влияние уровня влагообеспеченности на урожайность и питательную ценность сорговых культур. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2024;54(2):22-30). DOI: 10.26898/0370-8799-2024-2-3
- Malkanduev Kh.A., Shamurzaev R.I., Malkandueva A.Kh. The concept and requirements for quality wheat grains. *News of the Kabardin-Balkar Scientific Center of RAS*. 2022;6(110):203-216. [in Russian] (Малкандуев Х.А., Шамурзаев Р.И., Малкандуева А.Х. Понятие и требования к качеству зерна пшеницы. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2022;6(110):203-216). DOI: 10.35330/1991-6639-2022-6-110-203-216
- Özdoğan G., Gowen A. Identification of wheat kernel vitreousness by hyperspectral imaging: Comparing the Visible, Vis-NIR and SWIR range. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;235:110361. DOI: 10.1016/j.compag.2025.110361
- Pazin M.A. The dependence between yield and grain quality characteristics of spring wheat depending on climatic factors. *Vladimir Agricolist*. 2026;1(115):45-55. [in Russian] (Пазин М.А. Взаимосвязь между урожайностью и характеристиками качества зерна яровой пшеницы в зависимости от климатических факторов. *Владимирский земледelec*. 2026;1(115):45-55).
- Samofalova N.E., Dubinina O.A., Ilichkina N.P., Vasyushkina N.E. Productivity and quality of nowadays varieties of durum winter wheat selected by the SSI ARRIGC after I.G. Kalinenko. *Grain Economy of Russia*. 2013;(1):51-55. [in Russian] (Самофалова Н.Е., Дубинина О.А., Иличкина Н.П., Васюшкина Н.Е. Урожайность и качество современных сортов твердой озимой пшеницы селекции ГНУ ВНИИЗК им. И.Г. Калиненко. *Зерновое хозяйство России*. 2013;(1):51-55).
- Shakir S., Ahmad S., Sibte-Abbas M., Alotaibi N.M., Usman M., Yaqoob S. et al. Quality mapping of durum wheat germplasm as a tool for development of high quality pasta varieties. *Scientific Reports*. 2026;16(1):3760. DOI: 10.1038/s41598-025-33790-1
- Timoshenkova T.A., Vashchenko Yu.S. The influence of water availability conditions on the quality indicators of modern *Triticum aestivum* varieties in the steppe zone of the Orenburg region. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022;6(98):17-21. [in Russian] (Тимошенкова Т.А., Ващенко Ю.С. Влияние условий водообеспеченности на качественные показатели современных сортов *Triticum aestivum* в степной зоне Оренбургской области. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022;6(98):17-21). DOI: 10.37670/2073-0853-2022-98-6-17-21
- Vida G., Cséplő M., Rakszegi M., Bányai J. Effect of multi-year environmental and meteorological factors on the quality traits of winter durum wheat. *Plants (Basel)*. 2021;11(1):113. DOI: 10.3390/plants11010113
- Zhao W., Zhao X., Luo B., Bai W., Kang K., Hou P. Et al. Identification of wheat seed endosperm texture using hyperspectral imaging combined with an ensemble learning model. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;121:105398. DOI: 10.1016/j.jfca.2023.105398
- Zonal farming systems of Rostov Province for 2022–2026 (Zonalnye sistemy zemledeliya Rostovskoy oblasti na 2022–2026 gody). Rostov-on-Don: Federal Rostov Agricultural Scientific Center; 2022. [in Russian] (Зональные системы земледелия Ростовской области на 2022–2026 годы. Ростов-на-Дону: Федеральный Ростовский аграрный научный центр; 2022).

Информация об авторах

Ольга Алексеевна Дубинина, агроном, Аграрный научный центр «Донской», 347740 Россия, Зерноград, Научный городок, 3, dubinina.1881@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2768-4935>

Наталья Александровна Ковтунова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Аграрный научный центр «Донской», 347740 Россия, Зерноград, Научный городок, 3, n-beseda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0409-5855>

Анна Сергеевна Иванисова, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник, Аграрный научный центр «Донской», 347740 Россия, Зерноград, Научный городок, 3, kameneva.anka2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1466-250X>

Information about the authors

Olga A. Dubinina, Agronomist, Donskoy Agricultural Research Center, 3 Nauchny Gorodok, Zernograd 347740, Russia, dubinina.1881@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2768-4935>

Natalia A. Kovtunova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Donskoy Agricultural Research Center, 3 Nauchny Gorodok, Zernograd 347740, Russia, n-beseda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0409-5855>

Anna S. Ivanisova, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Researcher, Donskoy Agricultural Research Center, 3 Nauchny Gorodok, Zernograd 347740, Russia, kameneva.anka2016@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1466-250X>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.05.2026; одобрена после рецензирования 13.07.2026; принята к публикации 18.08.2026.
The article was submitted on 19.05.2026; approved after reviewing on 13.07.2026; accepted for publication on 18.08.2026.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья

УДК 633.14.324:004:12

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-09



Аспекты оптимизации селекционного процесса озимой мягкой пшеницы в Нижнем Поволжье

С. В. Лящева, Т. Б. Кулеватова, Л. Н. Злобина, А. И. Сергеева, А. Д. Заворотина

Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Светлана Витальевна Лящева, lyaschevasveta@yandex.ru

Актуальность. На современном этапе развития селекции усовершенствование методики отбора генотипов озимой мягкой пшеницы, сочетающих повышенную урожайность и высокое качество зерна, с помощью метода ортогональной регрессии является важным и перспективным.

Материалы и методы. Экспериментальным материалом служили 1622 линии озимой мягкой пшеницы, выращенные в контрольных питомниках первого года испытаний (КП-1, 4-я стадия селекционного процесса) в 2019–2021 гг. в севообороте лаборатории селекции и семеноводства озимой мягкой пшеницы ФАНЦ Юго-Востока. Стандартом был сорт 'Калач 60'. Предшественник – черный пар. Показатель седиментации оценивали по методике с использованием 2,0-процентного раствора додецилсульфата натрия (ДДС, $C_{12}H_{25}NaO_4S$) и 9,4-процентной молочной кислоты ($CH_3CH(OH)COOH$).

Результаты. Пределы варьирования и средние значения показателя ДДС-седиментации в 2019 г. составили 44–95 (51) мл, а урожайности 0,51–3,48 (2,87) т/га; в 2020 г. соответственно – 38–69 (55) мл и 1,67–6,73 (5,06) т/га; в 2021 г. – 44–90 (69) мл и 1,67–3,96 (2,97) т/га. Корреляция (r) между индексами в наборе генотипов во все годы исследования отсутствовала ($r = -0,175; 0,023; 0,144$). Методом ортогональной регрессии изучаемые линии разделили на группы по знаку нормализованных данных, получены графики их взаимозависимости, эллипсы рассеивания; учитывая эти факты, в годы изучения проведен отбор наиболее перспективных линий озимой мягкой пшеницы. Из 850 линий в 2019 г. отобрано 195, в 2020 г. из 619 – 158, в 2021 г. из 153 – 40 штук. Таким образом, во все годы индекс отбора составил около 25%, что в селекционном процессе считается стандартно оптимальным.

Заключение. Наиболее перспективными для дальнейшей селекционной работы линиями оказались линии: Жемчужина Поволжья//Саратовская 8/Губерния; Подруга/Арфа; Саратовская 17/Юмпа; Калач 60/Саратовская 8; Калач 60/Миссия; Lovrin 31/Жемчужина Поволжья.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., урожайность, показатель седиментации, ортогональная регрессия, эллипс рассеивания

Благодарности: работа выполнена согласно госзаданию: FSNM-2022-0003 «Создание и совершенствование системы видов и сортов (гибридов) сельскохозяйственных культур, адаптивных к абиострессорам и устойчивых к основным патогенам; сочетающих высокую потенциальную продуктивность с качеством урожая, с целью снижения экономических рисков в растениеводстве и повышения биоразнообразия в регионе».

Для цитирования: Лящева С.В., Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н., Сергеева А.И., Заворотина А.Д. Аспекты оптимизации селекционного процесса озимой мягкой пшеницы в Нижнем Поволжье. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):192-201. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-09

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o9

Optimization aspects in the process of winter bread wheat breeding in the Lower Volga region

Svetlana V. Lyashcheva, Tatyana B. Kulevatova, Lyudmila N. Zlobina, Anna I. Sergeeva, Antonina D. Zavorotina

*Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, Russia***Corresponding author:** Svetlana V. Lyashcheva, lyaschevasveta@yandex.ru

Background. At the current stage of plant breeding progress, improving the selection of winter bread wheat genotypes, combining increased yield and high grain quality, using the orthogonal regression method is important and promising.

Materials and methods. The experimental material included 1622 lines of winter bread wheat grown in the control nurseries of the first year of testing in 2019, 2020, and 2021. Cv. 'Kalach 60' served as the reference. The predecessor was bare fallow, and the seeding rate was 450 viable seeds per 1 m², with a plot size of 3 m². The sedimentation index was assessed using a 2.0% sodium dodecyl sulfate solution as a surfactant, and a 9.4% lactic acid solution. Correlation, variance, and orthogonal regression analyses were employed for statistical processing.

Results. Based on the use of the orthogonal regression method for analyzing yield and DDS sedimentation indices, the studied genotypes were divided into groups according to the sign of the normalized data. Graphs of their interdependence and scatter ellipses were obtained. These findings helped to identify the most promising winter wheat genotypes throughout the period of studies: in 2019, 195 genotypes were selected from the 850 tested ones (22.0%); in 2020, 158 from 619 (25.5%); and in 2021, 40 from 153 (25.5%). Thus, in all the years, the selection index was approximately 25%, which is considered the standard optimal selection index in the breeding process.

Conclusion. Using an improved orthogonal regression method for selecting winter bread wheat genotypes that combined high yield and high grain quality, based on the analysis of DDS sedimentation, the most promising lines for further breeding work were identified: Zhemchuzhina Povolzhya//Saratovskaya 8/Guberniya, Podruga/Arfa, Saratovskaya 17/Yumpa, Kalach 60/Saratovskaya 8, Kalach 60/Missiya, and Lovrin 31/Zhemchuzhina Povolzhya.

Keywords: *Triticum aestivum* L., yield, sedimentation index, orthogonal regression, scatter ellipse

Acknowledgments: the study was carried out under the state task: FSNM-2022-0003 "Development and improvement of a system of crop species and cultivars (hybrids) adaptable to abiostressors, resistant to major pathogens, and combining high potential productivity with crop quality in order to reduce economic risks in crop production and increase biodiversity in the region".

For citation: Lyashcheva S.V., Kulevatova T.B., Zlobina L.N., Sergeeva A.I., Zavorotina A.D. Optimization aspects in the process of winter bread wheat breeding in the Lower Volga region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):192-201. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o9

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Селекция высших растений является стратегическим процессом, призванным намного опережать свое время, чтобы соответствовать меняющимся потребностям общества. О необходимости вести селекцию сельскохозяйственных культур на научной основе говорил еще великий биолог Н. И. Вавилов, когда характеризовал ее как фундаментальную науку; в противном случае ее результативность будет минимальной. Выпущенные под его редакцией «Теоретические основы селекции» сыграли исключительную роль в формировании строго научных основ селекционного процесса (Lutova, 2005).

В связи с тем, что процесс отбора наилучших форм очень трудоемок и продолжителен во времени, а его значение для производства зерна в России незаменимо, оптимизация селекции на всех этапах является чрезвычайно актуальной (Pryanishnikov, 2016). Одной из задач является разработка методологии поиска и идентификации наиболее важных для селекционера генов и полигенных систем (Rigin, 2005). Развитие теоретических основ селекции является важной задачей на современном этапе ее развития. В связи с этим вопросы изучения взаимодействия «генотип × среда» занимают одно из центральных мест в развитии теории адаптивной селекции, поскольку такие взаимосвязи разнообразны и сложны как по характеру, так и по степени проявления (Syukov, Menibaev, 2015; Pryanishnikov, Savchenko, 2017; Pryanishnikov et al., 2018). Ученые стремятся к отбору таких генотипов, для которых влияние данного взаимодействия минимально. В процессе селекции любой сельскохозяйственной культуры, в том числе и озимой пшеницы, исследователи должны учитывать значительное количество признаков, характеризующих как растение в целом, так и зерновку (Rybas et al., 2024; Sukhorukov et al., 2024). Эти признаки описываются еще большим количеством показателей, имеющих математическую выраженность, что ведет к представлению генотипа в виде определенной системы (Petrova, Egorov, 2009). Обычно только небольшое количество индексов показывает высокосignификантную корреляцию их между собой. В то же время необходимо напомнить, что любая доказанная математическая связь должна находить удовлетворительное биологическое истолкование или хотя бы не противоречить смыслу явления. По мнению В. А. Драгавцева (Dragavtsev, 2005, с. 24), надо понимать «под сложным полигенным признаком мерный, или счетный признак, обнаруживающий эффект взаимодействия генотип-среда от года к году в одной географической точке или от точки к точке внутри некоторого географического региона».

В исследованиях, связанных с селекцией на качественные показатели озимой мягкой пшеницы, имеется потребность в быстрых методах, работающих с минимальными навесками экспериментального материала (Fadeeva et al., 2020). Таким методом является седиментационный, с использованием поверхностно-активного вещества (ПАВа) додецилсульфата натрия (ДДС), так как использование показателя такого исследования для оценки качества зерна озимой мягкой пшеницы является высокоинформативным (Kulevatova et al., 2021). Суть седиментационного анализа в селекции озимой мягкой пшеницы – это определение качества и количества белка в зерне, а следовательно его хлебопекарной ценности, путем измерения скорости оседания частиц шрота в растворе уксусной кислоты с использованием поверхностно-активного вещества додецилсульфата на-

трия, что позволяет оценить набухаемость, а также кинетику агломерации белковых молекул (Kibkalo, 2022).

На биометрические методы, используемые для выявления различий на фенотипическом уровне, в частности на ортогональную регрессию, приходится задача по обоснованию количественной выраженности признаков и генетической составляющей адаптивности сортообразцов в их ответе на многомерность факторов окружающей среды (Zhuchenko, 2001; Pryanishnikov et al., 2018; Karakotov et al., 2021). Необходимо выбрать ортогональные признаки: фоновый (ФП) и селекционный (СП), которые меняются под воздействием внешнего фактора. Системы координат СП-ФП позволяют быстро, без смены поколений, идентифицировать генотип по фенотипу (Dragavtsev, 2005). С выходом на эти признаки и последующим их детальным анализом выявляются индивидуальные растения или отдельные биотипы. Данный подход позволяет оценить распределение событий внутри их совокупности на основе инерционности относительно центра тяжести анализируемой выборки (Pryanishnikov et al., 2018).

Цель настоящего исследования – усовершенствовать методику отбора генотипов озимой мягкой пшеницы, сочетающих повышенную урожайность и высокое качество зерна (на основе анализа показателя ДДС-седиментации), с помощью метода ортогональной регрессии.

Материалы и методы

Экспериментальным материалом для изучения служили 1622 линии озимой мягкой пшеницы, выращенные в контрольных питомниках первого года испытаний (КП-1, 4-я стадия селекционного процесса) в 2019–2021 гг. в севообороте лаборатории селекции и семеноводства озимой мягкой пшеницы Федерального аграрного научного центра Юго-Востока, г. Саратов (КП-1 2019 г. – 850 линий, КП-1 2020 г. – 619 линий, КП-1 2021 г. – 153 линии). Отбор материала в КП-1 проводили на основе визуальных оценок делянок и зерна, а также количественного учета урожайности, показателей «натурная масса зерна» и «масса 1000 зерен».

Стандартным сортом выступал 'Калач 60'. Сорту обладает раннеспелостью, хорошими хлебопекарными свойствами, адаптивен к острой засухе, дает стабильно высокие урожаи на фоне естественного плодородия. Предшественник – черный пар, норма высева составляла 450 всхожих зерен на 1 м²; площадь делянки в КП-1 – 3 м². Посев проводили в оптимальные для озимой мягкой пшеницы сроки, всходы были получены в течение 7 дней. Полевые наблюдения осуществляли согласно «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур» (Methodology of the state variety trials..., 2019).

Нижнее Поволжье характеризуется умеренно континентальным климатом. Зимний период 2018/2019 г. отличался высоким снежным покровом, сохранившимся в течение девяти декад, и аномально теплым температурным режимом без промерзания почвы. Зимой 2019/2020 г., наоборот, отмечалось промерзание почвы до 60 см в сочетании с невысоким, по сравнению со среднесезонными данными, снежным покровом (до 18 см). Наблюдался ранний переход к весеннему отращиванию и растянутый период кущения. Условия перезимовки 2020/2021 г. в целом сложились благоприятно: минимальная среднесуточная температура составила –13,2°C; максимальная глубина промерзания почвы – 60 см; максимальная высота снежного покрова – 35 см.

Такие условия позволили растениям озимых культур перейти к интенсивному весеннему кущению и сформировать высокую вегетативную массу, превысив среднесуточные показатели на 22,4%. Статистически значимых различий между изучавшимися линиями озимой пшеницы по зимостойкости не было выявлено. Погодные условия в годы проведения эксперимента значительно различались в весенне-летний период (табл. 1).

личины показателей безразмерными и дает возможность сравнивать их друг с другом. По оси x откладывали показатель ДДС-седиментации, по оси y – урожайность. Для полного анализа выборки образцов данные группировали относительно 1σ , 2σ и более 2σ . Отбор проводили, учитывая максимальные положительные сдвиги ($++$) по обоим изучаемым признакам и расположение форм в наиболее выгодном для селекционера сегменте графика

Таблица 1. Количество осадков и температура воздуха за период весенне-летней вегетации растений озимой пшеницы в сравнении с многолетними данными (2019–2021 гг.)

Table 1. The amount of precipitation and air temperature in the spring-summer growing seasons of winter wheat plants, compared with the long-term mean data (2019–2021)

Год изучения	Месяц					
	май			июнь		
	температура, °C	осадки, мм	ГТК	температура, °C	осадки, мм	ГТК
2019	18,5	34,3	0,6	22,8	21,0	0,3
2020	14,9	48,0	1,1	20,2	81,0	1,3
2021	18,8	38,2	0,7	21,8	75,0	1,1
среднемультилетнее	15,0	42,9	0,92	20,2	45,0	0,74

Чем сильнее различаются погодные условия в период вегетации озимой мягкой пшеницы, тем больше оснований у ученого распространить полученные выводы исследования на более обширный селекционный материал. Согласно ГТК (гидротермический коэффициент Селянинова), 2019 год можно охарактеризовать как засушливый, а 2020 – как год обеспеченного увлажнения. Что касается 2021 г., то май был засушливым, в то время как июнь имел обеспеченное увлажнение.

Показатель седиментации оценивали по методике с использованием 2,0-процентного раствора додецилсульфата натрия (DDC , $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{NaO}_4\text{S}$) и 9,4-процентной молочной кислоты ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$) (Bebyakin et al, 1987). Применяли методы статистического анализа данных: корреляционный, дисперсионный (Dospikhov, 1985) и ортогональной регрессии (Petrova, Chajko, 2008; Karakotov et al., 2021).

Известно, что в методе ортогональной регрессии за единицу измерения принимается величина стандартного отклонения (σ) к средней в совокупной выборке (Petrova, Chajko, 2008). Данный подход позволяет одновременно учесть стохастический характер обеих переменных, таких как показатель седиментации (x) и урожайность (y), и используется для оценки конфигурации корреляционного поля. В самом простом случае, когда переменные x и y являются статистически независимыми, граница соответствующего корреляционного поля может быть описана эллипсом рассеяния, который занимает наибольший возможный объем, а это соответствует нулевому значению коэффициента корреляции и максимальной неопределенности при прогнозировании. При увеличении коэффициента корреляции степень неопределенности снижается, и соответствующий эллипс все более вытягивается вдоль главной оси. Известно, что по уравнению эллипсоида можно однозначно восстановить уравнение его осей. При этом главная ось эллипса будет совпадать с линией ортогональной регрессии.

В настоящей работе проводили «нормализацию данных» (Petrova, Egorov, 2009) – прием, который делает ве-

ков ортогональной регрессии (наибольшая количественная выраженность изучаемых признаков).

Результаты и обсуждение

Пределы варьирования показателя ДДС-седиментации и урожайности у селекционных линий в КП-1 2019 года составили 44–95 мл и 0,51–3,48 т/га соответственно; в КП-1 2020 г. – 38–69 мл и 1,67–6,73 т/га; в КП-1 2021 г. – 44–90 мл и 1,67–3,96 т/га.

У сорта-стандарта ('Калач 60') в течение ряда предыдущих лет (2014–2017) системно выявлялась обратная корреляция между урожаем зерна и его качеством. В рамках наших исследований наибольшую урожайность он показал в 2020 г., наименьшую – в 2019 г. Что же касается показателя ДДС-седиментации, то высокие значения выявлены в 2019 г., низкие – в 2021 г. (табл. 2).

Корреляция (r) между изучаемыми признаками у тестируемых линий во все годы исследования отсутствовала. В связи с этим был использован метод ортогональной регрессии для отбора форм, сочетающих повышенные значения обоих изучаемых признаков, в последующие селекционные питомники (КП-2). За единицу измерения переменных приняты величины, нормализованные через стандартное отклонение (σ), что позволяет количественно охарактеризовать реакцию растений на воздействие внешних факторов.

В результате нормализации данных получаются как отрицательные (-1σ), так и положительные ($+1\sigma$) значения по анализируемым признакам, что позволяет при использовании логической формулы группировать их по направленности отклонений («+» или «-»). Таким образом, изучаемые линии были разделены на группы по знаку нормализованных данных урожайности и показателя ДДС-седиментации (табл. 3).

К рассчитанным данным применили метод ортогональной регрессии, графическая визуализация результатов которого по годам (рис. 1, 2, 3) позволила провести отбор линий, оптимально сочетающих оба изучаемых

Таблица 2. Характеристика селекционного материала КП-1 по показателю ДДС-седиментации и урожайности в сравнении со стандартным сортом**Table 2. Characterization of the breeding material (control nursery, 1st year) according to the DDS sedimentation index and yield, compared with the reference**

Год урожая	Селекционные линии				Стандарт 'Калач 60'			
	количество	$\bar{X}$		r	количество	$\bar{X}$		r
		урожайность (т/га)	показатель ДДС-седиментации (мл)			урожайность (т/га)	показатель ДДС-седиментации (мл)	
2019	850	2,87	51	-0,175	49	2,29	60	-0,273
2020	619	5,06	55	0,023	38	4,61	50	0,303
2021	153	2,97	69	-0,217	7	3,61	43	0,144

Таблица 3. Группировка линий по знаку нормализованных данных показателя ДДС-седиментации и урожайности**Table 3. Grouping of the lines by the sign of normalized data for the DDS sedimentation index, and yield**

Год	Группы по знаку нормализованных данных			
	++	+-	-+	--
2019	195	238	243	174
2020	158	161	144	158
2021	40	43	37	33

Примечание: «++ / --» – положительный / отрицательный сдвиг по двум признакам; «+-» – положительный сдвиг по седиментации, отрицательный сдвиг по урожайности; «-+» – отрицательный сдвиг по седиментации, положительный сдвиг по урожайности

Note: “++ / --” – positive / negative shift in two characteristics; “+-” – positive shift in sedimentation, and negative shift in yield; “-+” – negative shift in sedimentation, and positive shift in yield

показателя (урожайность и показатель ДДС-седиментации).

Внутренний овал на графиках (см. рис. 1, 2, 3) ограничивает совокупность линий с данными $0 < x < 1\sigma$. Внешний овал совпадает с 2σ . В области между овалами заключены линии, значения показателей которых соответствуют $1\sigma < x < 2\sigma$. За пределами внешнего овала располагается область значений более 2σ .

В данной работе отбор в селекционных питомниках (КП-1) проводили, учитывая распределение данных в секторе ++ графиков ортогональной регрессии. Получено, что в 2019 г. в предел от 0 до 1σ попадают 75 линий, в предел от 1σ до 2σ – 91 линия, предел более 2σ включает 29 линий; в 2020 г. эти цифры составляют соответственно 58, 73, 27; в 2021 – 15, 23, 2. По абсолютному значению признака «урожайность» наиболее благоприятным был 2020 г., за ним следует 2021, затем 2019. Что же касается показателя ДДС-седиментации, то здесь наблюдаем другое ранжирование лет: 2021 (1); 2019 (2) и 2020 (3). Как и следовало ожидать, в выявленных группах линий наблюдаются высокосignимые коэффициенты корреляции между изучаемыми признаками; исключение составляют линии 2021 г., когда в группу попадает менее 20 линий (табл. 4).

В 2019 г. из 850 линий выявили 195 наиболее перспективных (пределы варьирования урожайности – 2,26–3,42 т/га [$x = 2,58$]; ДДС-седиментации – 67–87 [$x = 72$]), что составило 22,9%; в 2020 г. из 619 – 158 (25,5%), при этом пределы варьирования урожайности – 4,20–6,73 т/га ($x = 4,87$), ДДС-седиментации – 55–69 мл ($x = 59$); в 2021 г. из 153 отобрано 40 линий (26,1%), пределы варьирования урожайности – 3,00–4,32 ($x = 3,45$), показателя ДДС-седиментации – 69–90 ($x = 75$).

Наиболее строгий отбор выявил наилучшее сочетание показателей урожайности и ДДС-седиментации в КП-1 2019 г. у линий 715 (Жемчужина Поволжья//Саратовская 8/Губерния); 884 (Подруга/Арфа); 917 (Саратовская 17/Юмпа); в КП-1 2020 г. – у линий 738 (Калач 60/Саратовская 8); 750 (Калач 60/Миссия); 855 (Lovrin 31/Жемчужина Поволжья). В КП-1 2021 г. таких линий не выявлено. У выбранных линий наблюдаются максимальные положительные сдвиги (++) по обоим изучаемым признакам; они расположены в центральной части сегмента графиков ($> 2\sigma$) ортогональной регрессии. Отобранный материал в настоящее время уже подтвердил свою перспективность при изучении его в КП-2 (контрольный питомник второго года изучения, пятая стадия селекционного процесса) (табл. 5).



Рис. 1. График ортогональной регрессии урожайности (т/га) и показателя ДДС-седиментации (мл) в КП-1, 2019 год

Fig 1. Graph of orthogonal regression for the yield (t/ha) and DDS sedimentation rate (mL) in the first-year control nursery (2019)

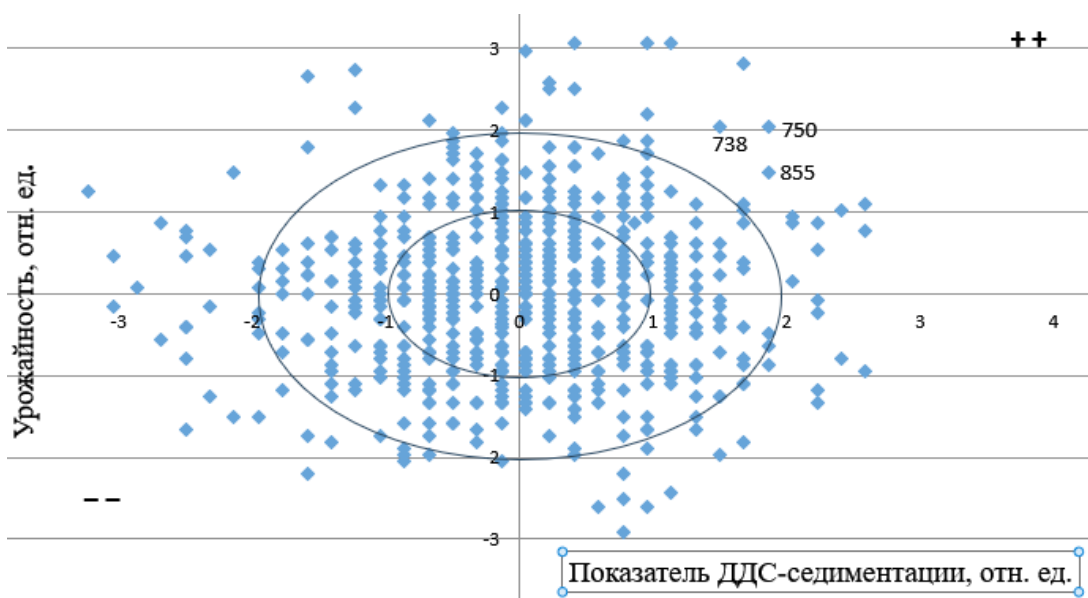


Рис. 2. График ортогональной регрессии урожайности (т/га) и показателя ДДС-седиментации (мл) в КП-1, 2020 год

Fig. 2. Graph of orthogonal regression for the yield (t/ha) and DDS sedimentation rate (mL) in the first-year control nursery (2020)

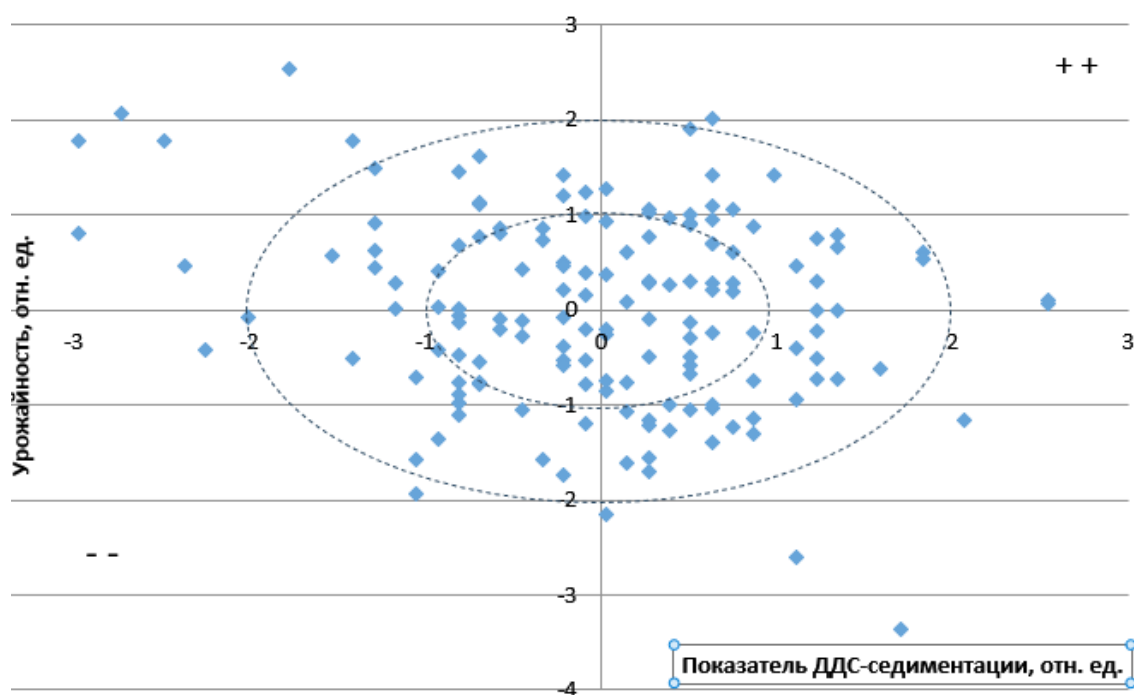


Рис. 3. График ортогональной регрессии урожайности (т/га) и показателя ДДС-седиментации (мл) в КП-1, 2021 год

Fig. 3. Graph of orthogonal regression for the yield (t/ha) and DDS sedimentation rate (mL) in the first-year control nursery (2021)

Таблица 4. Характеристика отобранных линий в КП-1 по показателю ДДС-седиментации и урожайности

Table 4. Characterization of the lines selected in the first-year control nursery according to their DDS sedimentation index, and yield

Год урожая	Фрагмент сектора графика	Количество линий	Урожайность (т/га)			Показатель ДДС-седиментации (мл)			r
			min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$	
2019	0 <	75	2,26	2,67	2,41	67	74	69	-0,33**
	1σ <	91	2,27	3,08	2,65	67	81	73	-0,71**
	x > 2σ	29	2,31	3,42	2,85	67	87	78	-0,77**
2020	0 <	58	4,20	4,93	4,50	55	59	57	-0,31*
	1σ <	73	4,20	5,67	4,87	55	64	59	-0,65**
	x > 2σ	27	4,27	6,73	5,66	55	69	62	-0,76**
2021	0 <	15	3,02	3,59	3,24	69	75	72	-0,24
	1σ <	23	3,00	4,25	3,57	69	90	76	-0,69**
	x > 2σ	2	3,03	4,32	3,68	74	90	82	-

Примечание: *, ** – взаимосвязь достоверна соответственно на 5- и 1-процентном уровнях

Note: * and ** – the interrelationship is statistically significant at the 5% and 1% levels, respectively

Таблица 5. Характеристика перспективных линий озимой мягкой пшеницы, отобранных с помощью метода ортогональной регрессии**Table 5. Characterization of promising winter bread wheat lines selected by using the orthogonal regression method**

Год отбора	Линия	Урожайность		Показатель ДДС-седиментации		Год	Урожайность		Показатель ДДС-седиментации	
		т/га	%	мл	%		т/га	%	мл	%
		В год отбора в КП-1					В КП-2			
2019	Жемчужина Поволжья// Саратовская 8/ Губерния	2,92	127,5	79	131,7	2021	3,66	104,6	80	125,0
	Подруга/Арфа	2,95	128,8	81	135,0		3,80	108,6	84	131,3
	Саратовская 17/Юмпа	3,06	133,6	82	136,7		3,91	111,7	84	131,3
2020	Калач 60/ Саратовская 8	6,73	146,0	61	122,0	2022	5,30	108,2	69	119,0
	Калач 60/Миссия	5,87	127,3	65	130,0		5,08	103,7	72	124,1
	Lovrin 31/Жемчужина Поволжья	6,53	141,6	61	122,0		4,90	100,0	71	122,4

Примечание: % – относительное значение признака по сравнению со стандартным сортом 'Калач 60' в процентах

Note: % – relative value of the character compared to the reference 'Kalach 60' as a percentage

Заключение

Применив метод ортогональной регрессии к анализу обширного селекционного материала (1622 линии) КП-1 – контрольного питомника первого года изучения, урожая 2019, 2020 и 2021 г., нам удалось изучаемые линии озимой пшеницы разделить на группы по знаку нормализованных данных и провести отбор наиболее перспективных, у которых наблюдается высокосвязная корреляция между урожайностью и показателем ДДС-седиментации. Достижение такой взаимосвязи в опыте является одним из доказательств правильности выбора биометрического метода для использования в селекционном процессе. К преимуществам данного подхода можно отнести графическую визуализацию результатов работы, что облегчает процедуру оптимального отбора из большого количества образцов в наиболее значимом для селекционера секторе графика. В нашей работе это правый верхний сектор с обоими положительными знаками у изучаемых показателей (++). При этом наибольшие сдвиги получены в фрагменте данного сектора, находящемся за пределом более 2σ , куда попадает от 23,53 до 39,87% линий сектора, или от 5,18 до 10,18% от общего числа изученных линий.

Таким образом, нами была усовершенствована методика отбора генотипов озимой мягкой пшеницы, сочетающих повышенную урожайность и высокое качество зерна (на основе показателя ДДС-седиментации), с помощью метода ортогональной регрессии. Это открывает новые возможности в селекции озимой мягкой пшеницы, так как позволяет быстро анализировать огромные массивы математических данных, характеризующих различные признаки, получать высокосвязные коэффициенты корреляции изучаемых индексов в отобранных группах образцов, в итоге ускоряя создание сортов с за-

данными параметрами. Во все годы изучения процент отбора составил около 25, что в селекционном процессе считается традиционно оптимальным. Более жесткий целенаправленный отбор по двум признакам сокращает объем селекционного материала дополнительно в 2,3–4,8 раза.

References / Литература

- Bebyakin V.M., Buntina M.V., Vasilchuk N.S. The effectiveness of SDS-sedimentation and mixographic assessments in testing the grain quality of spring durum wheat (Effektivnost SDS-sedimentatsionnoy i miksograficheskoy otse-nok pri testirovanii kachestva zerna yarovoy tverdoy pshe-nitsy). *Agrarian Science*. 1987;(7):65-70. [in Russian] (Бебякин В.М., Бунтина М.В., Васильчук Н.С. Эффективность SDS-седиментационной и миксографической оценок при тестировании качества зерна яровой твердой пшеницы. *Аграрная наука*. 1987;(7):65-70).
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki rezultatov issledovaniy]). 5th ed. Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. Москва: Агропромиздат; 1985).
- Dragavtsev V.A. A new method of genetic analysis of polygenic quantitative characteristics in plants (Novy metod geneticheskogo analiza poligennykh kolichestvennykh priznakov rasteniy). In: *Identified Plant Genetic Diversity and Breeding (Identifitsirovanny genofond rasteniy i selektsiya)*. St. Petersburg; 2005. p.20-35. [in Russian] (Драгавцев В.А. Новый метод генетического анализа полигенных количественных признаков расте-

- ний. В кн.: Идентифицированный генофонд растений и селекция. Санкт-Петербург. 2005. С.20-35).
- Fadeeva I.D., Gazizov I.N., Khakimova A.G., Mitrofanova O.P. Source material for breeding winter bread wheat in the north of the Middle Volga region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(4):71-82. [in Russian] (Фадеева И.Д., Газизов И.Н., Хакимова А.Г., Митрофанова О.П. Исходный материал для селекции озимой мягкой пшеницы на севере Среднего Поволжья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(4):71-82). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-4-71-82
- Karakotov S.D., Pryanishnikov A.I., Kosolapov V.M., Zotikov V.I., Titarenko A.V., Polushkin P.V. et al. Methodological approaches for winter wheat varieties estimating in the JSC Schelkovo Agrokhim environmental test system. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2021;(1):9-15. [in Russian] (Караколов С.Д., Прянишников А.И., Косолапов В.М., Зотиков В.И., Титаренко А.В., Полушкин П.В. и др. Методологические подходы оценки сортов озимой пшеницы в системе экологических испытаний АО «Щелково Агрохим». *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2021;(1):9-15). DOI: 10.30850/vrsn/2021/1/9-15
- Kibkalo I. Effectiveness of and perspectives for the sedimentation analysis method in grain quality evaluation in various cereal crops for breeding purposes. *Plants (Basel)*. 2022;11(13):1640. DOI: 10.3390/plants11131640
- Kulevatova T.B., Lyasheva S.V., Zlobina L.N., Andreeva L.V. Estimation features of winter bread wheat quality by the method of sedimentation analysis. *Grain Economy of Russia*. 2021;5(77):51-56. [in Russian] (Кулеватова Т.Б., Лящева С.В., Злобина Л.Н., Андреева Л.В. Особенности определения качества озимой мягкой пшеницы методом седиментационного анализа. *Зерновое хозяйство России*. 2021;5(77):51-56). DOI: 10.31367/2079-8725-2021-77-5-51-56
- Lutova L.A. Preface (Predisloviye). In: *Identified Plant Genetic Diversity and Breeding (Identifitsirovanny genofond rasteniy i selektsiya)*. St. Petersburg; 2005. p.9-10. [in Russian] (Лутова Л.А. Предисловие. В кн.: Идентифицированный генофонд растений и селекция. Санкт-Петербург. 2005. С.9-10).
- Methodology for the state crop variety trials. First issue. General provisions (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vypusk pervy. Obshchaya chast). Moscow: Gossortkomissiya; 2019. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск первый. Общая часть. Москва: Госсортокмиссия; 2019). URL: https://gossortrf.ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf [дата обращения: 18.09.2025].
- Petrova N., Egorov S. Precise definition of the orthogonal analysis method in breeding of plants. *Molecular and Applied Genetics*. 2009;10:20-29. [in Russian] (Петрова Н.Н., Егоров С.В. Уточнение метода ортогонального анализа в селекции растений. *Молекулярная и прикладная генетика*. 2009;10:20-29).
- Petrova N.N., Chajko E.B. Identification of the genotype by phenotype using orthogonal analysis (Identifikatsiya genotipa po fenotipu metodom ortogonalnogo analiza). *Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2008;(2):19-25. [in Russian] (Петрова Н.Н., Чайко Е.Б. Идентификация генотипа по фенотипу методом ортогонального анализа. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2008;(2):19-25).
- Pryanishnikov A.I. Ecological fundamentals of adaptable winter wheat breeding in the Southeast (Ekologicheskiye osnovy adaptivnoy selektsii ozimoy pshenitsy na Yugo-Vostoke). Saratov; 2016. [in Russian] (Прянишников А.И. Экологические основы адаптивной селекции озимой пшеницы на Юго-Востоке. Саратов; 2016).
- Pryanishnikov A.I., Savchenko I.V. Algorithms of breeding programs for adaptability. *Legumes and Groat Crops*. 2017;4(24):24-33. [in Russian] (Прянишников А.И., Савченко И.В. Алгоритмы селекционных программ на адаптивность. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2017;4(24):24-33).
- Pryanishnikov A.I., Savchenko I.V., Mazurov V.N. Adaptive selection: theory and practice of selection for productivity. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2018;(3):29-32. [in Russian] (Прянишников А.И., Савченко И.В., Мазуров В.Н. Адаптивная селекция: теория и практика отбора на продуктивность. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2018;(3):29-32). DOI: 10.30850/vrsn/2018/3/29-32
- Rigin B.V. Introduction (Vvedeniye). In: *Identified Plant Genetic Diversity and Breeding (Identifitsirovanny genofond rasteniy i selektsiya)*. St. Petersburg; 2005. p.11-12. [in Russian] (Ригин Б.В. Введение. В кн.: Идентифицированный генофонд растений и селекция. Санкт-Петербург. 2005. С.11-12).
- Rybas I.A., Ivanisov M.M., Marchenko D.M., Kirin A.V. Influence of environmental conditions on the formation of yield of some winter wheat varieties. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2024;2(38):129-139. [in Russian] (Рыбась И.А., Иванисов М.М., Марченко Д.М., Киринов А.В. Влияние условий среды на формирование урожайности сортов озимой пшеницы. *Таврический вестник аграрной науки*. 2024;2(38):129-139). DOI: 10.5281/zenodo.12200256
- Sukhorukov A.A., Bugakova N.E., Belyaeva M.V., Menibaev A.I. Evaluation of source material for breeding common winter wheat in the south of the Samara region. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Agricultural Sciences*. 2024;3(4):27-35. [in Russian] (Сухоруков А.А., Бугакова Н.Э., Беляева М.В., Менибаев А.И. Оценка исходного материала для селекции озимой мягкой пшеницы в условиях юга Самарской области. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Сельскохозяйственные науки*. 2024;3(4):27-35).
- Syukov V., Menibaev A. Ecological plant breeding: types and practice (review). *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;17(4-3):463-466. [in Russian] (Сюков В.В., Менибаев А.И. Экологическая селекция растений: типы и практика (обзор). *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015;17(4-3):463-466).
- Zhuchenko A.A. Adaptable plant breeding system (ecogenetic fundamentals). Vol. 1 (Adaptivnaya sistema selektsii rasteniy [ekologo-geneticheskiye osnovy]. T. 1). Moscow: RUDN University; 2001. [in Russian] (Жученко А.А. Адаптивная система селекции растений (эколого-генетические основы). Т. 1. Москва: РУДН; 2001).

Информация об авторах

Светлана Витальевна Лящева, кандидат сельскохозяйственных наук, руководитель селекционного центра, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, lyaschevasveta@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6790-0770>

Татьяна Борисовна Кулеватова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, tanjakulevatova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9564-7127>

Людмила Николаевна Злобина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, L9172193438@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3866-8060>

Анна Ильинична Сергеева, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, a.sergeeva1977@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3697-7660>

Антонина Дмитриевна Заверотина, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, antoninazavorotina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0092-8481>

Information about the authors

Svetlana V. Lyashcheva, Cand. Sci. (Agriculture), Head of the Breeding Center, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, lyaschevasveta@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6790-0770>

Tatyana B. Kulevatova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, tanjakulevatova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9564-7127>

Lyudmila N. Zlobina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, L9172193438@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3866-8060>

Anna I. Sergeeva, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, a.sergeeva1977@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3697-7660>

Antonina D. Zavorotina, Senior Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, antoninazavorotina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-0092-8481>

Вклад авторов: Лящева С. В. – 30%; Кулеватова Т. Б. – 30%; Злобина Л. Н. – 15%; Сергеева А. И. – 15%; Заверотина А. Д. – 10%.

Contribution of the authors: Lyasheva S. V. – 30%; Kulevatova T. B. – 30%; Zlobina L. N. – 15%; Sergeeva A. I. – 15%; Zavorotina A. D. – 10%.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.11.2025; одобрена после рецензирования 08.06.2026; принята к публикации 06.07.2026.
The article was submitted on 19.11.2025; approved after reviewing on 08.06.2026; accepted for publication on 06.07.2026.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 631.527:634.11
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-011



Выделение доноров сниженного биосинтеза этилена среди образцов яблони генетической коллекции ФАНЦА с использованием ДНК-маркеров MD-ACO1 и MD-ACS1

Е. С. Троско^{1,2}, А. М. Колтунова¹, Ю. С. Гунина², М. Г. Куцев¹

¹ Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

² Федеральный Алтайский научный центр агrobiотехнологий, Барнаул, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Сергеевна Троско, nord-hmel@mail.ru

Актуальность. Получение высокозимостойких генотипов яблони с продолжительным сроком хранения плодов – одно из важнейших направлений селекции яблони в условиях Сибири. Несмотря на наличие в мировом сорimente образцов с генетически обусловленным сниженным биосинтезом этилена ('Fuji', 'Gala'), использование их в селекционных программах северных зон садоводства затруднено в связи с их низкой зимостойкостью. Следовательно, необходимо выявление доноров сниженного биосинтеза этилена в коллекциях яблони в регионе осуществления селекционной программы.

Материалы и методы. С использованием олигонуклеотидов Md-ACS1 и Md-ACO1 изучены 34 образца яблони из генетической коллекции Научно-исследовательского института садоводства Сибири им. М.А. Лисавенко Федерального Алтайского научного центра агrobiотехнологий (г. Барнаул). Выделение тотальной ДНК осуществляли коммерческим набором Diamond DNA Plant kit (ООО «Алтайбиотех», Россия) по протоколу производителя.

Результаты. Анализ аллельного полиморфизма гена *Md-ACO1* в исследованных образцах показал неравномерное распределение, в выборке доминировал гетерозиготный генотип 1/2 (100%). Выявлено преобладание гомозиготного генотипа *Md-ACS1* 1/1 в изученных образцах (91,4%). Гетерозиготный генотип 1/2 встречался значительно реже (8,6%), в то время как гомозиготный генотип 2/2 полностью отсутствовал.

Заключение. Выявлены образцы, несущие аллельные состояния, кодирующие сниженный синтез этилена. Сорта 'Алтайское Пурпуровое', 'Алтайское Юбилейное', 'Wealthy' и 'Mantet', а также сеянец Co-99-2981 (*Md-ACS1* 1/2) рекомендованы для дальнейшей селекции, направленной на получение высокозимостойких сортов яблони с длительным потенциалом хранения плодов.

Ключевые слова: аллельное состояние, генотипирование, гены *Md-ACS1* и *Md-ACO1*, гибриды, молекулярные маркеры, селекция яблони

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FNUG-2024-0004 «Создание адаптивных сортов плодовых, ягодных и декоративных культур с комплексом хозяйственно ценных признаков, пригодных для возделывания в условиях Западной Сибири», а также по Программе развития Алтайского государственного университета на 2021–2030 гг. – проект «ДНК-маркеры хозяйственно ценных, редких и исчезающих видов растений» (А. М. Колтунова).

Для цитирования: Троско Е.С., Колтунова А.М., Гунина Ю.С., Куцев М.Г. Выделение доноров сниженного биосинтеза этилена среди образцов яблони генетической коллекции ФАНЦА с использованием ДНК-маркеров MD-ACO1 и MD-ACS1. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):202-217. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-011

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o11

Identifying donors of reduced ethylene biosynthesis among apple-tree accessions in the genetic collection of the Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies using the MD-ACO1 and MD-ACS1 molecular markers

Elena S. Trosko^{1,2}, Anastasia M. Koltunova¹, Julia S. Gunina², Maksim G. Kutsev¹¹ Altai State University, Barnaul, Russia² Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, Barnaul, Russia

Corresponding author: Elena S. Trosko, nord-hmel@mail.ru

Background. Obtaining highly winter-hardy apple-tree genotypes with a long fruit shelf life is a key goal for breeders, especially for Siberia's harsh climate. Despite the availability of cultivars with reduced ethylene biosynthesis ('Fuji' or 'Gala'), their utilization in northern regions is restricted by their low winter hardiness. Thus, identifying regional genotypes with low ethylene production is crucial for breeding programs aimed at improving the fruit storage potential without losing cold tolerance.

Materials and methods. Genetic polymorphism of the *Md-ACS1* and *Md-ACO1* genes (ethylene biosynthesis enzymes) was studied in 34 apple accessions from the genetic collection of the Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies (Barnaul). Total DNA was extracted using a commercial Diamond DNA Plant kit (Altaibiotech, Russia) per the manufacturer's protocol. PCR amplification used specific primers targeting the *Md-ACS1* and *Md-ACO1* gene regions.

Results. Analyzing the *Md-ACO1* allelic polymorphism revealed an uneven genotype distribution: the heterozygous genotype 1/2 prevailed, accounting for 100% of the accessions, while homozygous genotypes were absent. Conversely, *Md-ACS1* showed predominance of the homozygous genotype 1/1 (91.4%), while heterozygous 1/2 was rare (8.6%), and homozygous 2/2 was not detected.

Conclusion. Identifying genotypes with allelic configurations linked to reduced ethylene biosynthesis is an important breeding step. Cvs. 'Altayskoye Purpurovoye', 'Altayskoye Yubileynoye', 'Mantet', and 'Wealthy', and the open-pollinated seedling Co-99-2981 (all featuring the *Md-ACS1* genotype 1/2) are recommended for further research and breeding. These accessions hold potential for developing highly winter-hardy apple-tree cultivars with extended post-harvest fruit shelf life, thereby improving apple production in Siberia and other northern regions with extreme climate conditions.

Keywords: allelic state, genotyping, *Md-ACS1* and *Md-ACO1* genes, hybrids, molecular markers, apple-tree breeding

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task, Project No. FNUG-2024-0004 "Development of adaptable fruit, berry and ornamental crop cultivars with a set of valuable agronomic traits suitable for cultivation under the conditions of Western Siberia", and the Development Program of Altai State University for 2021–2030, Project "DNA markers of economically valuable, rare and endangered plant species" (A. M. Koltunova).

For citation: Trosko E.S., Koltunova A.M., Gunina J.S., Kutsev M.G. Identifying donors of reduced ethylene biosynthesis among apple-tree accessions in the genetic collection of the Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies using the MD-ACO1 and MD-ACS1 molecular markers. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):202-217. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o11

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Сохранение качества яблок в послеуборочный период остается одной из ключевых проблем современного садоводства, особенно в регионах с экстремальными климатическими условиями, таких как Сибирь.

Яблоки относятся к климактерическим плодам и способны к послеуборочному дозреванию. В связи с этим процесс размягчения плодовой мякоти представляет собой физиологически необратимый этап созревания, причем избыточная интенсивность данного процесса приводит к сокращению периода хранения и ухудшению вкусовых качеств плодов (Barry, Giovannoni, 2007).

Для увеличения срока хранения применяют РГС-хранение (регулируемая газовая среда) и обработку химическими веществами, однако все это приводит к увеличению стоимости товара и является скорее дополнением к сортоспецифичным срокам хранения. В связи с этим наиболее перспективно использование сортов яблони с естественно низким уровнем этилена на всех этапах созревания и хранения, так как лежкость плодов напрямую зависит от активности биосинтеза данного гормона (Dulov, Shamshin, 2025).

Получение сортов с длительным сроком хранения плодов – одно из важнейших направлений селекции яблони в условиях Сибири. В районированном сорimente Сибири практически отсутствуют «зимние» сорта яблони с плодами позднего и очень позднего сроков созревания (120 и более дней от фенофазы «цветение» до фенофазы «съемная зрелость»). Для потребления в позднеосенний период используют сорта яблони осеннего срока созревания с некоторым потенциалом хранения (плоды этих сортов лежат без потери качества два-три месяца). В связи с тем, что климатическим условиям юга Западной Сибири свойственна ярко выраженная континентальность с коротким безморозным периодом, возделывание инорайонных «зимних» сортов яблони, имеющих более длительный вегетационный период, ограничено. Основной метод решения проблемы отсутствия сортов яблони «зимних» сортов в Сибири – селекционный (Sedov, Ogoltsova, 1999; Usenko, Puchkin, 2011).

За почти 100 лет селекционерами в лесостепной зоне (г. Барнаул) и низогорье Алтая (г. Горно-Алтайск) создано 29 летних, 20 осенних и 18 позднеосенних сортов яблони, последние поколения которых составляют основной сортимент юга Западной Сибири. Несмотря на то что почти треть сортов представлена позднеосенними формами, большая часть из них получена на Горно-Алтайской станции и не является достаточно зимостойкой в лесостепной зоне Алтайского края и других областях юга Западной Сибири (например, Новосибирской, Томской и Кемеровской). Для дифференциации почек, подготовки к зиме и прохождения своевременной закали тканей яблоне в Сибири требуется длительный послеуборочный период, недостаточность или отсутствие которого у позднеосенних сортов может значительно снизить зимостойкость дерева. Таким образом, создание высокозимостойких сортов осеннего срока созревания с длительными сроками хранения необходимо для пополнения районированного сортимента яблони в Сибири.

Большинство сортов районированного сортимента юга Западной Сибири являются гибридами, полученными от прямых и обратных скрещиваний сибирской яблони (*Malus baccata* (L.) Borkh.) и яблони домашней (*M. × domestica* Borkh.) в том или ином поколении (F),

называемыми в помологии «полукультурками» или «полусибами». Лишь некоторые сорта являются потомством крупноплодных инорайонных сортов яблони домашней, отобранных среди сеянцев от свободного опыления (CO/Co), полученных в условиях Сибири (к таким сортам относится, например, 'Феникс Алтайский', выделенный среди сеянцев 'Бельфлер-феникс'). Гибридное потомство 'Ранетки Пурпуровой', 'Непобедимой Грелля', 'Лалетин', 'Пепина Шафранного', 'Бельфлер-китайки' и некоторых других сортов (внесших меньший, но значительный вклад в формирование районированного сортимента) составляет первые поколения сортов яблонь-полукультурок (годы скрещивания – 1937–1940). Существует утверждение о наличии устойчивой и трудноразрушимой связи ранних сроков созревания (летних и раннеосенних) и повышенной зимостойкости как «ранеток», так и «полукультурок», являющихся потомками *M. baccata*, с чем, вероятно, и связан отбор гибридов этих сроков созревания в сорта, поскольку зимостойкость является основным критерием отбора в условиях проведения исследования. В комбинациях скрещивания как летних ('Непобедимая Грелля' × 'Белый Налив' и др.), так и осенних ('Ранетка Пурпуровая' × 'Пепин Шафранный' и др.) сортов и гибридов были получены сеянцы различных сроков созревания, преимущественно летнего и осеннего типа. Направленные скрещивания родительских форм поздних и очень поздних сроков созревания и использование в качестве отцовских форм инорайонных «зимних» сортов не являются гарантом получения «зимних» гибридов. Результаты проводимого ранее гибридологического анализа показывали усиление влияния сроков созревания отцовской формы по мере удаления от *M. baccata* (F_3 и далее): $r = 0,54$; $h^2 = 29,2\%$ для гибридов F_1 и $r = 0,72$; $h^2 = 51,8\%$ для гибридов F_3 . Сильное расщепление по данному признаку характерно для всех гибридных семей, полученных в XX веке на Алтае; впрочем, гибриды летнего и раннеосеннего сроков созревания с потенциалом хранения менее 20 дней и составляют основную часть первых поколений яблонь-полукультурок (Kalinina et al., 2010).

Маркер-вспомогательная селекция становится все более популярным методом в современной науке. Ее суть заключается в выявлении и анализе конкретных генов или локусов, контролирующих определенные фенотипические признаки, с последующей разработкой для них молекулярных маркеров. Использование косвенного отбора посредством молекулярного генотипирования, предположительно, позволяет выявлять целевые аллели и гаплотипы на начальных этапах онтогенеза растения, что может оптимизировать и ускорять селекционный процесс (Muranty et al., 2014).

Экспрессия и функциональная активность биосинтеза этилена находятся под контролем семейства генов ACS (1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase) и ACO (1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase) соответственно (Dong et al., 1992). В процессе созревания плодов наиболее высокую экспрессионную активность среди изученных вариантов демонстрирует ген *Md-ACS1* (Wakasa et al., 2006). Молекулярно-генетические исследования выявили состояния гена *Md-ACS1* по двум основным аллельным вариантам: *Md-ACS1-1* (489 пн) и *Md-ACS1-2* (655 пн) (Costa et al., 2005). К тому же была установлена корреляция между специфическими генотипами *M. × domestica* и соответствующими уровнями синтеза этилена: гомозигота *Md-ACS1-1/1* – максимальная продукция этилена, гетерозигота *Md-ACS1-1/2* – промежуточный уро-

вень синтеза, гомозигота *Md-ACS1-2/2* – минимальная этиленовая активность (Zhu, Barritt, 2008).

В семействе генов 1-аминоциклопропан-1-карбоксилактоксидаз (ACO) доминирующую роль в плодовых тканях играет *Md-ACO1*, который также представлен двумя аллельными вариантами *Md-ACO1-1* (525 пн) и *Md-ACO1-2* (587 пн) (Wakasa et al., 2006). Хотя его вклад в общий биосинтез этилена относительно невелик, однако присутствие *ACO1-1* в гомозиготном состоянии усиливает эффект *Md-ACS1-1/2* (Costa et al., 2005).

В настоящее время наиболее часто упоминаемым в исследованиях генетически обусловленной лежкости плодов является сорт 'Fuji'. Обладая оптимальной генетической комбинацией *ACS1-2/2* и *ACO1-1/1*, данный сорт сохраняет показатели твердости плодов на уровне $> 7 \text{ кг/см}^2$ при 8-месячном хранении в условиях 0–4°C (Fan et al., 1999). Эти и ряд других данных активно озвучиваются в отечественных и мировых селекционных программах для актуализации перспектив применения молекулярно-генетических методов для ускоренной селекции яблони и других хозяйственно ценных видов растений.

Цель исследования – выявление доноров генов пониженного биосинтеза этилена для повышения эффективности селекционной работы, направленной на получение высокозимостойких сортов яблони с плодами, пригодными к длительному хранению.

Материалы и методы

Исследование проведено в лаборатории селекции плодовых и ягодных культур отдела «Научно-исследовательский институт садоводства Сибири им. М.А. Лисавенко» (НИИСС им. М.А. Лисавенко) Федерального Алтайского научного центра агrobiотехнологий (ФАНЦА). Объектами исследования послужили 28 сортов и 6 отборных гибридов яблони разных сроков созревания, различного географического и генетического происхождения: народной селекции, отечественных и зарубежных учреждений, а также сорта и гибриды селекции НИИСС им. М.А. Лисавенко (таблица). В исследование вошли сорта – прародители сибирского сортимента яблони (такие как 'Ранетка Пурпуровая', 'Непобедимая Грелля', 'Лалетинно', 'Пепин Шафранный'), сорта, внесшие вклад в генотип сибирских сортов яблонь-полукультурок ('Wealthy', 'Melba'), и сорта, ранее изученные в других организациях (в качестве положительного контроля). Все объекты прошли помологическую экспертизу по совокупности морфологических признаков на соответствие заявленному сорту (Skibinskaya, 1969; Kalinina, 2005; Sedov, 2020).

Участки сортоизучения яблони расположены на левом берегу р. Оби на территории НИИСС им. М.А. Лисавенко. Подвой – сеянцы 'Ранетки Пурпуровой'.

Зона лесостепная, почва – выщелоченный чернозем. Среднепогодный период возможной вегетации составляет 160 дней; длина безморозного периода – 120 дней. Среднегодовая температура воздуха составляет +2,6°C, среднепогодная сумма осадков – 409,0 мм.

Молекулярно-генетический анализ проведен в лаборатории биоинженерии Алтайского государственного университета. Выделение тотальной ДНК осуществлялось из листьев коммерческим набором Diamond DNA Plant kit (ООО «Алтайбиотех», Россия) по протоколу производителя. Реакцию амплификации проводили с применением готовой ПЦР-смеси БиоМастер HS-Та

ПЦР («Биолабмикс», Россия) в объеме 15 мкл и с конечной концентрацией праймеров 400 нМ.

Для анализа использовались следующие олигонуклеотиды, синтезированные ООО «Евроген» (Россия): *Md-ACS1* (F: AGAGAGATGCCATTTTGTTCGTAC; R: CCTACAAA CTTGCGTGGGGATTATAAGTGT) и *Md-ACO1* (F: TCCCCCAA TGCACCACTCCA; R: GATTCCTTGGCCTTCATAGCTTC) (Costa et al., 2005). Амплификация проводилась в термоблокере MyCycler (Bio-Rad, США) по следующей программе: 95°C (3 мин); 33 цикла: 95°C (60 с), 57°C (30 с), 72°C (30 с); 72°C (5 мин) (Costa et al., 2005). Разделение и визуализацию продуктов амплификации проводили с помощью 2-процентного агарозного геля в буфере 0,5X TAE. В качестве маркера молекулярного веса использовали ДНК-маркер Step 50 («Биолабмикс», Россия). Гели документировали с помощью системы Quantum ST5 (Vilber, Франция) после окрашивания бромистым этидием. Длины амплифицированных фрагментов определяли в программе внутреннего программного обеспечения. Статистический анализ проведен в среде R studio (версия 4.3.1) с использованием пакетов stats.

Результаты и обсуждение

Анализ аллельного полиморфизма гена *Md-ACO1* показал неравномерное распределение генотипов среди исследованных образцов (рис. 1). Гомозиготное состояние (как 1/1, так и 2/2) среди изученных образцов не обнаружено. Гетерозиготный генотип 1/2 полностью доминировал в выборке (100%), включая исходные материнские ('Ранетка Пурпуровая', 'Непобедимая Грелля') и отцовские формы ('Пепин Шафранный', 'Melba', 'Wealthy') как осеннего, так и летнего сроков созревания (см. таблицу).

Аллельные состояния *Md-ACS1*, предположительно вносящего более весомый вклад в сроки хранения климатических плодов (Zhu, Barritt, 2008), показали большее разнообразие. Среди изученных выделено 5 образцов, несущих вариант *Md-ACS1-1/2*, обуславливающий средний (сниженный) синтез этилена (рис. 2). К ним относятся позднеосенний сорт 'Wealthy' ('Боровинка' × 'Jonathan', США) и его гибридное потомство ('Алтайское Пурпуровое' и 'Алтайское Юбилейное'), канадский сорт летнего срока созревания 'Mantet' (CO 'Титовка', Канада), а также отборная селекционная форма Co-99-2981. Примечательно, что сорт 'Mantet', несущий *Md-ACS1-1/2*, характеризуется не только летним сроком созревания, но и коротким (даже для изученных летних сортов) сроком хранения.

Гибрид Co-99-2981 получен в результате посева в 1999 г. в одну селекционную семью смеси семян от свободного опыления алтайских полукультурок. В данную смесь вошли семена от свободного опыления осенних сортов: 'Алтайское Зимнее', 'Сувенир Алтая', 'Заветное', 'Подарок Садоводам', 'Зимний Шафран', 'Алтайское Пурпуровое'. Наличие аллельного состояния *Md-ACS1-1/2* у гибрида Co-99-2981, а также равномерная красная окраска с сильным восковым налетом, редко встречающаяся среди яблонь-полукультурок, крупноплодность, сроки созревания и потенциал длительного хранения позволяют предположить генетическое родство данного гибрида и изученного гибридного потомства сорта 'Wealthy', активно используемого в селекции на Алтае. Среди возможных материнских форм представлены сорта 'Алтайское Пурпуровое' [('Ранетка Пурпуровая' × 'Пепин Шафранный') × 'Wealthy'] и 'Алтайское Зимнее'

Таблица. Характеристика образцов яблони по срокам созревания, хранения и аллельному состоянию генов *Md-ACO1* и *Md-ACS1*
Table. Characterization of apple-tree accessions according to their ripening time, fruit shelf life, and allelic state of the *Md-ACO1* and *Md-ACS1* genes

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator or breeder	Сроки созревания родителей* форм* / Ripening period of parent forms*	Сроки хранения родителей* форм* / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	Md-ACO1	Md-ACS1	Литературные данные (Md-ACO1; Md-ACS1) / Published data (Md-ACO1; Md-ACS1)
Летнего срока созревания плодов (Лет.) / Summer ripening season (Sum.)								
‘Алпек’ / ‘Alpek’	‘Заветное’ × ‘Кузнецовское’ / ‘Zavetnoye’ × ‘Kuznetsovskoye’	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. × Лет. / Aut. × Sum.	Ср. × Мал. / Med. × Sh.	Ср. / Med.	1/2	1/1	-
‘Смугляночка’ / ‘Smuglyanochka’	‘Горноалтайское’ × ‘Алтайское Десертное’ / ‘Gornoaltayskoye’ × ‘Altayskoye Desertnoye’	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Лет. × Лет. / Sum. × Sum.	Мал. × Мал. / Sh. × Sh.	Мал. / Sh.	1/2	1/1	-
‘Сочное’ / ‘Sochnoye’	‘Бельфлер-китайка’ × ‘Северянка’ / ‘Belfler-kitayka’ × ‘Severyanka’	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. × Лет. / Aut. × Sum.	Ср. × Ср. / Med. × Med.	Мал. / Sh.	1/2	1/1	-
18-07-5951	‘Лалетино’ × ‘Чистотел’ / ‘Laletino’ × ‘Chistotel’	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. × П. ос. / Aut. × L. aut.	Ср. × Дл. / Med. × Long	Мал. / Sh.	1/2	1/1	-
‘Непобедимая Грелля’ / ‘Nepobedimaya Grellya’	Неизвестны, предположительно <i>Malus prunifolia</i> / Unknown, presumably <i>M. prunifolia</i>	В. П. Меренков, г. Боровск	-	-	Мал. / Sh.	1/2	1/1	-
‘Mantet’	СО ‘Титовка’ / Open-pollinated seedling of ‘Titovka’	Canada, Manitoba (Morden Station)	Ос. / Aut.	Дл. / Long	Мал. / Sh.	1/2	1/2	1/2; 1/2 (Savel'ev et al., 2014; Shamshin, 2011)

Таблица. Продолжение
Table. Continued

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / breeder	Сроки созревания родителей / Ripening forms* / Parent forms*	Сроки хранения родителей / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	Md-ACOI	Md-ACS1	Литературные данные (Md-ACOI; Md-ACS1) / Published data (Md-ACOI; Md-ACS1)
'Melba'	CO 'McIntosh' / Open-pollinated seedling of 'McIntosh'	Canada, Ottawa (Central Experimental Farm)	П. ос. / L. aut.	Дл. / Long	Ср. / Med.	1/2	1/1	2/2; 1/1 (Urbanjivich et al., 2013; Dulov, 2023)
13-99-898	'Алтайское Румяное' × 'Московское Зимнее' / 'Altayskoye Rumyanoye' × 'Moskovskoye Zimneye'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко)	Лет. × П. ос. / Sum. × L. aut.	Мал. × Дл. / Sh. × Long	Ср. / Med.	1/2	1/1	-
14-07-6057	'Жар-птица' × 'Чистотел' / 'Zhaz-ptitsa' × 'Chistotel'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко)	Лет. × П. ос. / Sum. × L. aut.	Мал. × Дл. / Sh. × Long	Ср. / Med.	1/2	1/1	-
Осеннего срока созревания плодов (Ос.) / Autumn ripening season (Aut.)								
'Алтайское Пурпуровое' / 'Altayskoye Purpurovoye'	(Ранетка Пурпуровая' × 'Пепин Шафранный') × 'Wealthy' / ('Ranetka Purpurovaya' × 'Pepin Shafranny') × 'Wealthy'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко)	Ос. × П. ос. / Aut. × L. aut.	Ср. × Дл. / Med. × Long	Дл. / Long	1/2	1/2	-
'Dolgo'	Неизвестно, предположительно F ₁ M. baccata / Unknown, presumably F ₁ M. baccata	USA, South Dakota (South Dakota State University)	-	-	Ср. / Med.	1/2	1/1	1/2; 1/1 (Urbanjivich et al., 2013)

Таблица. Продолжение
Table. Continued

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator or breeder	Сроки созревания родительских форм* / Ripening period of parent forms*	Сроки хранения родительских форм / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	Md-ACOI	Md-ACOI	Литературные данные (Md-ACOI; data (Md-ACOI; published Md-ACOI)
'Жигулевское' / 'Zhigulevskoye'	'Боровинка Обыкновенная' × 'Wagener Price' / 'Borovinka Obukhnovennaya' × 'Wagener Price'	НИИ «Жигулевские сады», г. Самара	Лет. × П. ос. / Sum. × L. aut.	Мал. × Дл. / Sh. × Long	Ср. / Med.	1/2	1/1	1/2; 1/2 (Savel'ev et al., 2014) 2/2; 1/2 (Shamshin et al., 2012; Dulov, 2023)
'Заветное' / 'Zavetnoye'	'Осенняя Радость Алтая' × 'Melba' / 'Osennyaya Radost' Altaia' × 'Melba'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. × Лет. / Aut. × Sum.	Ср. × Ср. / Med. × Med.	Ср. / Med.	1/2	1/1	-
'Зимний Шафран' / 'Zimniy Shafra'	'Торноалтайское' × 'Сибирская Красавица' + 'Сибирский Самородок' / 'Gornootaitskoye' × 'Sibirskaya Krasavitsa' + 'Sibirskiy Samorodok'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Лет. × Ос. / Sum. × Aut.	Мал. × Ср. + Ср. / Sh. × Med. + Med.	Ср. / Med.	1/2	1/1	-
'Золотая Тайга' / 'Zolotaya Taiga'	'Таежное' × 'Пелин Шафранный' / 'Tauozhnoye' × 'Pelin Shafranny'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Горно-Алтайск)	Ос. × П. ос. / Aut. × L. aut.	Дл. × Дл. / Long × Long	Дл. / Long	1/2	1/1	-

Таблица. Продолжение
Table. Continued

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator or breeder	Сроки созревания форм* / Ripening forms*	Сроки хранения родительских форм / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	<i>Md-AC01</i>	<i>Md-ACS1</i>	Литературные данные (<i>Md-AC01</i> ; <i>Md-ACS1</i>) / Published data (<i>Md-AC01</i> ; <i>Md-ACS1</i>)
'Космическое' / 'Kosmicheskoye'	('Ранетка Пурпуровая' × 'Бельфлер- китайка') × 'Белый налив' + 'Грушовка Московская' + 'Китайка Золотая' (смесь пыльцы) / (Ranetka Purpurovaya' × 'Belfler-kitayka') × 'Bely Naliv' + 'Grushovka Moskovskaya' + 'Kitayka Zolotaya' (pollen mixture)	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. × Лет. + Лет. + Лет. / Aut. × Sum. + Sum. + Sum.	Ср. × Мал. + Мал. + Мал. / Med. × Sh. + Sh. + Sh.	Дл. / Long	1/2	1/1	-
'Лалетино' / 'Laletino'	Неизвестно, предположительно F ₁ <i>M. baccata</i> / Unknown, presumably F ₁ <i>M. baccata</i>	Ботанический сад им. В.М. Крутовского, г. Красноярск	-	-	Ср. / Med.	1/2	1/1	-
'Осенняя Радость Алтая' / 'Osenneyaya Radost Altaya'	('Ранетка Пурпуровая' × 'Пепин Шафранный') × 'Бельфлер- китайка' / ('Ranetka Purpurovaya' × 'Pepin Shafranny') × 'Belfler-kitayka'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. × Ос. / Aut. × Aut.	Ср. × Ср. / Med. × Med.	Ср. / Med.	1/2	1/1	-

Таблица. Продолжение
Table. Continued

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator or breeder	Сроки созревания форм* / Ripening period of parent forms*	Сроки хранения родительских форм / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	<i>Md-AC01</i>	<i>Md-AC01</i>	Литературные данные (<i>Md-AC01</i> ; <i>Md-AC01</i>) / Published data (<i>Md-AC01</i> ; <i>Md-AC01</i>)
'Ранетка Пурпуровая' / 'Ranetka Purpurovaya'	Неизвестно, предположительно F ₁ <i>M. baccata</i> / Unknown, presumably F ₁ <i>M. baccata</i>	М. Г. Никифоров, г. Минусинск (огобрано из популяций северного Китая)	-	-	Мал. / Sh.	1/2	1/1	-
'Сувенир Алтая' / 'Suvenir Altaya'	'Горноалтайское' × (Пепин Шафранный' × 'Бельфлер-китайка') / 'Gornaltayskoye' × (Pepin Shafranny' × 'Belfler-kitayka')	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Горно-Алтайск)	Лет. × Ос. / Sum. × Aut.	Мал. × Ср. / Sh. × Med.	Дл. / Long	1/2	1/1	-
'Феникс Алтайский' / 'Feniks Altayskiy'	СО 'Бельфлер- феникс' / Open-pollinated seedling of 'Belfler- feniks'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Горно-Алтайск)	П. ос. / L. aut.	Дл. / Long	Ср. / Med.	1/2	1/1	1/2; 1/1 (Savel'ev et al., 2014; Shamshin, 2011)
'Юбилейное Калининой' / 'Yubileynoye Kalininoy'	'Осенняя Радость Алтая' × 'Феникс Алтайский' / 'Osenneyaya Radost Altaya' × 'Feniks Altayskiy'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Лет. × Ос. / Sum. × Aut.	Ср. × Ср. / Med. × Med.	Дл. / Long	1/2	1/1	-
'Чупинское' / 'Chupinskoye'	СО 'Феникс Алтайский' / Open-pollinated seedling of 'Feniks Altayskiy'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. / Aut.	Ср. / Med.	Ср. / Med.	1/2	1/1	-

Таблица. Продолжение
Table. Continued

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator or breeder	Сроки созревания родительских форм* / Ripening period of parent forms*	Сроки хранения родительских форм / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	Md-AC01	Md-AC01	Литературные данные (Md-AC01; Md-AC01) / Published data (Md-AC01; Md-AC01)
13-99-675	‘Алтайское Румяное’ × ‘Московское Зимнее’ / ‘Altayskoye Rumyanoye’ × ‘Moskovskoye Zimneye’	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Лет. × П. ос. / Sum. × L. aut.	Мал. × Дл. / Sh. × Long	Ср. / Med.	1/2	1/1	-
‘Cola’	M. coronaria × ‘Боровинка’ / M. coronaria × ‘Borovinka’	USA, South Dakota (South Dakota State University)	П. ос. × Лет. / L. aut. × Sum.	Дл. × Мал. / Long × Sh.	Дл. / Long	1/2	1/1	-
‘Tellisaare’	Неизвестны, предположительно F ₁ M. domestica / Unknown, presumably F ₁ M. domestica	Эстонский сорт народной селекции	-	-	Дл. / Long	1/2	1/1	2/2; 1/1 (Urbanjivich et al., 2013)
‘Wealthy’	‘Боровинка’ × ‘Jonathan’ / ‘Borovinka’ × ‘Jonathan’	USA, Minnesota (State Experimental Fruit Farm)	Лет. × Ос. / Sum. × Aut.	Мал. × Дл. / Sh. × Long	Дл. / Long	1/2	1/2	1/2; 1/1 (Urbanjivich et al., 2013); 1/2; 1/2 2/2; 1/2 (Dulov, 2023)
‘Алтайское Сладкое’ / ‘Altayskoye Sladkoye’	‘Таежное’ × ‘Пепин Шафранный’ / ‘Tayozhnoye’ × ‘Pepin Shafranny’	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Горно-Алтайск)	Ос. × П. ос. / Aut. × L. aut.	Дл. × Дл. / Long × Long	Ср. / Med.	1/2	1/1	-

Таблица. Продолжение
Table. Continued

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator or breeder	Сроки созревания родительских форм* / Ripening period of parent forms*	Сроки хранения родительских форм / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	<i>Md-AC01</i>	<i>Md-AC01</i>	Литературные данные (<i>Md-AC01</i> ; <i>Md-AC01</i>) / Published data (<i>Md-AC01</i> ; <i>Md-AC01</i>)
'Алтайское Юбилейное' / 'Altayskoye Yubileynoye'	СО 'Wealthy' / Open-pollinated seedling of 'Wealthy'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Горно-Алтайск)	П. ос. / L. aut.	Дл. / Long	Дл. / Long	1/2	1/2	-
'Антипашкальное' / 'Antipaskhalnoye'	(<i>M. niedzwetzkyana</i> × 'Антоновка Обыкновенная') × 'Бельфлер-китайка' / (<i>M. niedzwetzkyana</i> × 'Antonovka Obyknovennaya') × 'Belfler-kitayka'	И. В. Мичурин, г. Мичуринск	Ос. × Ос. / Aut. × Aut.	- × Ср. / - × Med.	Дл. / Long	1/2	1/1	-
'Ароматное' / 'Aromatnoye'	'Антоновка Обыкновенная' × 'Бессемянка Мичуринская' / 'Antonovka Obyknovennaya' × 'Bessemyanka Michurinskaya'	ВНИИС им. И.В. Мичурина	П. ос. × Ос. / L. aut. × Aut.	Ср. × Дл. / Med. × Long	Дл. / Long	1/2	1/1	-
'Пепин Шафранный' / 'Pepin Shafanny'	'Reinette d'Orléans' × (Пепинка Литовская' × <i>M. prunifolia</i>) / 'Reinette d'Orléans' × (Пепинка Litovskaya' × <i>M. prunifolia</i>)	И. В. Мичурин, г. Мичуринск	П. ос. × Ос. / L. aut. × Aut.	Дл. × Ср. / Long × Med.	Дл. / Long	1/2	1/1	1/2; 1/1 (Savel'ev et al., 2014) 2/2; 1/1 (Shamshin, 2011)

Таблица. Окончание
Table. The end

Образец / Accession	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator or breeder	Сроки созревания родительских форм* / Ripening period of parent forms*	Сроки хранения родительских форм / Fruit shelf life of parent forms	Срок хранения** / Fruit shelf life**	<i>Md-ACO1</i>	<i>Md-ACS1</i>	Литературные данные (<i>Md-ACO1</i> ; <i>Md-ACS1</i>) / Published data (<i>Md-ACO1</i> ; <i>Md-ACS1</i>)
Co-97-588	СО 'Феникс Алтайский' / Open-pollinated seedling of 'Feniks Altayskiy'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	Ос. / Aut.	Ср. / Med.	Дл. / Long	1/2	1/1	-
Co-99-2981	От посева смеси семян от свободного опыления сортов 'Алтайское Зимнее', 'Сувенир Алтай', 'Заветное', Подарок Садоводам', 'Зимний Шафран', 'Алтайское Пурпуровое' / From open-pollinated seed mixture of 'Altayskoye Zimneye', 'Suvenir Altaya', 'Zavetnoye', 'Podarok Sadovodam', 'Zimniy Shafran', and 'Altayskoye Purpurovoye'	ФАНЦА (НИИСС им. М.А. Лисавенко, г. Барнаул)	-	-	Дл. / Long	1/2	1/2	-

Примечание: * – Лет. – летнего срока созревания. Ос. – осеннего срока созревания. П. ос. – позднего срока созревания; ** – Мал. – срок хранения менее 20 дней, Ср. – срок хранения до 60 дней, Дл. – срок хранения более 60 дней

Note: * – Sum. means "ripening in summer", Aut. means "ripening in autumn", and L. aut. means "ripening in late autumn", ** – Sh. means "short shelf life" (less than 20 days), Med. means "medium shelf life" (up to 60 days), and Long means "long shelf life" (60 days or more)

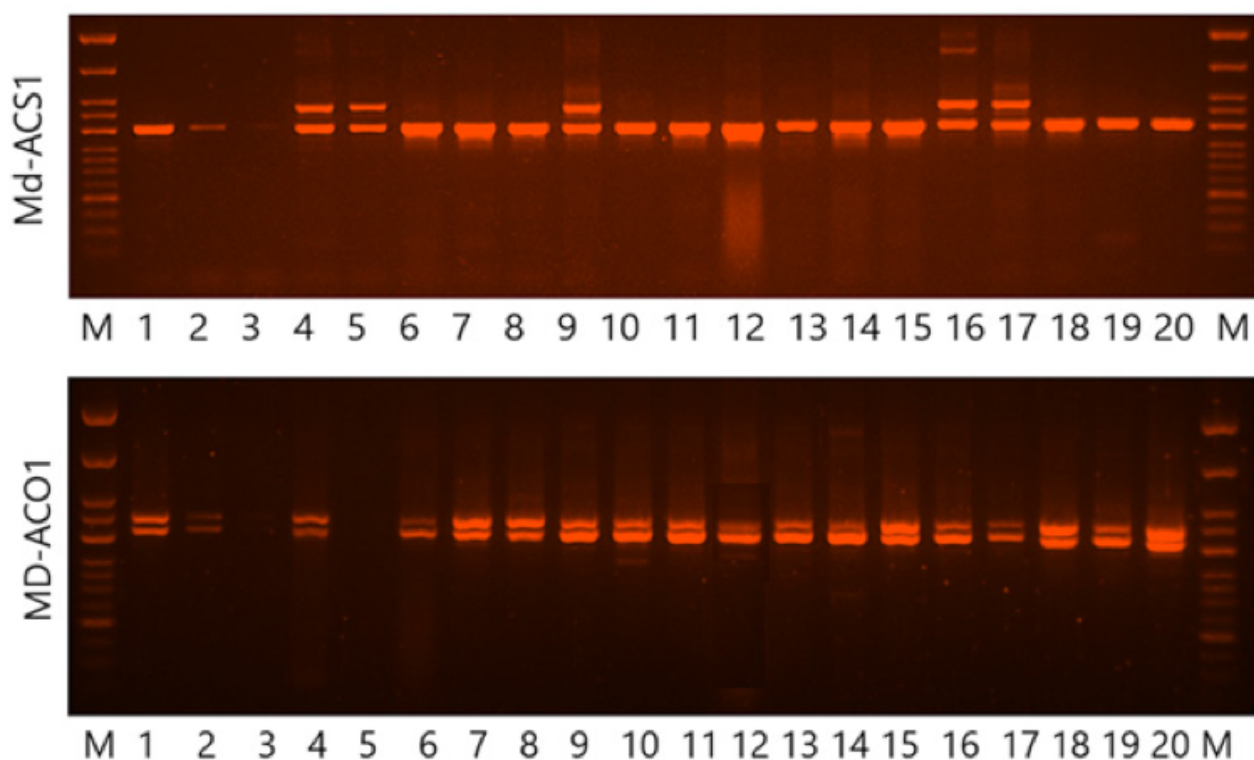


Рис. 1. Электрофореграмма идентификации аллелей генов *Md-ACS1* и *Md-ACO1*: 1 – ‘Пепин Шафранный’; 2 – ‘Melba’; 3 – ‘Непобедимая’; 4 – ‘Mantet’; 5 – ‘Алтайское Юбилейное’; 6 – ‘Лалетино’; 7 – Co-97-588; 8 – ‘Tellisaare’; 9 – Co-99-2981; 10 – 13-99-898; 11 – 13-99-675; 12 – ‘Алтайское Сладкое’; 13 – 18-07-5951; 14 – ‘Cola’; 15 – 14-07-6057; 16 – ‘Алтайское Пурпуровое’; 17 – ‘Wealthy’; 18 – ‘Зимний Шафран’; 19 – ‘Смугляночка’; 20 – ‘Космическое’; М – маркер молекулярного веса

Fig. 1. Electropherogram of allele identification for the *Md-ACS1* and *Md-ACO1* genes: 1 – ‘Pepin Shafranny’; 2 – ‘Melba’; 3 – ‘Nepobedimaya’; 4 – ‘Mantet’; 5 – ‘Altayskoye Yubileynoye’; 6 – ‘Laletino’; 7 – So-97-588; 8 – ‘Tellisaare’; 9 – So-99-2981; 10 – 13-99-898; 11 – 13-99-675; 12 – ‘Altayskoye Sladkoye’; 13 – 18-07-5951; 14 – ‘Cola’; 15 – 14-07-6057; 16 – ‘Altayskoye Purpurovoye’; 17 – ‘Wealthy’; 18 – ‘Zimniy Shafran’; 19 – ‘Smuglyanochka’; 20 – ‘Kosmicheskoye’; M – molecular weight marker



Рис. 2. Доноры сниженного биосинтеза этилена: 1 – отборная форма Co-99-2981; 2 – сорт ‘Wealthy’; 3 – сорт ‘Алтайское Юбилейное’

Fig. 2. Donors of reduced ethylene biosynthesis: 1 – selected form Co-99-2981; 2 – cv. ‘Wealthy’; 3 – cv. ‘Altayskoye Yubileynoye’

(‘Лалетино’ × ‘Wealthy’), что позволяет сузить возможный круг родства гибрида Со-99-2981 до этих сортов.

Статистический анализ с использованием точного критерия Фишера не выявил достоверной связи между аллельным состоянием гена *Md-ACS1* и продолжительностью хранения плодов ($p = 1,000$). Аналогично не обнаружено значимой ассоциации со сроком созревания ($p = 0,678$). Оба генотипа (гомозиготный *Md-ACS1*-1/1 и гетерозиготный *Md-ACS1*-1/2) демонстрировали сходное распределение по изучаемым хозяйственным признакам. Подобные результаты были описаны для сортов селекции Свердловской селекционной станции садоводства: в работе И. Н. Шамшина и коллег отмечено отсутствие связи лежкости с аллельным состоянием генов биосинтеза этилена для сортов уральской селекции различных сроков созревания (Shamshin et al., 2020).

Отсутствие достоверных связей между состояниями изученных локусов можно объяснить действием иных генов, ассоциированных со спецификой хранения плодов, а также физиологическими особенностями и биохимическим составом яблок сибирского сортимента (например, повышенным содержанием пектиновых веществ), оказывающими влияние на сроки хранения. В связи с этим можно предположить не только специфичное влияние *Md-ACO1* и *Md-ACS1* на различные экотипы сортов *M. × domestica*, но и возможность существования ранее не выявленных аллельных вариантов. Необходимо учитывать и специфические экологические условия региона, которые, несомненно, оказывают влияние на характер вегетации и реальные сроки хранения яблок (возможно, отличающиеся от ожидаемых).

Наблюдаемую гетерозиготность можно объяснить преимуществом данного аллельного состояния в условиях проведения исследования (при условии, что размеры фрагментов полностью совпадают с описанными в литературе) и непреднамеренным отбором в сторону гетерозиготных генотипов, а также гибридным происхождением сибирских сортов и спецификой формирования коллекции. Также мы не можем исключить случайную особенность выборки.

Проведенный анализ полиморфизма гена *Md-ACS1* выявил преобладание гомозиготного генотипа 1/1 в изученных образцах, который был обнаружен у 91,4% образцов (см. таблицу). Гетерозиготный генотип 1/2 встречался значительно реже (8,6%), в то время как гомозиготный генотип 2/2 полностью отсутствовал, что отражает характер исходных генотипов (преимущественно ‘Ранетки Пурпуровой’, ‘Непобедимой Грелля’, ‘Лалетино’ и ‘Пепина Шафранного’).

Необходимо отметить, что полученные нами данные как совпадают, так и вступают в противоречие с результатами, полученными в иных учреждениях (Shamshin, 2011; Urbanjvich et al., 2013; Savel'ev et al., 2014). При этом внутрисортное аллельное разнообразие сортов ‘Жигулевское’ (Самарская зональная плодово-ягодная опытная станция) и ‘Wealthy’ (США, Миннесота) описывалось ранее (Dulov, Shamshin, 2025), а у сортов ‘Gala’ и ‘Fuji’ существуют сорта-клоны, отличающиеся от исходных сортов сроками созревания при остальном соответствии (Wang et al., 2009; Ban et al., 2022).

Одной из возможных причин выявленных расхождений в аллельном составе изученных сортов (см. таблицу) могут быть особенности поддержания и омоложения генетических коллекций яблони. В условиях Сибири, где многие инорайонные сорта обладают недостаточной зимостойкостью, при омоложении коллекции для привив-

ки традиционно отбирают черенки с наиболее жизнеспособных растений. Также ранее отмечалось, что количество соматических мутаций яблони повышается при разнообразных привойно-подвойных комбинациях (Kunakh, 1995). Таким образом, на разных исторических этапах мог происходить отбор клонов сортов *M. × domestica*, привитых на районированный подвой F_1 - F_2 *M. baccata*, обладающих не только повышенной адаптацией к абиотическим стрессам (в первую очередь, морозо-, зимо-, жаростойкость и засухоустойчивость) (Ban, Jung, 2023), но и иным аллельным составом генов *Md-ACS1* и *Md-ACO1*.

Кроме того, в условиях сибирского климата мог иметь место опосредованный отбор на аллельные варианты генов этиленового пути, которые оптимизируют не столько параметры созревания плодов, сколько стрессоустойчивость самого растения (Salikhova et al., 2023; Khan et al., 2024). Таким образом, выявленные в нашей коллекции отличия от генотипов, описанных для тех же сортов в других регионах, могут отражать адаптацию местных клонов через изменение работы этилен-регулирующей сети. Это предположение открывает новые перспективы для исследований, направленных на изучение плейотропных эффектов генов биосинтеза этилена в контексте одновременной селекции на устойчивость и качество.

Заключение

Впервые изучены аллельные состояния генов *Md-ACO1* и *Md-ACS1* образцов яблони из генетической коллекции ФАНЦА. Выявлены доноры ценных аллелей для направленной селекции на получение высокозимостойких гибридов с генетически обусловленным потенциалом длительной лежкости плодов. Для изученных образцов не выявлено достоверной связи между аллельными состояниями и среднесуточными сроками хранения плодов, что может отражать специфику изучаемой коллекции. Выявлен внутрисортный полиморфизм целевых генов среди инорайонных сортов (‘Жигулевское’, ‘Wealthy’, ‘Melba’, ‘Tellisaare’).

Согласно результатам наших исследований, для получения высокозимостойких сортов яблони с длительным потенциалом хранения в качестве родительских форм перспективны сорта ‘Алтайское Пурпуровое’, ‘Алтайское Юбилейное’ и отборный гибрид Со-99-2981 (*Md-ACS1*-1/2), а также сорта ‘Wealthy’ и ‘Mantet’ в комбинациях с высокозимостойкими образцами.

References / Литература

- Ban S., El-Sharkawy I., Zhao J., Fei Z., Xu K. An apple somatic mutation of delayed fruit maturation date is primarily caused by a retrotransposon insertion-associated large deletion. *The Plant Journal*. 2022;111(6):1609-1625. DOI: 10.1111/tpj.15911
- Ban S., Jung J.H. Somatic mutations in fruit trees: causes, detection methods, and molecular mechanisms. *Plants (Basel)*. 2023;12(6):1316. DOI: 10.3390/plants12061316
- Barry C.S., Giovannoni J.J. Ethylene and fruit ripening. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2007;26(2):143-159. DOI: 10.1007/s00344-007-9002-y
- Costa F., Stella S., van de Weg W.E., Guerra W., Cecchin M., Dallavia J. et al. Role of the genes *Md-ACO1* and *Md-ACS1* in ethylene production and shelf life of apple (*Malus domestica* Borkh.). *Euphytica*. 2005;141(1-2):181-190. DOI: 10.1007/s10681-005-6805-4

- Dong J.G., Olson D., Silverstone A., Yang S.F. Sequence of a cDNA coding for a 1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase homolog from apple fruit. *Plant Physiology*. 1992;98(4):1530-1531. DOI: 10.1104/pp.98.4.1530
- Dulov M.I. Polymorphism of genes of ethylene biosynthesis *Md-ACS1* and *Md-ACO1* in apple varieties of domestic and foreign selection of autumn fruit ripening period. In: *Innovative Development of Science: Fundamental and Applied Problems (Innovatsionnoye razvitiye nauki: fundamentalnye i prikladnye problemy)*. Petrozavodsk: New Science; 2023. p.38-60. [in Russian] (Дулов М.И. Полиморфизм генов биосинтеза этилена *Md-ACS1* и *Md-ACO1* у сортов яблони отечественной и зарубежной селекции осеннего срока созревания плодов. В кн.: *Инновационное развитие науки: фундаментальные и прикладные проблемы. Монография*. Петрозаводск: Новая Наука; 2023. С.38-60). DOI: 10.46916/03042023-1-978-5-00174-921-9
- Dulov M.I., Shamshin I.N. Molecular genetic analysis of apple varieties bred by the institute "Zhigulevskie gardens" by the *Md-ACS1* and *Md-ACO1* genes of ethylene biosynthesis in fruits during ripening and their storage. *Bulletin Samara State Agricultural Academy*. 2025;10(2):11-18. [in Russian] (Дулов М.И., Шамшин И.Н. Молекулярно-генетический анализ сортов яблони селекции института «Жигулевские сады» по генам *Md-ACS1* и *Md-ACO1* биосинтеза этилена в плодах при созревании и их хранении. *Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии*. 2025;10(2):11-18). DOI: 10.55170/1997-3225-2025-10-2-11-18
- Fan X., Blankenship S.M., Mattheis J.P. 1-methylcyclopropene inhibits apple ripening. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 1999;124(6):690-695. DOI: 10.21273/JASHS.124.6.690
- Kalinina I.P. (ed.). Pomology. Siberian varieties of fruit and berry crops of the 20th century (Pomologiya. Sibirskie sorta plodovykh i yagodnykh kultur XX stoletiya). Novosibirsk: Yupiter; 2005. [in Russian] (Помология. Сибирские сорта плодовых и ягодных культур XX столетия / под ред. И.П. Калининой. Новосибирск: Юпитер; 2005).
- Kalinina I.P., Yashchemskaya Z.S., Makarenko S.A. Apple-tree breeding in the south of Western Siberia (Selektsiya yabloni na yuge Zapadnoy Sibiri). Novosibirsk; 2010. [in Russian] (Калинина И.П., Ящемская З.С., Макаренко С.А. Селекция яблони на юге Западной Сибири. Новосибирск; 2010).
- Khan S., Alvi A.F., Saify S., Iqbal N., Khan N.A. The ethylene biosynthetic enzymes, 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) synthase (ACS) and ACC oxidase (ACO): the less explored players in abiotic stress tolerance. *Biomolecules*. 2024;14(1):90. DOI: 10.3390/biom14010090
- Kunakh V.A. Genome variability in plant somatic cells. 2. Natural variability (Genomnaya izmenchivost somaticheskikh kletok rasteniy. 2. Izmenchivost v prirode). *Biopolymers and Cell*. 1995;11(6):5-40. [in Russian] (Кунах В.А. Геномная изменчивость соматических клеток растений. 2. Изменчивость в природе. *Биополимеры и клетка*. 1995;11(6):5-40).
- Muranty H., Jorge V., Bastien C., Lepoittevin C., Bouffier L., Sanchez L. Potential for marker-assisted selection for forest tree breeding: lessons from 20 years of MAS in crops. *Tree Genetics and Genomes*. 2014;10(6):1491-1510. DOI: 10.1007/s11295-014-0790-5
- Salikhova D.I., Golovicheva V.V., Fatkhudinov T.Kh., Shevtsova Yu.A., Soboleva A.G., Goryunov K.V. et al. Therapeutic efficiency of proteins secreted by glial progenitor cells in a rat model of traumatic brain injury. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(15):12341. DOI: 10.3390/ijms241512341
- Savel'ev N.I., Shamshin I.N., Kudryavtzev A.M. Apple for the alleles of genes of shelf life and quality of fruits. *Russian Agricultural Sciences*. 2014;(3):17-20. [in Russian] (Савельев Н.И., Шамшин И.Н., Кудрявцев А.М. Генетический полиморфизм исходных форм яблони по аллелям генов длительной лежкости и качества плодов. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2014;(3):17-20).
- Sedov E.N. (ed.). Pomology: In 5 volumes. Vol. 1. Apple tree (Pomologiya: V 5-ti tomakh. T. 1. Yablonya). 2nd ed. Moscow: Russian Academy of Sciences; 2020. [in Russian] (Помология: В 5-ти томах, Т. 1. Яблоня / под ред. Е.Н. Седова. 2-е изд. Москва: РАН; 2020).
- Sedov E.N., Ogoltsova T.P. (eds). Program and methodology of variety studies for fruit, berry and nut crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kultur). Orel: VNIISPK; 1999. [in Russian] (Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е.Н. Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999).
- Shamshin I., Saveliev N., Kudryavtzev A. Allelic diversity gene *Md-Exp7* the varieties of apples and pears. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2012;(4):23-25. [in Russian] (Шамшин И.Н., Савельев Н.И., Кудрявцев А.М. Аллельное разнообразие гена *Md-Exp7* у сортов яблони и груши. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2012;(4):23-25).
- Shamshin I.N. Assessment of allelic diversity in genes involved in the control of ethylene biosynthesis in apple using molecular markers (Otsenka raznoobraziya po allelyam genov, vovlechennykh v kontrol biosinteza etilena u yabloni, s pomoshchyu molekulyarnykh markerov) [dissertation]. Michurinsk; 2011. [in Russian] (Шамшин И.Н. Оценка разнообразия по аллелям генов, вовлеченных в контроль биосинтеза этилена у яблони, с помощью молекулярных маркеров: дис. ... канд. биол. наук. Мичуринск; 2011).
- Shamshin I.N., Telezhinskiy D.D., Shlyavas A.V. Evaluation of apple varieties of the Sverdlovsk horticultural breeding station according to the ethylene biosynthesis genes using molecular markers. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020;21(6):706-712. [in Russian] (Шамшин И.Н., Тележинский Д.Д., Шлявас А.В. Оценка сортов яблони Свердловской селекционной станции садоводства по генам биосинтеза этилена с использованием молекулярных маркеров. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020;21(6):706-712). DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.6.706-712
- Skibinskaya A.M. Apple-tree cultivars in Siberia (Pomological description) (Sorta yabloni v Sibiri [Pomologicheskoye opisanie]). Novosibirsk: West Siberian Book Publishers; 1969. [in Russian] (Скибинская А.М. Сорта яблони в Сибири (Помологическое описание). Новосибирск: Западно-Сибирское книжное издательство; 1969).
- Urbanjvich O.Yu., Kuzmitskaya P.V., Kozlouskaya Z.A., Kartel N.A. Allelic diversity of *Md-ACS1*, *Md-ACO1* and *Md-eXP7* genes of apple cultivars (*Malus × domestica*) with different storability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus (Biological Series)*. 2013;(3):47-55. [in Russian] (Урбанович О.Ю., Кузмицкая П.В., Козловская З.А., Картель Н.А. Аллельный состав генов *Md-ACS1*, *Md-ACO1* и *Md-Exp7* сортов яблони (*Malus × domestica*) с различным сроком хранения плодов. *Известия Националь-*

ной академии наук Беларуси. Серия биологических наук. 2013;(3):47-55).

- Usenko V.I., Puchkin I.A. (eds). Work program of the Breeding Center of the M.A. Lisavenko Research Institute of Horticulture for Siberia until 2030 (Programma rabot selektsentra Nauchno-issledovatel'skogo instituta sadovodstva Sibiri imeni M.A. Lisavenko do 2030 g.). Novosibirsk; 2011. [in Russian] (Программа работ селекцентра Научно-исследовательского института садоводства Сибири имени М.А. Лисавенко до 2030 г. / под ред. В.И. Усенко, И.А. Пучкина. Новосибирск; 2011).
- Wakasa Y., Kudo H., Ishikawa R., Akada S., Senda M., Niizeki M. et al. Low expression of an endopolygalacturonase gene in

apple fruit with long-term storage potential. *Postharvest Biology and Technology*. 2006;39(2):193-198. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2005.10.005

- Wang A., Tan D., Tatsuki M., Kasai A., Li T., Saito H. et al. Molecular mechanism of distinct ripening profiles in 'Fuji' apple fruit and its early maturing sports. *Postharvest Biology and Technology*. 2009;52(1):38-43. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2008.09.001
- Zhu Y., Barritt B.H. *Md-ACS1* and *Md-ACO1* genotyping of apple (*Malus × domestica* Borkh.) breeding parents and suitability for marker-assisted selection. *Tree Genetics and Genomes*. 2008;4(3):555-562. DOI: 10.1007/s11295-007-0131-z

Информация об авторах

Елена Сергеевна Троско, научный сотрудник, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, 656910 Россия, Барнаул, Научный городок, 35, младший научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, nord-hmel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2302-2160>

Анастасия Максимовна Колтунова, младший научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, asya-kolt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3753-7958>

Юлия Сергеевна Гунина, научный сотрудник, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, 656910 Россия, Барнаул, Научный городок, 35, jugunina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4955-1033>

Максим Геннадьевич Куцев, кандидат биологических наук, заместитель проректора по научному и инновационному развитию, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, m_kucev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2284-6851>

Information about the authors

Elena S. Trosko, Researcher, Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, 35 Nauchny Gorodok, Barnaul 656910, Russia, Associate Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, nord-hmel@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2302-2160>

Anastasia M. Koltunova, Associate Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, asya-kolt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3753-7958>

Julia S. Gunina, Researcher, Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, 35 Nauchny Gorodok, Barnaul 656910, Russia, jugunina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4955-1033>

Maksim G. Kutsev, Cand. Sci. (Biology), Deputy Vice-Rector for Scientific and Innovative Development, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, m_kucev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2284-6851>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.12.2025; одобрена после рецензирования 11.05.2026; принята к публикации 08.07.2026. The article was submitted on 05.12.2025; approved after reviewing on 11.05.2026; accepted for publication on 08.07.2026.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ

Научная статья

УДК 631.527.8+631.524.82

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-016



Интрогрессивные линии мягкой пшеницы, созданные с участием *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch.

А. Е. Дружин¹, С. Н. Сибикеев¹, З. Е. Фитилева¹, А. В. Фисенко², Л. В. Андреева¹

¹ Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия

² Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Евгеньевич Дружин, alex_druzhin@mail.ru

Актуальность. Использование вида *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. с целью улучшения мягкой пшеницы представляет собой актуальное направление. Это обусловлено тем, что данный вид обладает комплексом ценных характеристик, важных для обогащения и расширения генофонда мягкой пшеницы.

Материалы и методы. Объектом исследования были линии яровой мягкой пшеницы GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53), которые получены от скрещивания образца *T. kiharae* с сортами 'Саратовская 68' и 'Добрыня'. В данной работе проведен комплексный анализ линий, включавший генетические, фенологические, фитопатологические и технологические исследования по хозяйственно ценным признакам. Все исследования проводили в соответствии с общепринятыми методиками.

Результаты. Линии GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53), полученные путем скрещивания *T. kiharae* с сортами мягкой пшеницы 'Саратовская 68' и 'Добрыня', были устойчивы к бурой и желтой ржавчинам, а также к мучнистой росе. Перенос генетического материала от *T. kiharae* в геном мягкой пшеницы привел к повышению содержания белка, клейковины и «силы» муки. Увеличение количества беккроссов способствовало уменьшению содержания белка и незначительному снижению «силы» муки, но при этом увеличило объем хлеба. Продуктивность зерна и качество клейковины у выведенных линий сохранились на уровне родительских сортов.

Заключение. Перспективные линии яровой мягкой пшеницы GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53), несущие генетический материал от *T. kiharae*, устойчивы к комплексу заболеваний и обладают улучшенным качеством зерна. Эти линии представляют значительный интерес для селекционной работы и уже интегрированы в существующие селекционные программы.

Ключевые слова: мягкая пшеница, *Triticum kiharae*, интрогрессия генов, устойчивость к болезням, хозяйственно полезные признаки, глиадины

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 1021060407759-2-4.1.6 «Создание и совершенствование системы видов и сортов (гибридов) с/х культур, адаптивных к абиострессорам и устойчивых к основным патогенам, сочетающих высокую потенциальную продуктивность с качеством урожая с целью снижения экономических рисков в растениеводстве и повышения биоразнообразия в регионе. (FNWF-2022-0003)».

Коллектив авторов признателен лаборатории клеточной селекции ФАНЦ Юго-Востока за проведенный электрофорез глиадиновых белков. Глубокая признательность выражается доктору биологических наук, заведующей лабораторией генетических основ идентификации растений Александре Юрьевне Новосельской-Драгович (Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва) за помощь при написании статьи.

Для цитирования: Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Фитилева З.Е., Фисенко А.В., Андреева Л.В. Интрогрессивные линии мягкой пшеницы, созданные с участием *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):218-233. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-016

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o16

Introgressive bread wheat lines produced with the use of *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch.

Alexander E. Druzhin¹, Sergey N. Sibikeev¹, Zulfiya E. Fitileva¹, Andrey V. Fisenko², Lubov V. Andreeva¹¹ Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, Russia² Vavilov Institute of General Genetics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Corresponding author: Alexander E. Druzhin, alex_druzhin@mail.ru

Background. Using the species *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. to improve *Triticum aestivum* L. is a vital and promising trend. This species has a set of valuable traits, extremely important for enriching and expanding the gene pool of bread wheat.

Materials and methods. Spring bread wheat lines GEN2021-520 (L33) and GEN2018-640 (L53), obtained from crossing an accession of *T. kiharae* with the cultivars 'Saratovskaya 68' and 'Dobrynya', were comprehensively analyzed, including their genetic, phenological, phytopathological and technological characteristics. All studies were conducted in accordance with conventional methods.

Results. The GEN2021-520 (L33) and GEN2018-640 (L53) lines were obtained by crossing *T. kiharae* with the bread wheat cultivars 'Saratovskaya 68' and 'Dobrynya'. The lines are resistant to leaf and yellow rusts, and powdery mildew. The transfers of *T. kiharae* genetic material into the genome of bread wheat led to an increase in grain protein and gluten content, and flour strength. An increase in the number of backcrosses in the pedigree of the lines entailed a decrease in the content of protein and a slight decrease in the strength of flour, but at the same time increased the volume of bread. Grains productivity and gluten quality in these lines remained level with the parent cultivars.

Conclusion. The promising spring bread wheat lines GEN2021-520 (L33) and GEN2018-640 (L53), carrying genetic material from *T. kiharae*, demonstrated complex resistance to a number of diseases and improved grain quality. These lines are of significant interest for breeding practice and have already been integrated into existing breeding programs.

Keywords: bread wheat, *Triticum kiharae*, gene introgression, resistance to diseases, useful agronomic traits, gliadins

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the state task, Topic No. 123011900038-8 "Development and improvement of a system of crop species and cultivars (hybrids) adaptable to abiostressors and resistant to major pathogens, combining high potential productivity with crop quality in order to reduce economic risks in crop production and increase biodiversity in the region" (FNWF-2022-0003).

The authors are grateful to the Cell Breeding Laboratory of the Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region for the electrophoresis of gliadin proteins. Deep gratitude is hereby expressed to Alexandra Yu. Novoselskaya-Dragovich, Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Genetic Bases of Plant Identification, Vavilov Institute of General Genetics, Moscow, for her kind assistance in the preparation of this article.

For citation: Druzhin A.E., Sibikeev S.N., Fitileva Z.E., Fisenko A.V., Andreeva L.V. Introgressive bread wheat lines produced with the use of *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):218-233. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o16

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Первоочередной задачей для улучшения пшеницы во всем мире является обогащение генофонда этой культуры путем интрогрессии хозяйственно ценных генов от чужеродных видов (Laugerotte et al., 2022). В качестве источников генетического разнообразия выступают близкородственные виды и роды, особую роль в этом списке занимают синтетические формы, сочетающие в себе гены различных видов. Одним из них является вид *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. (A^bGD , $2n = 42$).

Первый амфидиплоид, послуживший источником для выделения вида *T. kiharae*, был получен в Университете Киото (Япония) около 80 лет назад. Его создание стало результатом гибридизации между аллотетраплоидным видом *T. timopheevii* Zhuk. и диплоидным *Aegilops tauschii* Coss. с последующим удвоением хромосомного набора. Он был назван в честь одного из основателей цитогенетики пшеницы, доктора Хитоши Кихары (Liu et al., 2018). Амфидиплоид был выписан от оригинатора и в 1966 г. поступил в ВИР. Сотрудники института В. Ф. Дорофеев и Э. Ф. Мигушова изучили его и включили в коллекцию ВИР как вид *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. (A^bGD , $2n = 42$) (к-47897) (Dorofeev, Migushova, 1977).

Вид *T. kiharae* имеет грубые, жесткие колосья средней длины, напоминающие пшеницу спелту. Тип развития яровой. Зерна средней стекловидности с высоким содержанием белка и лизина, масса 1000 зерен – 39 г (Dorofeev et al., 1979). Кроме того, в муке были выделены дефензины, обладающие антибактериальными свойствами (Odintsova et al., 2018). Вид устойчив к широкому спектру болезней и вредителей, сочетает в себе характеристики родительских форм, от которых в геном мягкой пшеницы были перенесены гены устойчивости. В частности, устойчив к желтой ржавчине (Liu et al., 2018), имеет распецифическую устойчивость к бурой ржавчине (Goncharov et al., 2020), обладает высокой устойчивостью к большой злаковой тле (*Sitobion avenae* F.) (Radchenko, 2000). В то же время вид имеет и недостатки: невысокая продуктивность, трудный обмолот, ломкий колос, очень крепкая клейковина (Dorofeev et al., 1979).

Благодаря своему богатому набору ценных характеристик, вид *T. kiharae* вовлекают в селекционные работы (Orlovskaya et al., 2008, 2018; Lapochkina et al., 2021). Цель таких работ – обогащение генетического разнообразия *T. aestivum* L. Тем не менее при скрещивании *T. kiharae* с мягкой пшеницей возникает ряд сложностей, требующих особого внимания.

Скрещиваемость *T. kiharae* с сортами мягкой пшеницы колеблется в зависимости от реципиента и направления скрещивания от 9 до 80% (Orlovskaya et al., 2008).

Растения поколения F_1 имеют низкий уровень фертильности. На этот показатель большое влияние оказывают как реципиент, так и направление скрещивания. Уровень фертильности колеблется от 1 до 14% (Aslam et al., 2025; Osipova et al., 2025). Установлено, что у гибридов F_1 , полученных в результате скрещивания гексаплоидных сортов пшеницы с *T. kiharae*, мейоз проходит с нарушениями (Orlovskaya et al., 2020; Aslam et al., 2025).

У *T. kiharae* был изучен ген *Ph1*, который отвечает за гомологичную конъюгацию хромосом в процессе мейоза. Установлено, что активность этого гена у данного вида снижена, что увеличивает количество хромосомных перестроек в потомстве гибридов с мягкой пшеницей (Aslam et al., 2025).

Анализ хромосомных aberrаций у интрогрессивных линий мягкой пшеницы, полученных с использованием *T. kiharae* (Родина/*T. kiharae*), выявил замещения на хромосомах $2A(2A^1)$, $5B(5G)$ и $6B(6G)$. Также наблюдались транслокации: $T7A^1S:7AL$, $T3BS:3GL$, $T2GS:2BL$, $T4DL:4A^1L$. Установлено, что дистальная часть длинного плеча хромосомы $6D$ была перенесена в длинное плечо хромосомы $6G - T6GS.6GL:6DL$. В линиях, полученных из комбинации ($J1353/T. kiharae$), были идентифицированы следующие замещения: $1D(1D^{sq})$, $1A(1A^1)$, $2A(2A^1)$, $2B(2G)$, $3A(3A^1)$, $3B(3G)$, $2D(2D^{sq})$, $4D(4D^{sq})$, $5D(D^{sq})$, $6B(6G)$, $6D(6D^{sq})$, $7B(7G)$, $7D(7D^{sq})$. Проведенные исследования показали, что на тип и степень выраженности хромосомных перестроек влияет выбор реципиента (Badaeva et al., 2010).

Исследование цитологии и хромосомных aberrаций в интрогрессивных линиях мягкой пшеницы, где в качестве материнских растений использовался вид *T. kiharae* (*T. kiharae*/Фестивальная, *T. kiharae*/Саратовская 29), обнаружило ряд изменений. Это замещение $2G/2B$, транслокации $T2AtS:2AL$, $T3GS-3BS.3BL$, $T5GS.5GL-5BL$, а также другие перестройки хромосом. Было замечено, что хромосомы $1A$, $1B$, $2A$, $5B$ и $6A$ демонстрировали наиболее высокую частоту интрогрессии. Напротив, чужеродный генетический материал не был выявлен в хромосомах $4A$ и $4B$. Большинство линий с интрогрессией характеризовались высокой цитологической стабильностью, на что указывал мейотический индекс в пределах 88,18–93,0% (Orlovskaya et al., 2020).

Изучение устойчивости линий мягкой пшеницы, полученных с использованием *T. kiharae*, к желтой ржавчине и мучнистой росе в сочетании с анализом хромосомных перестроек выявило, что линии с замещениями $2B(2G)$ и $6B(6G)$ имеют комплексную устойчивость к обоим патогенам. В то же время линии, несущие замещения $2A(2A^1)$, $6B(6G)$, а также транслокацию дистального участка длинного плеча хромосомы $5G$ в длинное плечо хромосомы $5B$, оказались устойчивыми к желтой ржавчине, но восприимчивыми к мучнистой росе. Установлено, что при отборе на фенотипический признак выделяется генотип с определенными хромосомными перестройками (Badaeva et al., 2000).

Схожие результаты получили по линии яровой мягкой пшеницы $L960$ ($C68/T. kiharae//C70/3/C68$). У нее были идентифицированы два замещения: $2A^1(2A)$ и $4G(4B)$, а также транслокации $T3BS.3GL$ и $T2D^{(T. aestivum)}S.2D^{(T. kiharae)}L$ (Baranova et al., 2024).

Анализ показателей качества линий мягкой пшеницы, полученных с использованием *T. kiharae*, продемонстрировал, что у большинства интрогрессивных линий, содержащих аллели локусов *Glu-1* от *T. kiharae*, наблюдается улучшение стекловидности, а также повышение содержания белка и клейковины по сравнению с родительскими сортами пшеницы (Orlovskaya et al., 2018). Установлено, что интрогрессивные формы озимой мягкой пшеницы, содержащие хроматин от *T. kiharae*, демонстрируют высокое содержание белка – на уровне «отличного улучшителя» ($> 16\%$). Зерно этих форм характеризуется пониженной натурой, а мука из него имеет зольность 0,56–0,57, что соответствует первому классу. В целом линии мягкой пшеницы с интрогрессиями генетического материала *T. kiharae* по физическим характеристикам муки, теста и хлебопекарным свойствам демонстрируют показатели, сопоставимые с классами «ценная» и «филлер» (Abugaliyeva, Savin, 2018).

Известно, что увеличение синтеза высокомолекулярных белковых соединений (НМВ-GS) в зерне положительно сказывается на хлебопекарных характеристиках муки. Вид *T. kiharae* имеет 7 НМВ-GS, в то время как у традиционных сортов мягкой пшеницы определено только 4 высокомолекулярных компонента. Это дает основания полагать, что *T. kiharae* может стать ценным ресурсом для повышения показателей качества (Vorotyntseva, 2021).

Эффективность использования данного вида в селекционной работе доказана созданием ряда перспективных линий и сорта яровой мягкой пшеницы 'Памяти Май-стренко' (Rang (к-47098, Швеция)/Л.10(Саратовская 29/амфилоид (*T. timopheevii*/Ae. *tauschii*)) в ИЦиГ СО РАН (Laikova et al., 2013). К сожалению, этот сорт не включен в Госреестр селекционных достижений РФ, несмотря на его устойчивость к комплексу заболеваний и отличные показатели качества.

Цель данной работы состояла в оценке влияния генетического материала *T. kiharae* на комплекс хозяйственно ценных признаков у линий яровой мягкой пшеницы, полученных на базе сортов поволжского эко-типа.

Материалы и методы

Объектами изучения стали оригинальные линии яровой мягкой пшеницы GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53), созданные в Федеральном аграрном научном центре Юго-Востока (ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов), а также образец *T. kiharae* (к-47897) и сорта: 'Саратовская 68' (к-63211), 'Добрыня' (к-64252), 'Саратовская 76' (к-67001).

Экспериментальная работа проводилась в течение четырех лет (2022–2025 гг.) на базе ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов. Почва – выщелоченный чернозем, предшественник – черный пар. Исследования включали в себя ряд последовательных этапов.

Метеорологические условия вегетационных периодов в годы исследования заметно варьировали (рис. 1).

Наиболее благоприятные условия по влагообеспеченности и температурному режиму отмечались в 2022 г. (гидротермический коэффициент (ГТК): май – 0,8; июнь – 0,55; июль – 1,1; август – 0,2) и 2023 г. (ГТК: май – 0,8; июнь – 1,1; июль – 0,6; август – 0,4). В 2024 г. наблюдалась засуха (ГТК: май – 0,1; июнь – 0,8; июль – 0,1; август – 0,2), а в 2025 г. отличался значительным количеством осадков

ливневого типа с высокими температурами в фазы цветения и колошения (ГТК: май – 1,1; июнь – 0,8; июль – 0,5; август – 0,5).

На начальном этапе (2011 г.) проводилось скрещивание сорта 'Саратовская 68' с образцом *T. kiharae* (к-47897), предоставленным доктором биологических наук, профессором С. А. Степановым (Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского).

Потомство F_1 оценивали на устойчивость к бурой ржавчине на стадии проростков. В связи с тем, что растения поколения F_1 оказались стерильными, провели насыщающее скрещивание сортом 'Добрыня'. Все полученные гибриды оценивались на искусственном инфекционном фоне на устойчивость к бурой ржавчине, восприимчивые генотипы браковались.

На втором этапе из гибридной комбинации Саратовская 68/*T. kiharae*//Добрыня/3/Добрыня получена линия GEN2021-520 (Л33), а из комбинации 'Саратовская 68'/*T. kiharae*//Добрыня/3/Добрыня/4/Добрыня – линия GEN2018-640 (Л53) с последующим доведением их до поколения F_{12} .

Цитологическая стабильность линий оценивалась подсчетом хромосом в клетках кончиков корней на стадии метафазы митотического деления. Предварительная обработка корешков проводилась фиксатором (96-процентный этанол, ледяная уксусная кислота, 3:1). Окрашивание выполнялось реактивом Шиффа (Pausheva, 1988). Для каждой линии анализировалось 50 метафазных пластинок. Анализ проводился с использованием микроскопа Axio Scope A 1 (Carl Zeiss) с объективом N-ACHROPLAN 40x/0,65.

На третьем этапе проводилась оценка линий GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53) по устойчивости к комплексу заболеваний, продуктивности и качественным показателям путем сравнения с сортами-реципиентами для определения влияния интрогрессии и со стандартом 'Саратовская 76', чтобы оценить селекционную значимость этих линий.

Посев проводился сеялкой ССФК-7 на семирядковых делянках площадью 7 м² в 3-кратной повторности с нормой высева 400 зерен/м². Уборка урожая осуществлялась комбайном Wintersteiger Classic Plus.

Материал оценивался на устойчивость к болезням (*Puccinia tritica*. f. sp. *tritici* Erikss., *P. graminis* Rers. f. sp. *tritici* Erikss. et Henn., *P. striiformis* West. f. sp. *tritici* и *Blu-*

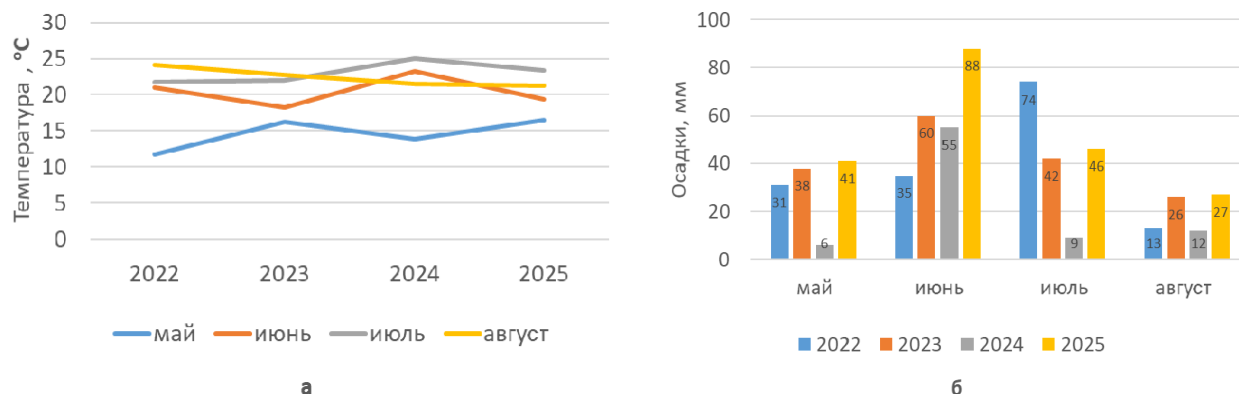


Рис. 1. Погодные условия эксперимента (Саратов, 2022–2025 гг.): а) средняя месячная температура воздуха; б) месячная сумма осадков

Fig. 1. Weather conditions during the experiment (Saratov, 2022–2025): а) mean monthly air temperatures; б) monthly precipitation amounts

meria graminis (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal) в полевых условиях на естественном инфекционном фоне (ФАНЦ Юго-Востока, Саратов, 2022–2025 гг.) и искусственно созданном фоне в фитотроне (для бурой ржавчины) (Всероссийский институт защиты растений – ВИЗР, Санкт-Петербург, 2019 г.). Резистентность к *Puccinia tritica* оценивалась с использованием шкалы Mains – Jackson (Mains, Jackson, 1926). Оценка устойчивости к популяции *P. graminis* f. sp. *tritici* проводилась с использованием модифицированной шкалы Кобба (Roelfs et al., 1992). Для выявления реакции на заражение *Blumeria graminis* f. sp. *tritici* применялась шкала Mains – Dietz (Mains, Dietz, 1930).

Изучение линий и их родительских форм на признаки, имеющие селекционную значимость (высота растений, устойчивость к полеганию, продолжительность межфазных периодов, масса 1000 зерен и др.), проводили согласно методике, разработанной Госсорткомиссией РФ (Fedin, 1989).

Электрофорез глиадиновых белков у линий GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53) проведен в лаборатории

Результаты и обсуждение

Создание и описание линий яровой мягкой пшеницы GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53)

Линии GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53) получены от скрещивания сорта ‘Саратовская 68’ и вида *T. kiharae* и последующего насыщающего скрещивания сортом ‘Добрыня’. Линии различаются по количеству беккроссов. Сорт ‘Саратовская 68’ (var. *erythrospermum* (Körn.) Mansf.) использовался как материнская форма. Сорт сильно поражается бурой ржавчиной из-за наличия неэффективного гена *Lr10* (Gulyaeva et al., 2020). Восприимчив к пыльной и твердой головне.

Сорт ‘Добрыня’ (var. *lutescens* (Alef.) Mansf.) был взят в качестве отцовской формы при скрещивании гибридов F_1 и для беккроссирования. Толерантен к комплексу вирусов, особенно к вирусу желтой карликовости ячменя (рис. 2). Восприимчив к пыльной и твердой головне. Содержит *Lr19/Sr25*-гены устойчивости к бурой и стеблевой ржавчинам (Baranova et al., 2021).



Рис. 2. Колосья и зерновки: 1 – сорт яровой мягкой пшеницы ‘Саратовская 68’; 2 – сорт яровой мягкой пшеницы ‘Добрыня’; 3 – линия GEN2021-520 (Л33); 4 – линия GEN2018-640 (Л53); 5 – *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. (к-47897)

Fig. 2. Ears and grains: 1 – spring bread wheat cv. ‘Saratovskaya 68’; 2 – spring bread wheat cv. ‘Dobrynya’; 3 – line GEN2021-520 (L33); 4 – line GEN2018-640 (L53); 5 – *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch. (k-47897)

клеточной селекции ФАНЦ Юго-Востока по методике, принятой в ВИР (Коняев, 2000). Анализ спектров и их графическое исполнение проведены в Институте общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва. Определение качественных характеристик зерна проводили в ФАНЦ Юго-Востока (Саратов) по стандартной методике Госсорткомиссии (Fedin, 1989). Содержание белка определяли на анализаторе Infratec TM 1241 (Дания). Показатели качества и количества сырой клейковины измеряли на приборе ИДК-ЗМ (Россия). Реологические свойства теста исследовали на альвеографе Chopin (Франция), оценивая упругость (P), соотношение упругости к растяжимости (P/L) и общую силу муки (W). Была проведена пробная выпечка хлеба с оценкой объема, пористости и цвета мякиша. Статистическая обработка данных выполнена с помощью пакета программ Agros-2.10.

В 2011 г. в полевых условиях в питомнике гибридизации скрестили сорт ‘Саратовская 68’ с *T. kiharae*, в результате чего получено 11 гибридных зерен, при этом завязываемость составила 52%.

Гибриды F_1 , выращенные в фитотроне, показали всхожесть 82%. У растений F_1 колосья были остистыми, без воскового налета. Отличительной чертой являлись опушенные колосковые чешуи, в отличие от сорта ‘Саратовская 68’, у которого опушение отсутствовало. Окраска колоса оказалась сходной с *T. kiharae*. Стебель также не имел воскового налета, однако узлы соломины опушены, что указывает на наличие признаков, присущих *T. kiharae*.

По данным морфологического анализа, линии отнесены к разновидности var. *lutescens*. Куст полупрямостоячий. Соломина слабо развита, со слабым восковым налетом. Флаговый лист также со слабым восковым налетом.

том. Колос веретеновидный, средней плотности, белый, прочный, безостый, не имеет опушения колосковых чешуй (данный признак наблюдался у гибридов F_1) (см. рис. 2). Обмолот легкий. Зерно удлинненное, красное. Масса 1000 зерен: GEN2021-520 (Л33) – 27–34 г, GEN2018-640 (Л53) – 28–37 г.

Оценка устойчивости гибридов F_1 к бурой ржавчине на стадии проростков выявила полную восприимчивость ($IT = 3$). Поражение растений F_1 , предположительно, обусловлено взаимодействием генов их геномного состава ($AA^{kih}BGDD^{kih}$) и супрессией генов устойчивости к *Puccinia triticina*.

Так как растения F_1 имели высокую степень стерильности, что согласуется с литературными данными (Orlovskaya et al., 2020; Aslam et al., 2025), их скрестили с сортом 'Добрыня'.

Оценка устойчивости к возбудителю бурой ржавчины у гибридов F_1BC_1 в комбинации Саратовская 68/*T. kiharae*//Добрыня показала, что растения имели тип реакции $IT = 0/3$. Это, предположительно, связано с расщеплением по генам-супрессорам устойчивости к бурой ржавчине из-за нестабильности геномного состава. Данный вывод требует дальнейшей проверки.

Выделенные из поколения F_1BC_1 в комбинации Саратовская 68/*T. kiharae*//Добрыня, устойчивые к бурой ржавчине растения были беккроссированы сортом 'Добрыня'. В гибридной комбинации С68/*T. kiharae*//Добрыня/3/Добрыня выделено элитное растение – родоначальник линии GEN2021-520 (Л33). Из комбинации Саратовская 68/*T. kiharae*//Добрыня/3/Добрыня/4/Добрыня была отобрана линия GEN2018-640 (Л53).

У полученных линий проанализировали числа хромосом. Каждая из исследованных линий обладает полным 42-хромосомным набором (рис. 3, а, б). Линии характеризовались высокой цитологической стабильностью, на что указывал мейотический индекс в пределах 89,6–91,2%, то есть процент нормальных тетрад (рис. 3, с) был выше, чем тетрад с нарушениями (рис. 3, d). Для выявления потенциальных хромосомных перестроек планируется проведение FISH- и GISH-анализов.

Оценка линий по устойчивости к болезням

Линии GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53) оценивались на устойчивость к комплексу патогенов на естественном инфекционном фоне. Наблюдалась вариабельность проявления болезней и состава патогенов по годам, что объяснялось как метеорологическими условиями, так и присутствием в популяции вирулентных рас. Так, бурая ржавчина фиксировалась ежегодно, однако наибольшую степень развития продемонстрировала

в 2022 и 2023 г., достигая 30–40% поражения у восприимчивых сортов. Стеблевая ржавчина наиболее интенсивно проявилась в 2022 г., восприимчивые сорта поражались на 10–15%. Заметное развитие мучнистой росы и желтой ржавчины отмечалось в 2025 г. Все это позволило оценить изучаемые линии на комплекс патогенов на естественном инфекционном фоне (табл. 1).

Исследования генотипов на их устойчивость к возбудителям болезней в условиях естественного заражения имеют определенные ограничения. К ним относится среди прочего зависимость от погодных условий, состава популяции патогенов и других переменных, что ухудшает точность определения степени устойчивости. В связи с этим довольно распространенной практикой является тестирование образцов в искусственно созданных условиях заражения. Такой подход дает возможность не только регулировать условия, при которых происходит инфицирование растений, но и точно определять состав патогенов, используемых для инокуляции.

Изучаемые линии протестировали на устойчивость к бурой ржавчине на искусственных инфекционных фонах с использованием тест-клонов (Т-К1, Т-К2, Т-К3) и популяций патогена (П_Сар, П_Кр, П_Чел, П_Дар), различающихся по генам вирулентности (Gulyaeva et al., 2020).

Установлено полное отсутствие симптомов поражения ($IT = 0$) у линии GEN2021-520 (Л33) при заражении всеми использованными тест-клонами и популяциями патогена, в отличие от сортов 'Саратовская 68' ($IT = 3-4$ на Т-К1, Т-К2, Т-К3 и П_Сар) и 'Добрыня' ($IT = 3$ на Т-К2 и П_Сар) (см. табл. 1).

Линия GEN2018-640 (Л53) также показала устойчивость к большинству популяций и тест-клонов, за исключением Т-К2 (Тамбовская обл., 2016 г.). Восприимчивость GEN2018-640 (Л53) к Т-К2, в отличие от линии GEN2021-520 (Л33), предположительно, вызвана потерей части интрогрессированного материала от *T. kiharae* из-за дополнительного беккросса и последующего отбора. Обе линии оказались устойчивы к мучнистой росе и желтой ржавчине (см. табл. 1).

Идентификация генов устойчивости к *Puccinia triticina* и *P. graminis*

Исследование генов устойчивости *Lr* и *Sr* в линиях, полученных с участием *Triticum kiharae*, имеет свои особенности: данный вид может нести устойчивость к комплексу патогенов как из геномов *T. timopheevii*, так и от D-генома *Aegilops tauschii*.

В D-геноме мягкой пшеницы локализованы гены устойчивости к бурой ржавчине (*Lr1*, *Lr2*, *Lr15*, *Lr21*, *Lr22*, *Lr32*, *Lr34*, *Lr39*, *Lr42*), к стеблевой ржавчине (*Sr33*, *Sr45*, *Sr46*),

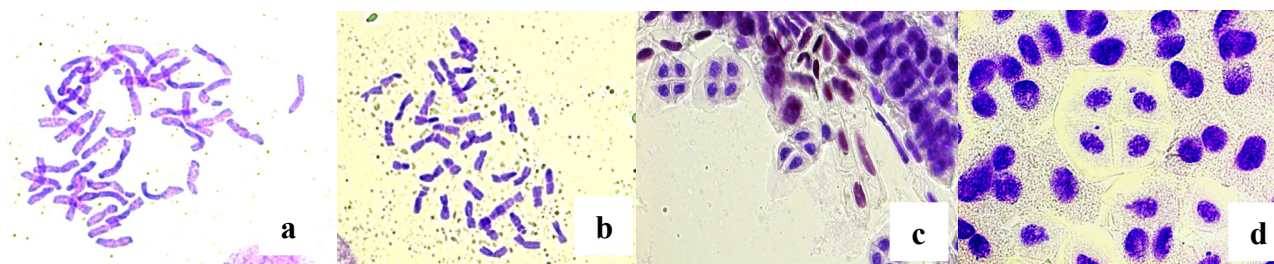


Рис. 3. Кариотипы линий GEN2021-520 (Л33) (а) и GEN2018-640 (Л53) (б); стадия тетрад в микроспорогенезе у линий мягкой пшеницы: с – без нарушений, d – тетрада с двумя микроядрами

Fig. 3. Karyotypes of the GEN2021-520(L33) (a) and GEN2018-640 (L53) (b) lines; the tetrad stage in the lines' microsporogenesis: without disorders (c), and a tetrad with two micronuclei (d)

Таблица 1. Характеристика линий GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53) и их родительских форм по устойчивости к патогенам**Table 1.** Characterization of the GEN2021-520 (L33) and GEN2018-640 (L53) lines, and their parent forms according to their resistance to pathogens

Образец / Accession	Тип реакции на заражение изолятами и популяциями / Type of the reaction to the infection caused by isolates and populations							
	<i>Puccinia triticina</i>							
	ППУ, % / тип реак- ции, балл	Т-К1	Т-К2	Т-К3	П_Сар	П_Кр	П_Чел	П_Даг
<i>Triticum kiharae</i>	0	–	–	–	–	–	–	–
‘Саратовская 68’	40/3	3-4	3-4	3-4	3-4	–	–	–
Добрыня	15/2-3	0	3	0	3	0	0	0
‘Саратовская 76’	20/3	–	–	–	–	–	–	–
GEN2021-520 (Л33)	0	0	0	0	0	0	0;	0
GEN2018-640 (Л53)	0	0	3	0	0	0	0	0
	Тип реакции на заражение популяциями / Type of the reaction to the infection caused by populations							
	<i>Puccinia graminis</i>		<i>Puccinia striiformis</i>		<i>Blumeria graminis</i>			
<i>T. kiharae</i>	0		0		0			
‘Саратовская 68’	3		3 ед.		3/20			
‘Добрыня’	3		0		3/1			
‘Саратовская 76’	3		0		2 ед.			
GEN2021-520 (Л33)	3		0		0			
GEN2018-640 (Л53)	3		0		0			

Примечание: ППУ – пораженность в полевых условиях; популяции и изоляты: Т-К1 – тест-клон, Челябинская обл., 2017 г.; Т-К2 – тест-клон, Тамбовская обл., 2016 г.; Т-К3 – тест-клон, Краснодарский край, 2017 г.; П_Сар – саратовская популяция; П_Кр – краснодарская популяция; П_Чел – челябинская популяция; П_Даг – дагестанская популяция. Прочерки в таблице означают, что соответствующие образцы не анализировали

Note: ППУ is field infestation rate; populations and isolates: T-K1 is a test clone from Chelyabinsk Province (2019), T-K2 is a test clone from Tambov Province (2016), T-K3 is a test clone from Krasnodar Territory (2017), П_Сар is the Saratov population, П_Кр is the Krasnodar population, П_Чел is the Chelyabinsk population, and П_Даг is the Dagestan population. Dashes in the table mean that the corresponding accessions were not analyzed

желтой ржавчине (Yr28) и мучнистой росе (Pm2, Pm19, Pm34, Pm35, Pm38). Также отмечен перенос генов устойчивости к септориозу.

Из AG-геномов *Triticum timopheevii* в мягкую пшеницу интрогрессированы гены, обеспечивающие защиту от бурой ржавчины: *Lr18* (транслокация 5BS.5BL-5G#1L), *Lr50* (локализован на 2BL), *LrTt1* (хромосома 2A), *LrTt2* (5BL) и *LrSelG12* (3BL); гены устойчивости к мучнистой росе (Pm6, Pm27, Pm37) и стеблевой ржавчине (Sr36, Sr37) (Gultyaeva et al., 2014).

ПЦР-анализ с 17 ДНК-маркерами *Lr*-генов выявил у линии GEN2021-520 (Л33) наличие генов *Lr19*, *Lr3* и *Lr28*(*LrKih*?) (Gultyaeva et al., 2020). Маркер SCS421, используемый для определения гена *Lr28*, переданного от *Aegilops speltoides* Tausch, также обнаружен у образцов *Triticum timopheevii* и *T. kiharae*. Это может указывать на родственную связь геномов S и G (Gultyaeva et al., 2014).

У линии GEN2018-640 (Л53) выявили только наличие генов *Lr3*+*Lr19* (Gultyaeva et al., 2020), ген *Lr19* обе линии получили от сорта ‘Добрыня’. Подтверждением

наличия *Lr19* является желтая мука у этих линий, поскольку данный признак тесно связан с этим геном (Prins et al., 1996).

Хотя ген *Lr19* утратил свою эффективность в регионах возделывания сортов пшеницы с этим геном, но в комбинации с другими *Lr*-генами он еще довольно эффективен (Gultyaeva et al., 2025).

Имеющийся набор молекулярных ДНК-маркеров оказался неполным для выявления других *Lr*-генов, перенесенных от *T. kiharae*. Вероятная причина этого заключается в том, что данные гены пока не были выявлены и к ним не подобраны маркеры.

У изучаемых линий также проводили определение генов устойчивости к стеблевой ржавчине (*Sr*-гены) с использованием ДНК-маркеров для генов *Sr2*, *Sr25*, *Sr26*, *Sr28*, *Sr31*, *Sr32*, *Sr35*, *Sr36*, *Sr38*, *Sr57*. Выявлено наличие только гена *Sr25*, сцепленного с геном *Lr19*. Так как линии оказались восприимчивы к местной популяции стеблевой ржавчины, существует вероятность присутствия неидентифицированных генов от *T. kiharae*. К такому вы-

воду мы пришли, основываясь на предыдущих наших исследованиях (Baranova et al., 2024). Линия Л960, созданная с использованием вида *T. kiharae* (одной из родительских форм линий GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53), показала расоспецифическую устойчивость к стеблевой ржавчине, предположительно, обусловленную неустановленными генами от *T. kiharae* (Baranova et al., 2024). Идентификация *Lr*- и *Sr*-генов частично проводилась в рамках реализации исследовательского проекта, поддержанного грантом РФФИ № 18-016-00170А.

Учитывая, что исследуемые линии устойчивы к бурой ржавчине и мучнистой росе, и принимая во внимание литературные данные о том, что резистентные к этим патогенам генотипы, созданные с использованием как *T. timopheevii*, так и *T. kiharae*, нередко содержат хромосомные перестройки (замещения или транслокации), затрагивающие хромосомы 6G и 6B (Badaeva et al., 2010), высока вероятность наличия генетического материала от 6G *T. kiharae* в линиях GEN2018-640 (Л53) и GEN2021-520 (Л33).

Электрофоретический анализ глиадиновых белков

Ключевыми факторами, определяющими качество хлеба, являются запасные белки эндосперма пшеницы: глиадин и глютеинин.

Исследований по глиадинам у *T. kiharae* и его гибридов с мягкой пшеницей довольно мало (Brown-Guedira et al., 1996). Гены, отвечающие за синтез глиадинов, запасных белков зерна, расположены в коротких плечах хромосом 1-й и 6-й гомеологических групп. Глиадиновые электрофоретические профили полиморфны и регулируются множеством аллелей шести не связанных друг с другом *Gli*-кодирующих локусов: *Gli-A1*, *Gli-B1*, *Gli-D1*, *Gli-A2*, *Gli-B2*, *Gli-D2*. Каждый локус контролирует синтез нескольких компонентов глиадина, которые наследуются сцепленными группами, получившими название блоков компонентов глиадина. Наследуемость полипептидов глиадина блоком обусловлена кластерами генов, которые сцеплены на хромосоме и представляют собой практически не рекомбинирующие локусы. Компоненты, входящие в блок и контролируемые одним локусом (кластером генов), различаются подвижностью в электрическом поле, интенсивностью окраски и молекулярной массой. Аллели локусов *Gli-1* и *Gli2* обозначаются буквами латинского алфавита согласно международной номенклатуре (Novoselskaya-Dragovich, 2015). Аллели этих локусов могут служить генетическими маркерами агрономических характеристик, таких как количество содержания белка и клейковины в зерне, число зерен в колосе, масса 1000 зерен и др. В связи с этим электрофоретический анализ глиадинов широко применяется в генетических исследованиях пшеницы для изучения биоразнообразия и картирования генов (Khrunov et al., 2011).

Как показано в работе А. Ю. Новосельской-Драгович (2015), аллельный состав *Gli*-кодирующих локусов мягкой пшеницы хорошо изучен, но генетическая детерминация глиадиновых компонентов у *T. kiharae* остается неизвестной. В этой связи был проведен анализ изучаемых линий GEN2018-640 (Л53), GEN2021-520 (Л33) и родительских форм (сортов 'Добрыня' и 'Саратовская 68') по спектру глиадинов (рис. 4). Установлено, что только по одной из шести хромосом (а именно в локусе *Gli-B2*) линии отличаются от родителей.

На рисунке 4 хорошо видно, что линия GEN2015-640 (Л53) четко отличается от родителей, в том числе от наи-

более близкородственного сорта 'Добрыня', и это различие затрагивает именно компоненты хромосомы 6B (блок *Gli-B2*). Аналогичная картина и с линией GEN2021-520 (Л33). Проблема при определении аллельного состава глиадинов заключается в том, что компоненты разных блоков зачастую накладываются друг на друга, создавая эффект наличия единственного компонента, что может привести к неверной интерпретации результатов. В частности, ключевой компонент в γ -зоне (отмечен на рис. 4 красной стрелкой) характерен и для сорта 'Саратовская 68'. Однако у 'Саратовской 68' этот компонент входит в состав блока компонентов *Gli-A1m* (хромосома 1A), в то время как у сорта 'Добрыня' и обеих изучаемых линий хромосома 1A контролирует другой блок и его компоненты находятся в других зонах спектра.

Анализ электрофореграмм высокомолекулярных субъединиц глютеина у интрогрессивных линий *T. aestivum*/*T. kiharae* и их родительских форм позволил выявить генотипы, несущие аллели локусов *Glu-1* от *T. kiharae*, отсутствующие у *T. aestivum*. Было установлено, что *T. kiharae* экспрессирует семь высокомолекулярных субъединиц глютеина, в отличие от исходных сортов мягкой пшеницы, экспрессирующих только четыре. Это указывает на потенциал использования электрофореза глютеина для идентификации линий, содержащих хроматин от *T. kiharae*, и отбора линий с улучшенными хлебопекарными свойствами (Orlovskaya et al., 2018).

Если верхний компонент нового блока интерпретируется однозначно и указывает на наличие компонента от *T. kiharae*, то расположение двух нижних компонентов (на схеме глиадиновых блоков они обозначены пунктирной линией) мы можем определить только предположительно (см. рис. 4). Наличие этих компонентов мы можем предположить по аналогии со схемами других блоков компонентов хромосомы 6B, а также по наличию компонентов в соответствующей зоне у донора – *T. kiharae* (на рис. 4 эти компоненты на спектре *T. kiharae* отмечены красными точками). Окончательно структуру этого нового блока компонентов глиадина можно определить только по результатам анализирующего скрещивания, которое будет заключаться в скрещивании линий GEN2015-640 (Л53) и GEN2021-520 (Л33) с сортами 'Саратовская 68' и 'Добрыня'.

Оценка линий на хозяйственно полезные признаки

Исследования 2022–2025 гг. показали, что продолжительность межфазного периода «всходы – колошение» у линии GEN2021-520 (Л33) составила 47 суток, что значительно превышает показатели родительских форм ('Саратовская 68', 'Добрыня' и *T. kiharae*). У линии GEN2018-640 (Л53) этот период сопоставим с родительскими формами – сортами 'Саратовская 68' и 'Добрыня', но короче, чем у *T. kiharae*.

Линия GEN2021-520 (Л33) продемонстрировала значимое отличие от сорта-стандарта по Нижневолжскому региону 'Саратовская 76' по продолжительности периода «всходы – колошение». В то же время линия GEN2018-640 (Л53) показала аналогичный период развития, сопоставимый со стандартом (табл. 2).

Линии GEN2018-640 (Л53) и GEN2021-520 (Л33) продемонстрировали схожие значения высоты (86,3 и 89,8 см соответственно). Эти показатели были близки к высоте родительских форм: 'Саратовская 68' (88,3 см), 'Добрыня' (89,8 см) и *T. kiharae* (88,9 см), а также к высоте стандарта 'Саратовская 76' (89,0 см).

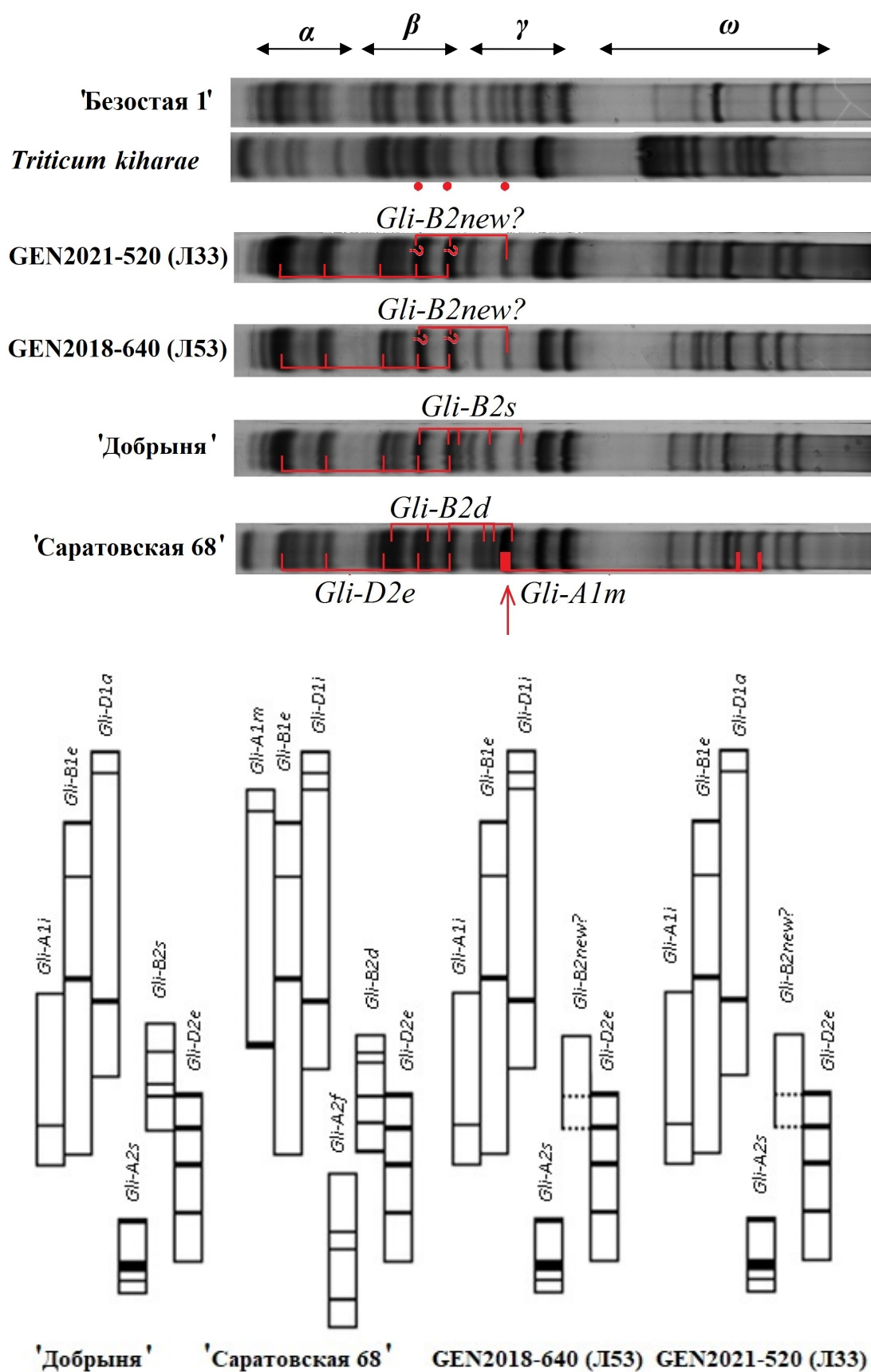


Рис. 4. Электрофореграмма спектров глиаина у исследуемых образцов;
 ω , γ , β , α – общепринятые обозначения зон спектра

Fig. 4. Electropherogram of gliadin patterns in the studied accessions;
 ω , γ , β , and α are conventional designations of the spectral regions

Таблица 2. Характеристика линий GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53) и их родительских форм по морфологическим и фенологическим параметрам, а также по продуктивности зерна (Саратов, 2022–2025 гг.)
Table 2. Characterization of the GEN2021-520 (L33) and GEN2018-640 (L53) lines, and their parent forms according to morphological and phenological parameters, and grain productivity (Saratov, 2022–2025)

Образец / Accession	Высота растений, см / Plant height, cm									
	2022 г.		2023 г.		2024 г.		2025 г.		среднее	CV,%
	x _{ср}	min-max	x _{ср}	min-max	x _{ср}	min-max	x _{ср}	min-max		
‘Саратовская 68’	93,0	90–94	93,0	89–94	67,0	65–69	100,0	98–105	88,3	16
<i>Triticum kiharae</i>	91,0	87–93	89,5	86–92	73,0	70–74	102,3	100–107	88,9	14
‘Добрыня’	92,0	88–94	98,0	97–102	74,0	73–77	102,0	100–106	91,5	14
GEN2018-640 (Л53)	88,0	84–90	94,0	91–96	73,0	73–76	90,0	87–95	86,3	11
GEN2021-520(Л33)	91,0	87–93	91,0	88–93	75,0	74–79	102,0	100–106	89,8	12
НСР ₀₅	NS		NS		NS		4,354		NS	
‘Саратовская 76’	94,0	92–96	88,0	86–90	73,0	70–74	101,0	99–105	89,0	13
НСР ₀₅									NS	
	Устойчивость к полеганию, балл / Lodging resistance, score									
‘Саратовская 68’	4,3	4,1–4,7	3,7	3,5–4,0	4,3	4,1–4,8	3,9	3,7–4,1	4,05a	7
<i>T. kiharae</i>	4,3	4,1–4,6	3,2	3,0–3,6	4,2	4,0–4,5	3,9	3,6–4,1	3,90a	13
‘Добрыня’	4,8	4,3–5,0	4,2	4,0–4,5	4,5	4,0–4,9	4,4	4,0–4,8	4,47c	6
GEN2018-640 (Л53)	4,5	4,3–4,6	4,2	4,0–4,5	4,3	4,0–4,5	4,3	4,0–4,7	4,32bc	3
GEN2021-520(Л33)	4,8	4,5–5,0	4,1	3,9–4,4	4,3	4,0–4,5	4,2	4,0–4,5	4,35c	7
НСР ₀₅	NS		NS		NS		NS		0,268	
‘Саратовская 76’	4,2b	4,0–4,7	3,7b	4,4–5,0	4,3b	4,1–4,6	3,9b	4,1–4,7	4,03a	7
НСР ₀₅	0,261		0,316		0,271		0,260		0,269	
	Период «всходы – колошение», дни / Germination-to-earning period, days									
‘Саратовская 68’	44	43–44	47	47–47	42	41–42	44	44–44	44,3ab	5
<i>T. kiharae</i>	46	46–46	47	47–47	43	43–43	44	44–44	45,0b	4
‘Добрыня’	43	43–44	45	45–45	42	42–42	43	43–43	43,3a	3
GEN2018-640 (Л53)	43	43–43	45	45–45	42	42–42	44	44–44	43,5a	3
GEN2021-520(Л33)	48	48–49	51	51–51	45	45–45	45	45–45	47,3c	6
НСР ₀₅									1,427	
‘Саратовская 76’	44	43–44	46	46–46	42	41–42	43	43–43	43,8a	4
НСР ₀₅									1,935	
	Масса 1000 зерен / 1000-grain weights									
‘Саратовская 68’	29,1	26–30	35,6	34–37	32,7	30–35	33,5	31–35	32,72bc	8
<i>T. kiharae</i>	27,5	26–29	31,1	30–32	31,0	30–32	29,5	28–30	29,77a	6
‘Добрыня’	29,3	27–31	36,8	34–39	37,5	35–39	33,9	31–35	34,38c	11
GEN2018-640 (Л53)	28,0	26–30	36,7	34–39	36,2	35–38	33,4	31–35	33,57c	12
GEN2021-520(Л33)	27,0	25–28	34,2	32–35	32,1	30–34	30,3	28–31	30,90a	10
НСР ₀₅									1,818	

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Образец / Accession	Высота растений, см / Plant height, cm									
	2022 г.		2023 г.		2024 г.		2025 г.		среднее	CV, %
	x _{ср}	min-max	x _{ср}	min-max	x _{ср}	min-max	x _{ср}	min-max		
‘Саратовская 76’	23,3		35,7		35,4		34,7		32,28	19
HCP ₀₅									NS	
Продуктивность зерна, кг/га / Grain productivity, kg/ha										
‘Саратовская 68’	2699		2961		2361		2893a		2728,5	10
<i>T. kiharae</i>	1188		1250		1220		1275		1233,3*	3
‘Добрыня’	3220		2558		2460		3213ab		2862,8	14
GEN2018-640 (Л53)	2924		2580		2064		2924a		2622,0	16
GEN2021-520(Л33)	2880		2516		2212		3305b		2758,3	15
HCP ₀₅	NS		NS		NS		278,1		NS	
‘Саратовская 76’	2516		2721		1998		3179		2603,5	19
HCP ₀₅									NS	

Примечание: числа в колонках, сопровождаемые различными буквами, различаются при уровне значимости 0,05, согласно множественным сравнениям по Дункану (Duncan, 1955); *min-max* – верхний и нижний предел; * – расчетная продуктивность зерна

Note: the numbers marked with different letters in the columns differ at the significance level of 0.05 according to Duncan's multiple range test (Duncan, 1955); *min-max* – upper and lower limits; * – estimated grain productivity

По сравнению с сортами ‘Саратовская 68’, ‘Саратовская 76’ и *T. kiharae*, линии GEN2018-640 (Л53) и GEN2021-520 (Л33) имели более высокую устойчивость к полеганию, сопоставимую с сортом ‘Добрыня’.

Масса 1000 зерен линии GEN2018-640 (Л53) в среднем за четыре года была сопоставима с сортом ‘Добрыня’ и незначительно превышала ‘Саратовскую 68’, но значительно превосходила *T. kiharae*. Линия GEN2021-520 (Л33) уступала родительским формам и GEN2018-640 (Л53), но была на уровне *T. kiharae*. Не были выявлены значимые различия у изучаемых линий со стандартом ‘Саратовская 76’ (см. табл. 2).

Для описания изменчивости характеристик сортов и линий за годы изучения (таких как урожайность, высота растений, масса 1000 зерен и др.) был использован коэффициент вариации (CV, %). Коэффициент вариации помогает при оценке, сорта или линии с оптимальными показателями и одновременно низкой изменчивостью считаются более ценными. По высоте растений отмечена средняя вариативность у всех изучаемых образцов (CV = 11–16%). Устойчивость к полеганию имела незначительные колебания (CV = 3–7%) у большинства генотипов, кроме *T. kiharae* (средняя вариативность, CV = 13%). Незначительная изменчивость (CV = 3–6%) у всех образцов отмечена по продолжительности межфазного периода «всходы – колошение». По массе 1000 зерен наименее вариabельными оказались ‘Саратовская 68’ (CV = 8%) и *T. kiharae* (CV = 6%), среднюю вариативность (CV = 10–12%) имели остальные генотипы. Самым вариabельным оказался сорт ‘Саратовская 76’ (CV = 19%) (см. табл. 2).

В рамках конкурсного сортоиспытания оценивалась продуктивность линий и сортов. Сравнение с образцом *T. kiharae* не осуществлялось, поскольку его низкая продуктивность была установлена ранее (в таб-

лице 2 приведена расчетная продуктивность зерна за 4 года). Ключевой задачей исследования являлось сравнение интрогрессивной линии с сортом-реципиентом. Это было необходимо для определения влияния интрогрессии от *T. kiharae* и оценки селекционной перспективности линий GEN2018-640 (Л53) и GEN2021-520 (Л33) (см. табл. 2).

Оценка продуктивности линий (GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53) и родительских сортов (‘Саратовская 68’, ‘Добрыня’) за четыре года выявила отсутствие статистически значимых различий в большинстве случаев. Исключение составил 2025 г., когда линия GEN2021-520 (Л33) превзошла сорт ‘Саратовская 68’ и линию GEN2018-640, но была на уровне сорта ‘Добрыня’.

Изменчивость продуктивности, оцениваемая коэффициентом вариации (CV), для линий GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53) достигла значений 15% и 16% соответственно. В то же время сорт ‘Саратовская 68’ продемонстрировал более стабильную урожайность с коэффициентом 10%, а сорт ‘Добрыня’ показал вариативность на уровне 14%. Сорт ‘Саратовская 76’ имел самый высокий коэффициент вариации – 19%.

Ранее проведенные исследования гибридов между *T. aestivum* и *T. kiharae* показали, что интрогрессия генетического материала от *T. kiharae* в геном мягкой пшеницы увеличивает стекловидность, содержание белка и клейковины. Однако по качеству клейковины линии *T. aestivum*/*T. kiharae* уступают исходным сортам пшеницы (Orlovskaya et al., 2018; Abugaliyeva, Savin, 2018).

Анализ хлебопекарных качеств линий GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53), а также их родительских сортов выявил отсутствие существенных различий между линиями и родителями по ИДК-3, упругости теста (P) и отношению упругости к растяжимости (P/L). Установ-

лено значительно более высокое содержание клейковины у линий GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53) по сравнению с родительскими сортами. Максимальное содержание белка в зерне продемонстрировала линия GEN2021-520 (Л33), превзойдя как родительские сорта, так и линию GEN2018-640 (Л53). Линия GEN2021-520 (Л33) также имела самую высокую «силу» муки, в то время как линия GEN2018-640 (Л53) занимала промежуточное положение между родительскими сортами и линией GEN2021-520 (Л33). По объему хлеба GEN2021-520 (Л33) показала значительно меньший объем, чем GEN2018-640 (Л53) и сорт 'Добрыня', но не отличалась от сорта 'Саратовская 68' (табл. 3).

как количество клейковины, индекс деформации клейковины (ИДК-3), упругость теста (P) и отношение упругости и растяжимости (P/L). Линия GEN2021-520 (Л33) демонстрировала значительное превышение над стандартом по содержанию белка в зерне и показателю «силы» муки, а линия GEN2018-640 (Л53) по этим показателям была на уровне стандарта. Однако по объему выпеченного хлеба линия GEN2021-520 (Л33) и стандарт не отличались между собой, но значительно уступали линии GEN2018-640 (Л53).

Факторы окружающей среды и климатические условия существенно воздействуют на характеристики показателей качества. Коэффициент вариации отражает сте-

Таблица 3. Характеристика линий GEN2021-520 (Л33), GEN2018-640 (Л53) и их родительских форм по хлебопекарным качествам, в среднем за 2022–2024 гг.

Table 3. Characterization of the GEN2021-520 (L33) and GEN2018-640 (L53) lines, and their parent forms according to baking qualities, averaged for 2022–2024

Образец / Accession	Клейковина / Gluten		Белок / Protein, %	Показание альвеографа / Dough physical trait (alveograph)			V, cm ³ / Bread volume, cm ³	Цвет мяки- ша / Crumb color
	content, %	ИДК-3 / strength		P, мм / Tenacity, mm	P/L	W, е. а. / Flour strength		
'Саратовская 68'	33,40a	84,00	16,38a	82,25	1,08	255,00a	743,5a	Белый
'Добрыня'	33,05a	78,50	15,73a	81,50	1,01	254,75a	826,3b	Желтый
GEN2018-640(Л53)	35,90bc	75,25	16,20a	85,75	0,98	325,5ab	828,8b	Желтый
GEN2021-520(Л33)	37,17c	72,00	17,60b	104,25	1,19	397,5b	688,8a	Желтый
НСР ₀₅	2,425	NS	1,010	NS	NS	96,477	81,697	
'Саратовская 76'	35,40	84,5	16,42a	103,75	1,60	288,75a	711,25a	Белый
GEN2018-640(Л53)	35,90	75,25	16,20a	85,75	1,12	325,5ab	828,75b	Желтый
GEN2021-520(Л33)	37,17	72,0	17,60b	104,25	1,19	397,5b	688,75a	Желтый
НСР ₀₅	NS	NS	0,889	NS	NS	78,621	65,18	
Коэффициент вариации / Coefficient of variation (CV, %)								
'Саратовская 68'	14	15	5	35	64	23	5	
'Добрыня'	7	12	4	18	54	24	9	
GEN2018-640(Л53)	8	9	8	22	59	21	3	
GEN2021-520(Л33)	18	21	3	58	83	36	8	
'Саратовская 76'	8	11	6	39	56	26	7	

Примечание: числа в колонках, сопровождаемые различными буквами, различаются при уровне значимости 0,05; P – упругость теста; P/L – отношение упругости теста к растяжимости; W – сила муки; V – объем хлеба

Note: the numbers marked with different letters in the columns differ at the significance level of 0.05; P is the tenacity of the dough, P/L is the ratio of the tenacity to the extensibility of the dough, W is the strength of flour, and V is the volume of bread

Хлеб, испеченный из линий GEN2018-640 (Л53) и GEN2021-520 (Л33), оценен на 4,7 и 4,3 балла соответственно, сорта 'Саратовская 68' – на 4,8 балла, сорта 'Добрыня' – на 5,0 баллов. Мякиш хлеба у линий имел желтоватый оттенок, как и у сорта 'Добрыня' (рис. 5). Органолептические и вкусовые качества также получили высокие оценки.

При сравнении линий GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53) со стандартом 'Саратовская 76' выявлено отсутствие существенных различий по таким параметрам,

пень изменчивости признака в различные годы, указывает на чувствительность признака к условиям выращивания. Было выявлено, что линия GEN2018-640 (Л53) продемонстрировала наименьшие значения коэффициента вариации в показателях содержания клейковины, ИДК-3, белка в зерне и объема хлеба, что подтверждается данными таблицы 3, а по остальным показателям была на уровне сортов-реципиентов. В свою очередь, линия GEN2021-520 (Л33) показала наибольшую вариабельность по содержанию клейковины, показателю ИДК-3,

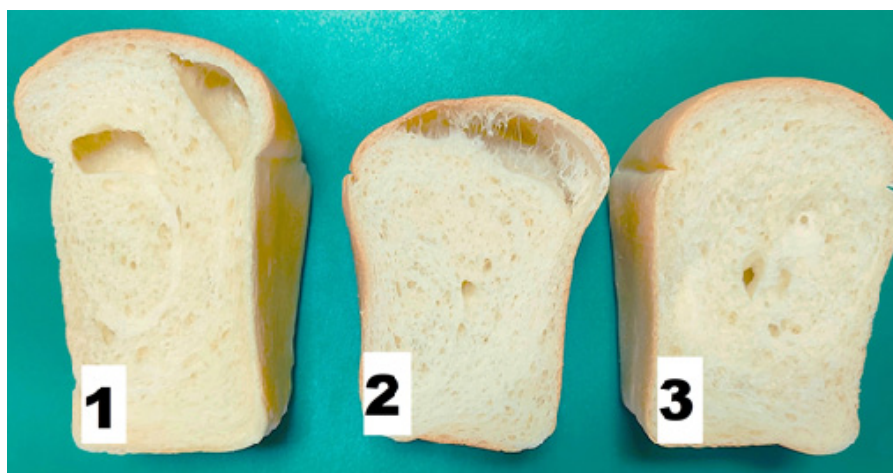


Рис. 5. Хлебец: 1 – сорт яровой мягкой пшеницы ‘Добрыня’; 2 – линия GEN2021-520 (Л33); 3 – линия GEN2018-640 (Л53)

Fig. 5. Experimental small loaf: 1 – spring bread wheat cv. ‘Dobrynya’; 2 – line GEN2021-520 (L33); 3 – line GEN2018-640 (L53)

упругости теста, соотношению упругости к растяжимости и силе муки. При этом по объему хлеба и содержанию белка в зерне ее результаты были сопоставимы с сортами-реципиентами. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что линия GEN2018-640 (Л53) отличается высокой устойчивостью к внешним условиям, включая погодные факторы, демонстрируя стабильные качественные показатели год за годом. Это выгодно отличает ее от линии GEN2021-520 (Л33), которая подвержена большей изменчивости.

Обобщая вышеизложенные результаты исследования по линиям GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53), можно констатировать, что интрогрессия хроматина от *T. kiharae* обеспечила им комплексную устойчивость к возбудителям таких заболеваний, как бурая ржавчина, мучнистая роса и желтая ржавчина. ПЦР-анализ выявил у этих линий наличие генов *Lr19*, *Lr3* и *Lr28* (*LrKih?*) у линии GEN2021-520 (Л33) и *Lr19*, *Lr3* у GEN2018-640 (Л53), но они малоэффективны против большинства рас патогена, что указывает на дополнительные *Lr*-гены от *T. kiharae*. Анализ запасных белков глинада подтвердил присутствие хроматина от этого вида в локусе Gli-B2 в γ -зоне, указывая на возможные хромосомные перестройки (замещения или транслокации), затрагивающие 6G- и 6В-хромосомы.

Изучаемые линии не отличались по высоте растений от реципиентов. Обе линии демонстрировали высокую устойчивость к полеганию. Линия GEN2021-520 (Л33) имела самый продолжительный межфазный период «всходы – колошение», однако масса 1000 зерен была значимо ниже, чем у сортов-реципиентов и линии GEN2018-640 (Л53).

Коэффициент вариации (CV) у изучаемых линий имел среднюю вариативность по высоте растений и массе 1000 зерен, слабую – по устойчивости к полеганию и длине межфазного периода «всходы – колошение»; это указывает на то, что по этим показателям эти генотипы довольно стабильны и не сильно зависят от погодных условий года, находясь на уровне сортов-реципиентов.

Однако в отношении продуктивности коэффициент вариации выявил более выраженную чувствительность изучаемых линий к погодным условиям года. Эта зависимость была заметнее по сравнению с сортами-реципиентами, в особенности с сортом ‘Саратовская 68’.

Результаты исследований косвенно указывают на то, что присутствие хроматина от *T. kiharae* у линии GEN2021-520 (Л33) приводит к заметному увеличению содержания белка, клейковины в зерне и «силы» муки, но уменьшает объем хлеба. У линии GEN2018-640 (Л53), которая отличается от линии GEN2021-520 (Л33) большим количеством беккроссов, выявлено снижение содержания белка в зерне до уровня сорта-реципиента. Также наблюдается некоторое уменьшение «силы» муки, но объем хлеба увеличился. По качеству клейковины исследуемые линии не отличались от родительских форм пшеницы.

Тем не менее есть информация, указывающая на то, что линии, полученные при участии *T. kiharae*, демонстрировали более низкие показатели качества клейковины по сравнению с родительскими формами (Orlovskaya et al., 2018). Предполагается, что данное обстоятельство может быть обусловлено количеством беккроссов с родительским сортом.

Заключение

В результате многолетней работы созданы линии GEN2021-520 (Л33) и GEN2018-640 (Л53) от скрещивания образца вида *T. kiharae* с сортами яровой мягкой пшеницы ‘Саратовская 68’ и ‘Добрыня’. Линии обладают рядом селекционно ценных признаков: устойчивостью к возбудителям бурой ржавчины, мучнистой росы, желтой ржавчины.

Установлено, что включение хроматина от *T. kiharae* в геном мягкой пшеницы значительно повышает содержание клейковины и силу муки. Количество беккроссов на мягкую пшеницу уменьшает генетическую изменчивость, что привело к снижению содержания белка до уровня сорта-реципиента, некоторому уменьшению силы муки, но увеличению объема хлеба.

Интрогрессия хроматина *T. kiharae* в геном мягкой пшеницы положительно сказалась на содержании белка у линии GEN2021-520 (Л33), уровне клейковины и силе муки. По качеству клейковины исследуемых линий не отличалось от родительских сортов.

В результате проведенных исследований отобраны перспективные линии яровой мягкой пшеницы, устойчивые к комплексу заболеваний, с улучшенным качеством зерна. Они представляют значительный интерес

для селекционной работы и уже интегрированы в существующие селекционные программы. Цель их внедрения – дальнейшее совершенствование и расширение ассортимента сортов яровой мягкой пшеницы, адаптированной к условиям юго-восточных регионов Российской Федерации.

References / Литература

- Abugaliyeva A.I., Savin T.V. The wheat introgressive form evaluation by grain biochemical and technological properties. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(3):353-362. [in Russian] (Абугалиева А.И., Савин Т.В. Биохимический состав и технологическая оценка зерна интрогрессивных форм озимой мягкой пшеницы с участием различных видов *Triticum* и *Aegilops*. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(3):353-362). DOI: 10.18699/VJ18.371
- Aslam T., Zhang T., Lian T., Zhai J., Jia J., Wang H. et al. Production, characterization, and potential utility of a newly synthesized allohexaploid wheat *Triticum kiharae*. *The Crop Journal*. 2025;13(3):681-693. DOI: 10.1016/j.cj.2025.02.015
- Badaeva E.D., Budashkina E.B., Bilinskaya E.N., Pukhalskiy V.A. Intergenomic chromosome substitutions in wheat interspecific hybrids and their use in the development of a genetic nomenclature of *Triticum timopheevii* chromosomes. *Russian Journal of Genetics*. 2010;46(7):769-785. DOI: 10.1134/S102279541007001X
- Badaeva E.D., Zelenin A.V., Prokofieva Z.D., Bilinskaya E.N., Obolenkova L.A., Pukhalskiy V.A. et al. Cytogenetic analysis of hybrids resistant to yellow rust and powdery mildew obtained by crossing common wheat (*Triticum aestivum* L., AABBDD) with wheats of the *Timopheevi* group (A¹A²GG). *Russian Journal of Genetics*. 2000;36(12):1401-1410. DOI: 10.1023/A:1009019323942
- Baranova O.A., Adonina I.G., Sibikeev S.N. Molecular cytogenetic characteristics of new spring bread wheat introgressive lines resistant to stem rust. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2024;28(4):377-386. [in Russian] (Баранова О.А., Адонина И.Г., Сибикеев С.Н. Молекулярно-цитогенетическая характеристика новых интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы, устойчивых к стеблевой ржавчине. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2024;28(4):377-386). DOI: 10.18699/vjgb-24-43
- Baranova O.A., Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Sozina I.D. Loss of effectiveness of stem rust resistance genes *Sr25* and *Sr6Ag1* in the Lower Volga region. *Plant Protection News*. 2021;104(2):105-112. [in Russian] (Баранова О.А., Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Созина И.Д. Потеря эффективности генов устойчивости к стеблевой ржавчине *Sr25* и *Sr6Ag1* на территории Нижнего Поволжья. *Вестник защиты растений*. 2021;104(2):105-112).
- Brown-Guedira G.L., Badaeva E.D., Gill B.S., Cox T.S. Chromosome substitutions of *Triticum timopheevii* in common wheat and some observations on the evolution of polyploid wheat species. *Theoretical and Applied Genetics*. 1996;93(8):1291-1298. DOI: 10.1007/BF00223462
- Dorofeev V.F., Filatenko A.A., Migushova E.F., Udachin R.A., Yakubtsiner M.M. Flora of cultivated plants. Vol. 1. Wheat (Kulturnaja flora SSSR. T. 1. Pshenitsa). D.D. Brezhnev (ed.). Leningrad: Kolos; 1979. [in Russian] (Дорофеев В.Ф., Филатенко А.А., Мигушова Э.Ф., Удачин Р.А., Якубцинер М.М. Культурная флора СССР. Т. 1. Пшеница / под ред. Д.Д. Брежнев. Ленинград: Колос; 1979).
- Dorofeev V.F., Migushova E.F. A new species of wheat *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch., the homologue of spelt. *VIR Bulletin*. 1977;(71):83. [in Russian] (Дорофеев В.Ф., Мигушова Э.Ф. Новый вид пшеницы *Triticum kiharae* Dorof. et Migusch., гомолог спельты. *Бюллетень ВИР*. 1977;(71):83).
- Duncan D.B. Multiple range and multiple F-tests. *Biometrics*. 1955;11(1):1-42. DOI: 10.2307/3001478
- Fedin M.A. (ed.). Methodology for state crop variety trials. First issue. General provisions (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vypusk pervy. Obshchaya chast). Moscow: State Commission for Crop Variety Trials; 1989. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск первый. Общая часть / под ред. М.А. Федина. Москва: Госкомиссия по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур; 1989).
- Goncharov N.P., Boguslavsky R.L., Orlova E.A., Belousova M.Kh., Aminov N.Kh., Konovalov A.A. et al. Leaf rust resistance in wheat amphidiploids. *Letters to Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;6(3):95-106. [in Russian] (Гончаров Н.П., Богуславский Р.Л., Орлова Е.А., Белоусова М.Х., Аминов Н.Х., Коновалов А.А. и др. Устойчивость амфи-пloidов пшениц к возбудителю бурой ржавчины. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;6(3):95-106). DOI: 10.18699/Letters2020-6-14
- Gulyaeva E.I., Orina A.S., Gannibal P.B., Mitrofanova O.P., Odintsova I.G., Laikova L.I. The effectiveness of molecular markers for the identification of *Lr28*, *Lr35*, and *Lr47* genes in common wheat. *Russian Journal of Genetics*. 2014;50(2):131-139. DOI: 10.1134/S1022795414020069
- Gulyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Zuev E.V. The potential of modern Russian winter and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties for genetic protection against leaf and yellow rust. *Agricultural Biology*. 2025;60(3):485-502. [in Russian] (Гультеяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Зуев Е.В. Потенциал современных российских сортов озимой и яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) для генетической защиты от бурой и желтой ржавчины. *Сельскохозяйственная биология*. 2025;60(3):485-502). DOI: 10.15389/agrobiology.2025.3.485rus
- Gulyaeva E.I., Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Shaydayuk E.L. Enlargement of genetic diversity of spring bread wheat resistance to leaf rust (*Puccinia triticina* Eriks.) in Lower Volga region. *Agricultural Biology*. 2020;55(1):2744. [in Russian] (Гультеяева Е.И., Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Шайдаюк Е.Л. Расширение генетического разнообразия сортов яровой мягкой пшеницы по устойчивости к бурой ржавчине (*Puccinia triticina* Eriks.) в Нижнем Поволжье. *Сельскохозяйственная биология*. 2020;55(1):2744). DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.27rus
- Khrunov A.A., Fisenko A.V., Beletsky S.L., Dragovich A.Yu. Studying the relationship between the composition of gliadins and agronomically valuable traits in bread wheat (Izucheniye vzaimosvyazi sostava gliadinov i khozyaystvenno tsennykh priznakov myagkoy pshenitsy). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2011;(2):11-19. [in Russian] (Хрунов А.А., Фисенко А.В., Белецкий С.Л., Драгович А.Ю. Изучение взаимосвязи состава глиадинов и хозяйственно ценных признаков мягкой пшеницы. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2011;(2):11-19).
- Konarev V.G. (ed.). Identification of varieties and registration of crop genetic diversity according to seed proteins (Identifikatsiya sortov i registratsiya genofonda kulturnykh rasteniy po belkam semyan). St. Petersburg: VIR; 2000. [in Russian] (Идентификация сортов и регистрация генофонда культурных растений по

- белкам семян / под ред. В.Г. Конарева. Санкт-Петербург: ВИР; 2000).
- Laikova L.I., Belan I.A., Badaeva E.D., Rosseeva L.P., Shepelev S.S., Shumny V.K. et al. Development and study of spring bread wheat variety Pamyati Maystrenko with introgression of genetic material from synthetic hexaploid *Triticum timopheevii* Zhuk. × *Aegilops tauschii* Coss. *Russian Journal of Genetics*. 2013;49(1):103-112. [in Russian] [Лайкова Л.И., Белан И.А., Бадаева Е.Д., Россеева Л.П., Шепелев С.С., Шумный В.К. и др. Создание и изучение сорта яровой мягкой пшеницы "Памяти Майстренко" с интрогрессией генетического материала от синтетического гексаплоида *Triticum timopheevii* Zhuk. × *Aegilops tauschii* Coss. *Генетика*. 2013;49(1):103-112]. DOI: 10.7868/S0016675813010062
- Lapochkina I.F., Gainullin N.R., Baranova O.A., Kovalenko N.M., Marchenkova L.A., Pavlova O.V. et al. Complex resistance of spring and winter bread wheat lines to biotic and abiotic stresses. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(7):723-731. [in Russian] [Лапочкина И.Ф., Гайнуллин Н.Р., Баранова О.А., Коваленко Н.М., Марченкова Л.А., Павлова О.В. и др. Комплексная устойчивость линий яровой и озимой мягкой пшеницы к биотическим и абиотическим стрессам. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(7):723-731]. DOI: 10.18699/VJ21.082
- Laugerotte J., Baumann U., Sourdille P. Genetic control of compatibility in crosses between wheat and its wild or cultivated relatives. *Plant Biotechnology Journal*. 2022;20(5):812-832. DOI: 10.1111/pbi.13784
- Liu X., Zhang M., Liu X., Li H., Hao M., Ning S. et al. Molecular cytogenetic identification of newly synthetic *Triticum kiharae* with high resistance to stripe rust. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2018;65(2):1725-1732. DOI: 10.1007/s10722-018-0649-y
- Mains E.B., Dietz S.M. Physiologic forms of barley mildew *Erysiphe graminis hordei*. *Phytopathology*. 1930;20(3):229-239.
- Mains E.B., Jackson H.S. Physiologic specialization in the leaf rust of wheat *Puccinia triticina* Erikss. *Phytopathology*. 1926;16(2):89-120.
- Novoselskaya-Dragovich A.Yu. Genetics and genomics of wheat: storage proteins, ecological plasticity, and immunity. *Russian Journal of Genetics*. 2015;51(5):476-490. DOI: 10.1134/S102279541505004X
- Odintsova T.I., Slezina M.P., Istomina E.A. Plant thionins: structure, biological functions and potential use in biotechnology. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(6):667-675. [in Russian] [Одинцова Т.И., Слезина М.П., Истомина Е.А. Тионины растений: строение, биологические функции и перспективы использования в биотехнологии. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(6):667-675]. DOI: 10.18699/VJ18.409
- Orlovskaya O., Dubovets N., Solovey L., Leonova I. Molecular cytological analysis of alien introgressions in common wheat lines derived from the cross of *Triticum aestivum* with *T. kiharae*. *BMC Plant Biology*. 2020;20 Suppl 1:201. DOI: 10.1186/s12870-020-02407-2
- Orlovskaya O., Khotyleva L., Leontiev V., Koren L.V. The creation of initial material of wheat by means of distant hybridization in the tribe Triticeae. *Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series 4. Organic Substances Chemistry and Technology*. 2008;1(4):202-204. [in Russian] [Орловская О.А., Хотылева Л.В., Леонтьев В.Н., Корень Л.В. Создание нового исходного материала пшеницы посредством отдаленной гибридизации в трибе Triticeae. *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 4. Химия и технология органических веществ*. 2008;1(4):202-204].
- Orlovskaya O.A., Vakula S.I., Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V. Grain quality in soft wheat lines with genetic material of *Triticum kiharae* (Kachestvo zerna u liniy myagkoy pshenitsy s geneticheskim materialom *Triticum kiharae*). *Fakty eksperimentalnoy evolyutsii organizmiv = Factors of Experimental Evolution of Organisms*. 2018;(23):108-113. [in Russian] [Орловская О.А., Вакула С.И., Хотылева Л.В., Кильчевский А.В. Качество зерна у линий мягкой пшеницы с генетическим материалом *Triticum kiharae*. *Факторы экспериментальной эволюции организмов*. 2018;(23):108-113]. DOI: 10.7124/FEE0.v23.998
- Osipova S.V., Permyakov A.V., Rudikovskii A.V., Permyakova M.D., Rudikovskaya E.G., Pomortsev A.V. et al. Negative effect of an introgression into chromosome 5A1 of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) from tetraploid wheat (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) on drought tolerance and productivity. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(3):102-111. [in Russian] [Осипова С.В., Пермяков А.В., Рудиковский А.В., Пермякова М.Д., Рудиковская Е.Г., Поморцев А.В. и др. Негативное влияние интрогрессии в хромосому 5A1 мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) от тетраплоидной пшеницы (*Triticum timopheevii* (Zhuk.) Zhuk. subsp. *timopheevii*) на устойчивость к засухе и продуктивность. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(3):102-111]. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-3-102-111
- Pausheva Z.P. Workshop on plant cytology (Praktikum po tsitologii rasteniy). 4th ed. Moscow: Agropromizdat; 1988. [in Russian] [Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. 4-е изд. Москва: Агропромиздат; 1988].
- Prins R., Marais G.F., Marais A.S., Janse B.J., Pretorius Z.A. A physical map of the *Thinopyrum*-derived *Lr19* translocation. *Genome*. 1996;39(5):96-126. DOI: 10.1139/g96-126
- Radchenko E.E. Hereditary diversity of wheat with respect to resistance to grain aphids. *Plant Protection News*. 2000;(1):36-42. [in Russian] [Радченко Е.Е. Наследственное разнообразие пшеницы по устойчивости к злаковым тлям. *Вестник защиты растений*. 2000;(1):36-42).
- Roelfs A.P., Singh R.P., Saari E.E. Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management. Mexico: CIMMYT; 1992. Available from: <https://repository.cimmyt.org/entities/publication/e8a64950-5c39-4df2-b292-1ee1b-fa5aa91> [accessed Jan. 15, 2026].
- Vorotyntseva M.V. The effect of glutenins on grain quality as one of the complex polygenic traits in the genus *Triticum* (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):168-185. [in Russian] [Воротынцева М.В. Степень влияния глютеинов на качество зерна как одного из сложных полигенных признаков рода *Triticum* (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1):168-185]. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-168-185

Информация об авторах

Александр Евгеньевич Дружин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, alex_druzhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3968-2470>

Сергей Николаевич Сибикеев, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, sibikeev_sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8324-9765>

Зульфия Ерназаровна Фитилева, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, Zulya0305@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6751-3789>

Андрей Владимирович Фисенко, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова Российской академии наук, 119991 Россия, Москва, ул. Губкина, 3, fisenko800@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9063-1145>

Любовь Владимировна Андреева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, l.v.andreeva_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3631-1084>

Information about the authors

Alexander E. Druzhin, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, alex_druzhin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3968-2470>

Sergey N. Sibikeev, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, sibikeev_sergey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8324-9765>

Zulfiya E. Fitileva, Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Zulya0305@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6751-3789>

Andrey V. Fisenko, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Vavilov Institute of General Genetics of the Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina St., Moscow 119991, Russia, fisenko800@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9063-1145>

Lubov V. Andreeva, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, l.v.andreeva_75@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3631-1084>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.03.2026; одобрена после рецензирования 17.07.2026; принята к публикации 18.08.2026.
The article was submitted on 06.03.2026; approved after reviewing on 17.07.2026; accepted for publication on 18.08.2026.

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Original article

UDC 582.572.42:575.222.7

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o8



Spontaneous hybridization in *Allium* sect. *Rhizirideum*: case study of *Allium nutans* and *A. spirale*

Tatiana A. Sinitsyna, Mikhail V. Skaptsov, Olga V. Uvarova, Maksim G. Kutsev, Sergey V. Smirnov

Altai State University, Barnaul, Russia

Corresponding author: Tatiana A. Sinitsyna, t.sinitsyna@list.ru

Background. Interspecific hybridization is one of the key ways of plant speciation. In 2017, we studied the collection site of the South-Siberian Botanical Garden (SSBG, Barnaul) and collected several *Allium* L. samples having morphological characters intermediate between *A. nutans* L. and *A. spirale* Willd. plants grown nearby. The areas of distribution of these species do not overlap, but both species belong to sect. *Rhizirideum* G. Don ex W.D.J. Koch. The objective of our work was to confirm the hybrid origin of the specimens using molecular genetic methods, flow cytometry, and karyology.

Materials and methods. Fresh leaves and seeds from live plants of *A. nutans*, *A. spirale*, and their putative hybrids were used in the study. Root tips isolated from germinated seeds served to analyze the *Allium* chromosomes in mitosis. Flow cytometry was performed on Cytoflex (Beckman Coulter, USA) and CyFlow PA (Partec, Germany) cytometers, with *A. fistulosum* L., and *Vicia faba* L. 'Inovec' used as internal standards. DNA was extracted using a DiamondDNA kit (ABT, Russia) according to the manufacturer's protocol. Nuclear (ITS1-5.8S-ITS2) and chloroplast (*trnQ-rps16*) DNA fragments were amplified, purified, and sequenced by Sanger. The obtained sequences were analyzed in Chromas 2.6.4, and in MEGA7.

Results. Plants of *A. nutans* yielded seeds with different ploidy levels. The seed progeny of hybrid forms also had different chromosome numbers. The analysis of ITS fragments of nuclear DNA confirmed the hybrid origin of the specimens. The *rps16* sequences of the alleged hybrids were identical to the sequences of *A. nutans* from the SSBG, which confirmed its maternal status.

Conclusion. For the first time we found *A. nutans* × *A. spirale* hybrids under plant introduction conditions. Those cases of spontaneous hybridization make it possible to perform direct crosses between these species and obtain new ornamental cultivars and varieties in the genus *Allium*.

Keywords: flow cytometry, sequencing by Sanger, spontaneous hybridization, chromosome numbers, *Allium nutans*, *Allium spirale*, *Rhizirideum*

Acknowledgments: the work was funded in the framework of the state task assigned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FZMW-2026-0006 "The role of microevolutionary processes in speciation exemplified by model genera of vascular plants from Southern Siberia and the Far East in a biogeographic aspect".

For citation: Sinitsyna T.A., Skaptsov M.V., Uvarova O.V., Kutsev M.G., Smirnov S.V. Spontaneous hybridization in *Allium* sect. *Rhizirideum*: case study of *Allium nutans* and *A. spirale*. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3): 234-244. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o8

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ

Научная статья

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o8

Спонтанная гибридизация в секции *Rhizirideum* рода *Allium* на примере *Allium nutans* и *A. spirale*

Т. А. Синицына, М. В. Скапцов, О. В. Уварова, М. Г. Куцев, С. В. Смирнов

Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Александровна Синицына, t.sinityna@list.ru

Актуальность. Межвидовая гибридизация является одним из основных способов видообразования у растений. В 2017 г. на коллекционном участке Южно-Сибирского ботанического сада (г. Барнаул) нами были собраны образцы лука с морфологическими признаками, промежуточными между *Allium nutans* L. и *A. spirale* Willd., произрастающими рядом с собранными растениями. Ареалы этих видов не пересекаются, но они относятся к одной секции *Rhizirideum* G. Don ex W.D.J. Koch. Цель нашей работы – выяснить происхождение предполагаемых гибридных растений с помощью молекулярно-генетических методов, проточной цитометрии и кариологии.

Материалы и методы. В работе использовались свежие листья и семена живых растений *A. nutans*, *A. spirale* и предполагаемых гибридов. Для изучения хромосом в митозе использовались кончики корней пророщенных семян. Анализы проводились на цитометрах Cytoflex (Beckman Coulter, США) и CyFlow PA (Partec, Германия) с внутренними стандартами *Allium fistulosum* L. и *Vicia faba* L. (сорт 'Inovec'). ДНК выделяли с помощью набора DiamondDNA («АБТ», Россия) в соответствии с протоколом производителя. Фрагменты ядерной (ITS1-5.8S-ITS2) и хлоропластной (*trnQ-rps16*) ДНК амплифицировали, очищали и секвенировали по Сэнгеру. Полученные последовательности были проанализированы в Chromas 2.6.4 и MEGA7.

Результаты. Растения *A. nutans* образуют семена с разным уровнем плоидности ($2n = 32, 40$). Проростки из семян гибридных форм также имеют разное количество хромосом ($2n = 40, 72-80$). Анализ фрагментов ITS яДНК подтвердил гибридное происхождение изученных образцов. Последовательности *rps16* гибридных образцов совпадали с последовательностями *A. nutans* из коллекции, что позволяет считать его материнским растением.

Заключение. Впервые в условиях интродукции были обнаружены гибриды *A. nutans* × *A. spirale*. Выявленные случаи спонтанной гибридизации свидетельствуют о возможности проводить прямое скрещивание этих видов для получения новых сортов и разновидностей рода *Allium* L.

Ключевые слова: проточная цитометрия, секвенирование по Сэнгеру, спонтанная межвидовая гибридизация, числа хромосом, *Allium nutans*, *Allium spirale*, *Rhizirideum*

Благодарности: работа осуществлена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ по теме FZMW-2026-0006 «Роль микроэволюционных процессов в видообразовании на примере модельных родов сосудистых растений Южной Сибири и Дальнего Востока в биогеографическом аспекте».

Для цитирования: Синицына Т.А., Скапцов М.В., Уварова О.В., Куцев М.Г., Смирнов С.В. Спонтанная гибридизация в секции *Rhizirideum* рода *Allium* на примере *Allium nutans* и *A. spirale*. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):234-244. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o8

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

Introduction

Interspecific hybridization is one of the key ways of plant speciation. One of the largest genera of monocots, *Allium* L. (Amaryllidaceae J.St.-Hil.) includes more than 1000 species, naturally distributed throughout the northern hemisphere (Friesen et al., 2022).

Hybridization is a well-studied phenomenon in cultivated species of the genus *Allium*, for example, *A. cepa* L. × *A. vavilovii* Popov & Vved., *A. cepa* × *A. fistulosum* L., and *A. cepa* × *A. roylei* Stearn (Chuda, Adamus, 2012; Havey, 2018; Romanov et al., 2018; Kudryavtseva et al., 2019).

It is widely known that *Allium* spp. form hybrids when different species from geographically distant regions grow together in botanical collections. Some wild *Allium* spp. can produce hybrids under plant introduction conditions, for example, a spontaneous hybrid of *A. tulipifolium* Ledeb. × *A. robustum* Kar. & Kir. is known (Smirnov et al., 2017).

Not only hybridization plays the main role in *Allium* microevolution; to a lesser extent, it is shared by polyploidy and apomixis. Often, with the appearance of evolutionary beneficial features, the organism switches to the asexual mode of reproduction, or apomixis. Apomixis retains any heterozygosity, and can serve as a method for the development of real hybrids. In the genus *Allium*, apomixis is reported for at least three species – *A. ramosum* L., *A. nutans* L., and *A. tuberosum* Rottler ex Spreng. (Kojima et al., 1992). New hybrid forms provide an opportunity to increase genotypic and phenotypic variability, and find new combinations of useful traits.

Traditionally, identification of hybrids relied on their intermediate morphology compared to their parental species. However, due to correlated morphological characters, phenotypic plasticity, and other factors, it is advisable to confirm a putative hybrid species by modern molecular genetics techniques. The comparison of nuclear and plastid DNA is a powerful method to identify the hybrid origin of plants and their parents (Smirnov, Friesen, 2006; Peruzzi et al., 2011; Borzatti von Loewenstern et al., 2013; Herden et al., 2016; Hurka et al., 2019). To establish the hybridogenic status of a plant, sequences of nuclear DNA (ITS) and some plastid DNA fragments (*trnI-trnF*, *trnI-rpl32*, and *trnQ-rps16*) are commonly used (Punina et al., 2017; Smirnov et al., 2017; Rodionov et al., 2018; Zaikov et al., 2025). A practical alternative or addition to molecular methods for detecting hybrids is flow cytometry. This method is applicable not only for traditional scientific research but also for the rapid identification of plant hybrids (Urfus et al., 2025).

In the collection of live plants at the South-Siberian Botanical Garden (SSBG), Altai State University (Barnaul), we found *Allium* plants with morphological characters intermediate between *A. nutans* and *A. spirale* Willd. Several specimens of these two species grew nearby at the collection site.

In nature, these two species do not grow together. The Kazakh-Siberian species *A. nutans* is distributed throughout the Southern Urals, and Altai, while *A. spirale* occupies the Far East area (Primorsky Territory, China, and Korea) (Sinitsyna, 2019). The species are closely related and belong to sect. *Rhizirideum* G. Don ex W.D.J. Koch, characterized by a horizontal rhizome with a few bulbs and plain linear leaves (Sinitsyna et al., 2016). Active hybridization processes with such morphogenetic phenomena as allopolyploidy and apomixis are common in the section (Kamelin, 2004).

For *A. nutans*, the following chromosome numbers were known earlier: $2n = 32$ (Friesen, 1988; Krasnikov, Lomonosova, 1990; Shang et al., 1997; Ohri, Pistrick, 2001; Malakhova et al., 2008); 36, 38–40 (Malakhova et al., 2008), 48 (Shang et

al., 1997; Malakhova et al., 2008); 64, and 72 (Shang et al., 1997).

For *A. spirale*, the chromosome number of $2n = 32$ was considered constant (Probatova, Sokolovskaya, 1986; Shatalova, 2000; Friesen et al., 2006; Probatova et al., 2016). Probatova et al. (2016) found an *A. spirale* plant with $2n = 40$ but clarified that this fact needs additional confirmations.

The objective of our research was to confirm the hybrid origin of the collected plants using methods of molecular genetics, flow cytometry, and karyology.

Materials and methods

The putative hybrid plants and those of parental species *A. nutans* and *A. spirale* from the SSBG collection of live plants were used in the study (Tables 1, 2). Two plant samples with conventional names Hybrid 1 and Hybrid 2, as well as specimens of the polyploid *A. nutans* ($2n = 32-72$), and the diploid *A. spirale* ($2n = 32, 40?$), growing next to the hybrids in the open ground, were taken for the analysis. Hybrids produced seeds, so we employed the next-generation plants grown from those seeds under greenhouse conditions in the analysis. The seeds were set by free pollination (without isolating the flowers). We used one sample from the seed reproduction of parental plants, and 4 and 3 plants of Hybrids 1 and 2, respectively (see Table 1, clones). We chose those plants according to their largest genome size, identified by flow cytometry.

To study the *Allium* chromosome numbers at the mitotic stage, the root tips of these specimens were used. The roots were kept overnight in water on ice. Then they were warmed to room temperature for 20 min., pretreated for 2 hours in a 0.1% colchicine solution in water, and fixed in a freshly prepared 3 : 1 mixture of 96% ethanol and glacial acetic acid. Aceto-orceine staining was performed according to R. Tanaka (1967).

DNA content was determined by flow cytometry with propidium iodide (PI) staining. Fresh leaves and whole seeds were used in the analysis (Skaptsov et al., 2024). Plant material was co-chopped with the standard using a sharp razor blade in 1 mL Tris-MgCl₂ buffer (Pfosser et al., 1995) supplemented with PI (50 µg/mL), RNase (10 µg/mL), and 12 mM sodium thiosulfate (Skaptsov et al., 2024). The nuclear suspension was filtered through a nylon filter with a pore size of 50 microns, and incubated at room temperature for 15 minutes.

We used *A. fistulosum* L. with a known DNA content of $2C = 25.004$ pg (Skaptsov et al., 2024), and *Vicia faba* L. 'Inovec', $2C = 26.9$ pg (Doležel et al., 1992) as internal standards. Analyses were performed on a CytoFLEX (Beckman Coulter, USA) and CyFlow PA (Partec, Germany) cytometers. Peaks with at least 1000 nuclei and a CV of less than 5% were used for analysis. Histograms were visualized and processed using the CytExpert software (Beckman Coulter, Inc.) and Flowing Software 2.5.1 (University of Turku, Finland). Statistical data were calculated using XLStat (Addinsoft).

DNA was extracted using a DiamondDNA kit (ABT, Russia) according to the manufacturer's protocol. Amplification of the regions of nuclear (ITS1-5.8S-ITS2) and chloroplast (*trnQ-rps16*) DNA was performed on a MyCycler amplifier (BioRad, USA) in a 25 µL reaction mixture containing 9.5 µL of H₂O, 12.5 µL of the HS-qPCR color 2x master mix (BioLabMix), 1 µL of DNA, and 1 µL (10 mM) of each primer.

We used the following primers:

1) Rps16x1: 5'-GTTGCTTTTACACATCGTTT-3', TrnQ(UUG): 5'-GCGTGCCCAAGYGGAAGGC-3' (Shaw et al., 2007), 2) ITSfor:

Table 1. Specimens used in the research

Таблица 1. Образцы, использованные в исследовании

ID	Specimen	Voucher	Collecting date	ITS NCBI accession code	Rps16 NCBI accession code
Hb_1	<i>Allium nutans</i>	ALTB 3020 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia) collection plot. Origin: Altai, Aigulaksky Ridge, 15-2011	Oct. 09, 2017	MN917833	MN929045
Hb_2	<i>A. spirale</i>	ALTB 3021 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia) collection plot. Origin: Primorsky Territory	Oct. 09, 2017	MN917834	MN929046
Hb_3	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 1)	ALTB 3022 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia) collection plot	Oct. 09, 2017	MN917835	–
Hb_4	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 2)	ALTB 3023 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia) collection plot	Oct. 09, 2017	MN917836	MN929047
Hb_5	<i>A. nutans</i>	ALTB 3351 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse seed reproduction of Hb_1	Jul. 05, 2018	MN917837	MN929048
Hb_6	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 1)	ALTB 3352 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse reproduction of Hb_3 seeds, clone 2	Jul. 05, 2018	MN917838	–
Hb_7	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 1)	ALTB 3353 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse reproduction of Hb_3 seeds, clone 4	Jul. 05, 2018	MN917839	MN929049
Hb_8	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 1)	ALTB 3354 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse reproduction of Hb_3 seeds, clone 5	Jul. 05, 2018	MN917840	MN929050
Hb_9	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 1)	ALTB 3355 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse reproduction of Hb_3 seeds, clone 7	Jul. 05, 2018	MN917841	MN929051
Hb_10	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 2)	ALTB 3356 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse reproduction of Hb_4 seeds, clone 3	Jul. 05, 2018	MN917842	MN929052
Hb_11	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 2)	ALTB 3357 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse reproduction of Hb_4 seeds, clone 6	Jul. 05, 2018	MN917843	MN929053
Hb_12	<i>A. nutans</i> × <i>A. spirale</i> (Hybrid 2)	ALTB 3358 South-Siberian Botanical Garden (Barnaul, Russia), greenhouse reproduction of Hb_4 seeds, clone 9	Jul. 05, 2018	MN917844	MN929054

Table 2. Main characters of the alleged hybrids (described by us) and the characters of the putative parent species (published data)**Таблица 2. Основные признаки гибридных образцов (описанные нами) и признаки предполагаемых родительских видов (литературные данные)**

Plant character	<i>Allium nutans</i> (Friesen, 1988)	Hybrid 1 (with narrow leaves)	Hybrid 2 (with broad leaves)	<i>Allium spirale</i> (Barkalov, 1987)
Peduncle	30–70 cm tall, 5–8 mm wide, straight, in upper part with 2 winged ribs	69 cm tall, 4–6 mm wide, cylindrical, slightly flattened, without ribs	87 cm tall, 5–8 mm wide	up to 50 cm tall, cylindrical, narrow-winged
Bulbs	1–2, on a horizontal rhizome, 15–20 mm wide, covered with membranous blackish tunics	clustered on a horizontal rhizome, 4 cm tall, 8–10 mm wide; covered with membranous whitish tunics	clustered by a few on a horizontal rhizome, 4 cm tall, 27 mm wide; covered with membranous whitish tunics	1–4, on a short oblique rhizome, 8–10(20) mm wide, covered with solid brown external tunics
Leaves	7–15 mm wide, wide-linear, flat, twice shorter than the peduncle	4–5, 6–8 mm wide, 11–22 cm long, dark grass-green	6, 10–11 mm wide, 26–28 cm long, dark grass-green, shiny	(3)5–11 mm wide, linear, flat, straight or sickle-shaped, slightly or twice shorter than the peduncle
Inflorescence	35–55 mm in diam., spherical, multiflowered, dense	40 mm tall, 46 mm wide, hemispherical	55 mm tall, 58 mm wide, almost spherical	25–40 mm in diam., hemispherical
Pedicels	equal, 1.5–2 times longer than tepals	equal, 18 mm long	equal, about 20 mm long	equal or 2.5 times longer than the tepals
Tepals	5–6 mm long, obtuse, oblong-ovate, pink	internal: 5 mm long, pink, oval; external: 4 mm long, purple, with a vein, ovate	Internal: about 6 mm long, pink, oval, rounded at the top; external: 5 mm, pink-lilac, boat-shaped	pinkish-lilac, broadly ovoid with a thin, inconspicuous vein, obtuse; internal: 4.5–6 mm long, 3–4 mm wide; external: 3–5.5 mm long, 1.2–2.5 mm wide
Stamens	1.5–2 times longer than tepals; internal: highly extended, with a tooth on one or both sides	external: subulate; internal: with 2 “wings” on the sides, without dentation but with a rounded protrusion; exerted	external: subulate; internal: with narrow “wings”, with a ledge on one side; anthers: purple, exerted approximately on 1/3–1/4	slightly or up to by 1/3 longer than the tepals; internal: subulate from a deltoid base
Style	exserted	not exerted	not exerted	slightly or up to by 1/3 longer than the tepals

5'-CGTAACAAGGTTTCCGTAG-3', ITSrew: 5'-GGAATCCTTGTA AGTTTCTTT-3' (Kutsev et al., 2014),

and the amplification programs:

for plastid DNA fragments: 95°C for 4 min, (95°C for 20 sec, 65°C for 45 sec, and 72°C for 30 sec) × 30 cycles, 72°C for 7 min;

for nuclear DNA fragments: 95°C for 4 min, (95°C for 20 sec, 55°C for 45 sec, and 72°C for 30 sec) × 35 cycles, 72°C for 7 min.

The DNA concentration was measured on a NanoPhotometer P360 Implen (Hamburg, Germany), as well as by electrophoresis on 1.5% agarose gel with the DNA marker Step-50plus (BioLabMix). The PCR product was purified using the DiamondDNA PCR DNA extraction kit (ABT, Russia) in accordance with the manufacturer's instructions. Purified ampli-

fication products were Sanger-sequenced by Syntol LLC (Moscow, Russia). The obtained sequences were analyzed using Chromas 2.6.4 and MEGA7 (Kumar et al., 2016). The resulting sequences were submitted to the International NCBI GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>) (see Table 1).

Results and discussion

Morphology

The putative hybrid plants had some morphological characters intermediate between *A. nutans* and *A. spirale* (Table 2, Fig. 1): leaf width, and stamen shape. Hybrid 2 had some quantitative characters exceeding parental species (inflorescence size, peduncle height, etc.).

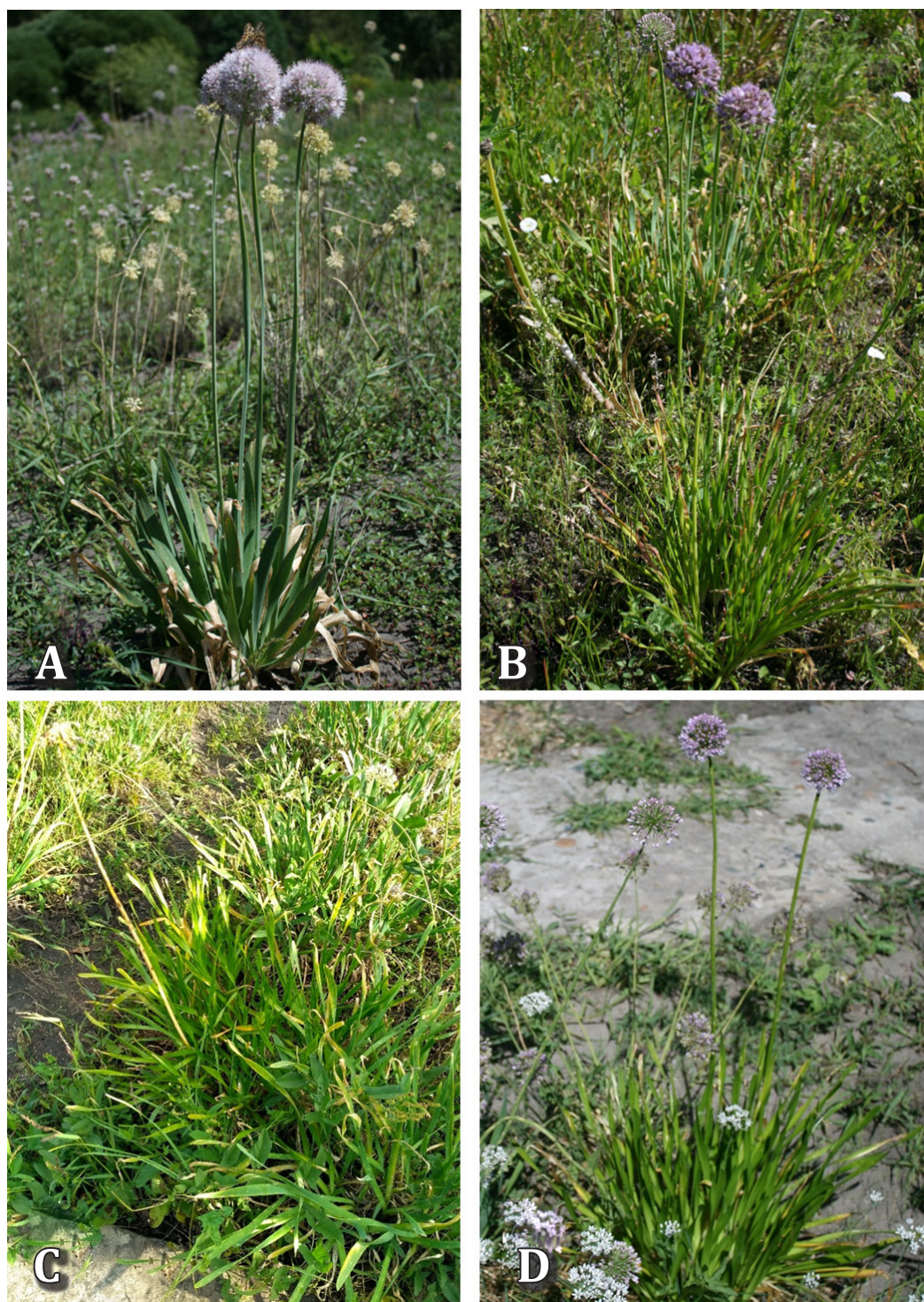


Fig. 1. Specimens from the live plant collection of the South-Siberian Botanical Garden (Barnaul) used in the study:
A – *Allium nutans* L.; B – *A. spirale* Willd.; C – putative Hybrid 1; D – putative Hybrid 2

Рис. 1. Образцы из коллекции живых растений Южно-Сибирского ботанического сада (г. Барнаул), использованные в изучении: A – *Allium nutans* L.; B – *A. spirale* Willd.; C – предполагаемый Hybrid 1; D – предполагаемый Hybrid 2

Flow cytometry, and analysis of chromosome numbers

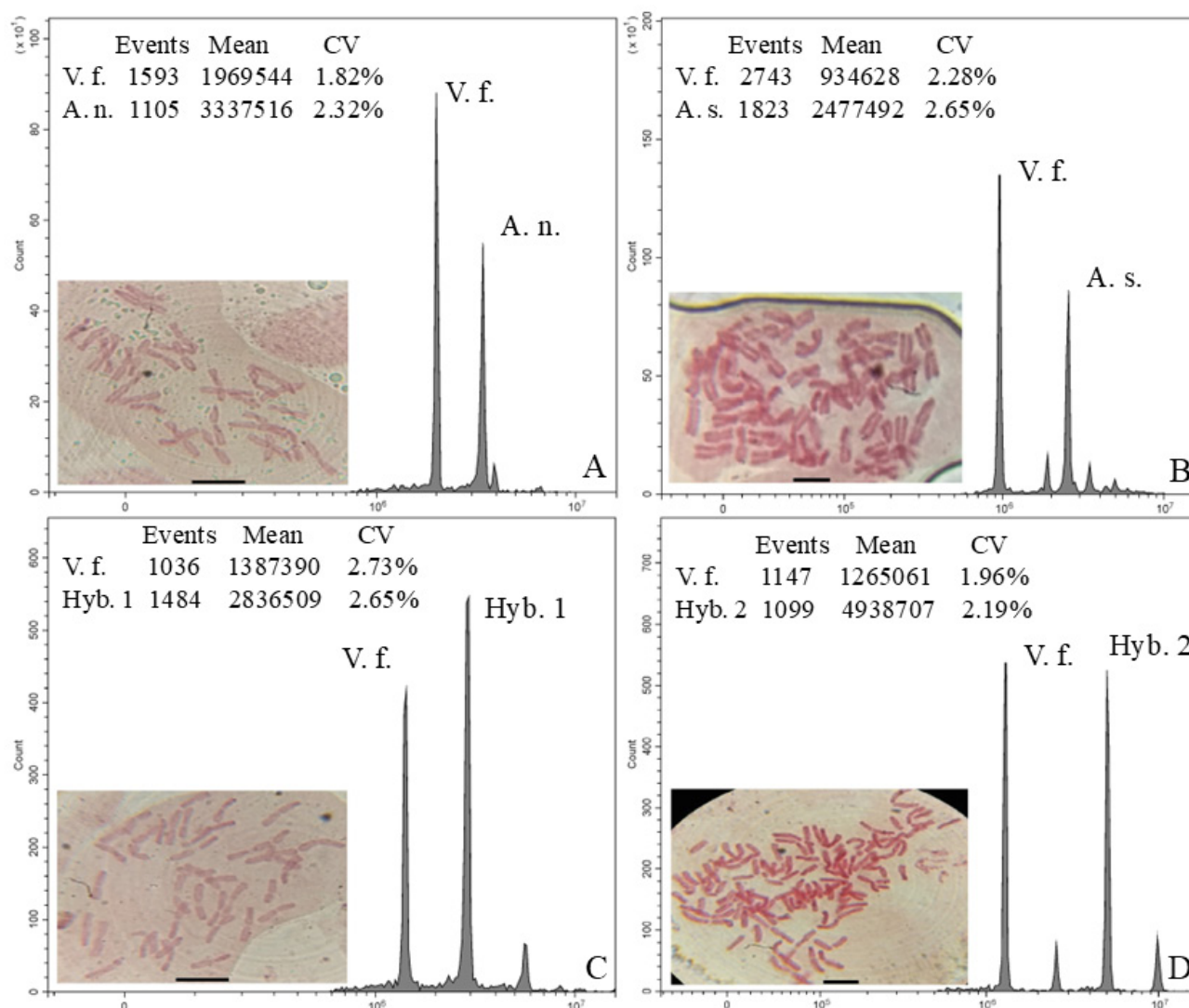
We used seeds collected from the putative hybrids and their parents to determine their chromosome numbers. As expected, *A. nutans* plants developed seeds with different ploidy levels, including $2n = 40$ (Table 3), which confirmed their maternal status, and systematic pattern of hybridization. However, the seed progeny of hybrid forms had also a different number of chromosomes.

The analysis of chromosome composition showed the $2n = 4x = 32$ chromosome number for *A. nutans* (Fig. 2, A), and a new chromosome number of $2n = 6x = 48$ for *A. spirale* (Fig. 2, B). Hybrid 1 had the chromosome number of $2n = 40$ (Fig. 2, C), equal to the sum of the haploid chromosome numbers in the parent species ($16 + 24$), which may support its hybrid nature. Hybrid 2 had approximately $2n \sim 72-80$ (Fig. 2, D).

Table 3. DNA content in the cells of *Allium nutans* L., *A. spirale* Willd., and their hybrids**Таблица 3.** Содержание ДНК в клетках *Allium nutans* L., *A. spirale* Willd. и их гибридов

Specimen	Mean 2C $\pm$ SD, pg	CV, %	1C, Gbp	Examined 2n (seeds)
<i>A. nutans</i>	45.308 $\pm$ 1.585	3.50	22.156	32; 40
<i>A. spirale</i>	71.380 $\pm$ 0.135	0.19	34.905	48
Hybrid 1	54.596 $\pm$ 1.775	3.25	26.697	40
Hybrid 2	103.814 $\pm$ 3.535	3.41	50.765	40; ~72–80

1 pg DNA = 978 Mbp (Doležel et al., 2003)

**Fig. 2.** The flow cytometry histograms and the chromosomes' images of parental species and putative hybrids: V. f. – *Vicia faba* L. (standard, 26.9 pg); A – *Allium nutans* L. (A. n.; 2n = 4x = 32); B – *A. spirale* Willd.(A. s.; 2n = 6x = 48); C – the euploid hybrid *A. nutans* $\times$ *A. spirale* (Hyb. 1; 2n = 40);D – the polyploid hybrid *A. nutans* $\times$ *A. spirale* (Hyb. 2; 2n ~ 72–80)**Рис. 2.** Результаты анализа числа хромосом и проточной цитометрии родительских видов и предполагаемых гибридов: V. f. – *Vicia faba* L. (стандарт, 26,9 pg); A – *Allium nutans* L. (A. n.; 2n = 4x = 32);B – *A. spirale* Willd. (A. s.; 2n = 6x = 48); C – эуплоидный гибрид *A. nutans* $\times$ *A. spirale* (Hyb. 1; 2n = 40);D – полиплоидный гибрид *A. nutans* $\times$ *A. spirale* (Hyb. 2; 2n ~ 72–80)

Analysis of the DNA content revealed significant variability in the putative hybrids. Hybrid 1 with 2n = 40 had the DNA content of 54.596 pg. Hybrid 2 with the DNA content of 103.814 pg was also recorded; it had the same phenotypic

characters but was larger in size (Table 3). In addition, examination of seed histograms revealed 2C peaks for the embryo, and 3C+5C peaks for the endosperm, which may be indicative of apomixis (Matzk et al., 2000).

In Hybrid 1, the seed progeny was relatively uniform and conformed to the classical hybridization scheme, but in Hybrid 2, the largest amounts of seeds had chromosome numbers of 72–80, which may indicate the appearance of hybrid genome duplication. In addition, we noted an opposite tendency – a reduction in the chromosome number to $n = 40$. Apparently, this is a good example of speciation, characterized by hybridization, an increase in ploidy (polyploidization), and a decrease in ploidy (reduction) to the initial level, for the selection of allelic variants.

Molecular genetics analysis

The whole ITS fragment is 610 bp in length.

In certain positions on the chromatograms obtained after sequencing, some plant groups (for example, *Paenonia* or *Elymus*) have double peaks in ITS sequences, identified regularly. They evidence the presence of two different nucleotides at the position. These positions, or polymorphic sites (PS), indicate the hybrid origin of the species (Punina et al., 2017; Rodionov et al., 2018). Such PS we can see in *Allium* sect. *Rhizirideum* G. Don ex W.D.J. Koch. For all species of the section, we identified 7 PS, whereas *A. nutans* AM949608 and *A. spirale* AJ411833 from GenBank have different nucleotides in 6 positions (Table 4). The studied sequences of *A. nutans* and *A. spirale* differed from GenBank sequences of *A. nutans* AM949608 and *A. spirale* AJ411833. The ITS sequence of the putative parent *A. nutans* had double peaks in 5 PS, probably due to its origin from the collection, and not from wild nature. It can also attest to its hybrid origin.

The ITS sequence of Hybrid 1 was in general similar to *A. spirale* Hb_2 (5 PS of 7), as well as to clone Hb_7 (3 PS of 7). The ITS sequence of Hybrid 2 was in general similar to *A. nutans* Hb_1 (6 PS of 7), as well as to other clones. Remarkably, the ITS sequence of clone Hb_10 was identical to the AM949608 sequence of wild *A. nutans*.

Thus, ITS sequences of the putative hybrids had characters from both parent species, thus confirming the hybrid origin of both samples (Hybrid 1 and Hybrid 2).

We chose the *rps16* fragment of cpDNA for the analysis, as earlier we had established that the *trnL* intron of cpDNA commonly used in DNA analyses did not show any differences among species in sect. *Rhizirideum* (Sinitsyna et al., 2016).

The whole sequence of the *rps16* fragment consisted of 841 bp. The sequence of *A. spirale* Hb_2 differed from the sequences of Hybrid 2 (Hb_4) and *A. nutans* (Hb_1, and Hb_5) in the 3 bp (positions No. 9, 158, and 559). The *Rps16* sequences of Hybrid 2 (Hb_4) and its reproductions (Hb_10, Hb_11, and Hb_12), and reproductions of Hybrid 1 (Hb_7, Hb_8, and Hb_9) were identical to the sequences of *A. nutans* Hb_1 from the SSBG, which could be indicative of its maternal status.

The entry of heterogeneous genomes into one nucleus during interspecific hybridization leads to a conflict of genomes, a “genomic shock”, the consequence of which is a surge in genotypic and phenotypic variability in the first generations of hybrid progeny (Rodionov, 2022). In our work, we dealt with two types of hybrids. Firstly, a “classical” hybrid, euploid, when the hybrid genome is a sum of the haploid

Table 4. Polymorphic sites in the ITS1-5.8S-ITS2 fragment sequences of *Allium nutans* L., *A. spirale* Willd., and the putative hybrids

Таблица 4. Полиморфные сайты в нуклеотидных последовательностях фрагмента ITS1-5.8S-ITS2 у *Allium nutans* L., *A. spirale* Willd. и предполагаемых гибридов

Specimen	ITS fragment, position No. (PS)						
	15	203	363	417	545	569	582
<i>Allium nutans</i> AM949608*	T	G	C	A	G	T	C
<i>Allium spirale</i> AJ411833**	A	C	T	A	T	C	T
3020_nutans Hb_1	W	S	Y	R	G	Y	C
3021_spirale Hb_2	A	S	T	A	G	C	C
3022_hybrid1 Hb_3	A	C	T	R	G	C	C
3023_hybrid2 Hb_4	W	S	Y	A	G	Y	C
3351_nutans_reprod_Hb_5	W	S	Y	A	G	Y	C
3352_hybrid1_clone2 Hb_6	W	S	Y	R	G	Y	C
3353_hybrid1_clone4 Hb_7	A	C	Y	R	G	Y	C
3354_hybrid1_clone5 Hb_8	W	S	Y	A	G	Y	C
3355_hybrid1_clone7 Hb_9	W	S	Y	R	G	Y	C
3356_hybrid2_clone3 Hb_10	T	G	C	A	G	T	C
3357_hybrid2_clone6 Hb_11	W	S	Y	A	G	Y	C
3358_hybrid2_clone9 Hb_12	W	S	Y	A	G	Y	C

Note: A, C, T, and G are nucleotides in the sequences, W corresponds to A / T, S to G / C, Y to C / T, and R to A / G;

* – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/AM949608>;

** – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/AJ411833>

Примечание: A, C, T, G – нуклеотиды в последовательностях, W – A / T, S – G / C, Y – C / T, R – A / G

* – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/AM949608>;

** – <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/AJ411833>

chromosome numbers of the parents. In the second type of hybrid, polyploid, there was probably a genome duplication. This hybrid had higher DNA amount and values of morphological features in comparison with its parents and the other hybrid specimen.

The section *Rhizirideum* is relatively young (7 million years old), and the process of its formation is still underway (Sinitsyna et al., 2016). Therefore, genetic barriers between species have not yet been fully established. Hybridizations happening at different times among the section's species are complicated because of different forms of polyploidy, and isolation mechanisms are basically represented by facultative apomixis in some populations with simultaneous presence of normal sexual populations of both parent species and hybrid individuals, as well as populations with vegetative propagation (Kamelin, 2004).

A. nutans has many cultivars and forms, and is very variable in nature. The checklist of ornamental *Allium* spp. and cultivars, made by R. Fritsch (2015), includes 12 cultivars of *A. nutans*, and 5 among them are hybrids between closely related species. In Russia, *A. nutans* has 9 cultivars of different applications (State register of varieties and hybrids..., 2024). But there are no cultivars originated from *A. spirale*. This species is not used in breeding practice at present. So, our research shows that *A. spirale* could be used in direct hybridization breeding with *A. nutans* to develop new forms and cultivars.

Conclusion

Thus, for the first time we found the hybrids of *A. nutans* × *A. spirale* under plant introduction conditions. The new chromosome number of $2n = 6x = 48$ was established for *Allium spirale* under plant introduction conditions.

Our results confirmed that flow cytometry combined with the analysis of nuclear and plastid DNA is a good method to prove the hybrid origin of plants and their parents. The polymorphism identified in the ITS1-5.8S-ITS2 sequences may be used in the development of species-specific markers.

The cases of spontaneous hybridization make it possible to develop new cultivars and varieties in the genus *Allium*, highlighting the need for conservation of valuable genotypes identified in the process of plant introduction.

References / Литература

Barkalov V.Yu. Alliaceae. In: S.S. Kharkevich (ed.). *Vascular Plants of the Soviet Far East. Vol. 2 (Sosudistye rasteniya Sovetskogo Dalnego Vostoka. T. 2)*. Leningrad: Nauka; 1987. p.376-393. [in Russian] [Баркалов В.Ю. Луковые – Alliaceae. В кн.: *Сосудистые растения советского Дальнего Востока. Т. 2* / под ред. С.С. Харкевича. Ленинград: Наука; 1987. С.376-393].

Borzatti Von Loewenstern A., Giordani T., Astuti G., Andreucci A., Peruzzi L. Phylogenetic relationships of Italian *Bellevalia* species (Asparagaceae), inferred from morphology, karyology and molecular systematics. *Plant Biosystems*. 2013;147(3):776-787. DOI: 10.1080/11263504.2013.829884

Chuda A., Adamus A. Hybridization and molecular characterization of F_1 *Allium cepa* × *Allium roylei* plants. *Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica*. 2012;54(2):25-31. DOI: 10.2478/v10182-012-0016-9

Doležel J., Bartoš J., Voglmayr H., Greilhuber J. Nuclear DNA content and genome size of trout and human. *Cytometry A*. 2003;51(2):127-128. DOI: 10.1002/cyto.a.10013

Doležel J., Sgorbati S., Lucretti S. Comparison of three DNA fluorochromes for flow cytometric estimation of nuclear DNA content in plants. *Physiologia Plantarum*. 1992;85(4):625-631. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1992.tb04764.x

Friesen N., Fritsch R.M., Blattner F.R. Phylogeny and new intrageneric classification of *Allium* (Alliaceae) based on nuclear ribosomal DNA ITS sequences. *Aliso: A Journal of Systematic and Evolutionary Botany*. 2006;22(1):372-395.

Friesen N., Grützmacher L., Skaptsov M., Vesselova P., Dorofeyev V., Luferov A.N. et al. *Allium pallasii* and *A. caricifolium* – surprisingly diverse old steppe species, showing a clear geographical barrier in the area of Lake Zaysan. *Plants (Basel)*. 2022;11(11):1465. DOI: 10.3390/plants11111465

Friesen N.V. Onions of Siberia: systematics, karyology, chorology (Lukovye Sibiri: sistematika, kariologiya, khorologiya). Novosibirsk: Nauka; 1988. [in Russian] (Фризен Н.В. Луковые Сибири (систематика, карология, хорология). Новосибирск: Наука; 1988).

Fritsch R.M. Checklist of ornamental *Allium* species and cultivars currently offered in the trade. Gatersleben: IPK; 2015. Available from: https://www.ipk-gatersleben.de/fileadmin/content-ipk/Infrastruktur/Genbank/Allium_Database/150312_OrnamAlliumCheckl_FritschMR.pdf [accessed Feb. 22, 2025].

Havey M.J. Impact of the *Allium* genomes on plant breeding. In: M. Shigyo, A. Khar, M. Abdelrahman (eds). *Allium Genomes*. Cham: Springer; 2018. p.197-215. DOI: 10.1007/978-3-319-95825-5_14

Herden T., Hanelt P., Friesen N. Phylogeny of *Allium* L. subgenus *Anguinum* (G. Don. ex W.D.J. Koch) N. Friesen (Amaryllidaceae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 2016;95:79-93. DOI: 10.1016/j.ympev.2015.11.004

Hurka H., Friesen N., Bernhardt K.G., Neuffer B., Smirnov S., Shmakov A. et al. The Eurasian steppe belt: Status quo, origin and evolutionary history. *Turczaninowia*. 2019;22(3):5-71. DOI: 10.14258/turczaninowia.22.3.1

Kamelin R.V. Lectures on plant systematics. Chapters of theoretical plant systematics (Lektsii po sistematike rasteniy. Glavy teoreticheskoy sistematiki rasteniy). Barnaul: AzBuka; 2004. [in Russian] (Камелин Р.В. Лекции по систематике растений. Главы теоретической систематики растений. Барнаул: АзБука; 2004).

Kojima A., Nagato Y., Hinata K. Apomixis in *Allium tuberosum* and *A. ramosum*. In: P. Hanelt, K. Hammer, H. Knüppfer (eds). *The Genus Allium – Taxonomic Problems and Genetic Resources. Proceedings of an International Symposium held at Gatersleben, Germany, June 11–13, 1991*. Gatersleben: IPK; 1992. p.161-165.

Krasnikov A.A., Lomonosova M.N. Chromosome numbers in representatives of some families of vascular plants in the flora of the Novosibirsk region. I. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1990;75(1):116-118. [in Russian] (Красников А.А., Ломоносова М.Н. Хромосомные числа представителей из некоторых семейств флоры Новосибирской области. *Ботанический журнал*. 1990;75(1):116-118).

Kudryavtseva N., Havey M.J., Black L., Hanson P., Sokolov P., Odintsov S. et al. Cytological evaluations of advanced generations of interspecific hybrids between *Allium cepa* and *Allium fistulosum* showing resistance to *Stemphylium vesicarium*. *Genes (Basel)*. 2019;10(3):195. DOI: 10.3390/genes10030195

Kumar S., Stecher G., Tamura K. MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 7.0 for bigger datasets. *Molecular Biology and Evolution*. 2016;33(7):1870-1874. DOI: 10.1093/molbev/msw054

- Kutsev M.G., Uvarova O.V., Sinitsyna T.A. Set of synthetic oligonucleotides for amplification and sequencing ITS1-5,8S-ITS2 of vascular plants. Russian Federation; patent number: RU2528063C1; 2014. [in Russian] (Куцев М.Г., Уварова О.В., Синецына Т.А. Набор синтетических олигонуклеотидов для амплификации и секвенирования ITS1-5,8S-ITS2 сосудистых растений. Российская Федерация; патент № RU2528063C1; 2014).
- Malakhova L.A., Amelchenko V.P., Kataeva T.N. Cytological research of the rare plants of Tomsk Region in Siberian Botanical Gardens – methodical basis for the preservation their biodiversity. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2008;2(3):73-82. [in Russian] (Малахова Л.А., Амелченко В.П., Катаева Т.Н. Цитогенетические исследования редких растений Томской области в СибБС – методическая основа сохранения их биоразнообразия. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2008;2(3):73-82).
- Matzk F., Meister A., Schubert I. An efficient screen for reproductive pathways using mature seeds of monocots and dicots. *The Plant Journal*. 2000;21(1):97-108. DOI: 10.1046/j.1365-3113x.2000.00647.x
- Ohri D., Pistrick K. Phenology and genome size variation in *Allium* L. – a tight correlation? *Plant Biology*. 2001;3(6):654-660. DOI: 10.1055/s-2001-19362
- Peruzzi L., Bedini G., Andreucci A. Homoploid hybrid speciation in *Doronicum* L. (Asteraceae)? Morphological, karyological and molecular evidences. *Plant Biosystems*. 2011;146(4):867-877. DOI: 10.1080/11263504.2011.634445
- Pfosser M., Heberle-Bors E., Amon A., Lelley T. Evaluation of sensitivity of flow cytometry in detecting aneuploidy in wheat using disomic and ditelosomic wheat-rye addition lines. *Cytometry*. 1995;21(4):387-393. DOI: 10.1002/cyto.990210412
- Probatova N.S., Barkalov V.Yu., Nechaev V.A. Further chromosome studies on vascular plants in Primorsky Krai. *Scholarly Notes of Transbaikalian State University*. 2016;11(1):27-37. [in Russian] (Пробатова Н.С., Баркалов В.Ю., Нечаев В.А. Хромосомные числа сосудистых растений в Приморском крае: дальнейшее изучение. *Ученые записки Забайкальского государственного университета*. 2016;11(1):27-37).
- Probatova N.S., Sokolovskaya A.P. Chromosome numbers of the vascular plants from the Far East of the USSR. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1986;71(11):1572-1575. [in Russian] (Пробатова Н.С., Соколовская А.П. Числа хромосом сосудистых растений с Дальнего Востока СССР. *Ботанический журнал*. 1986;71(11):1572-1575).
- Punina E.O., Machs E.M., Krapivskaya E.E., Rodionov A.V. Polymorphic sites in transcribed spacers of 35S rRNA genes as an indicator of origin of the *Paeonia* cultivars. *Russian Journal of Genetics*. 2017;53(2):202-212. DOI: 10.1134/S1022795417010112
- Rodionov A.V. Tandem duplications, eupolyploidy and secondary diploidization – genetic mechanisms of plant speciation and progressive evolution. *Turczaninowia*. 2022;25(4):87-121. [in Russian] (Родионов А.В. Тандемные дубликации генов, эуполиплоидия и вторичная диплоидизация – генетические механизмы видообразования и прогрессивной эволюции в мире растений. *Turczaninowia*. 2022;25(4):87-121). DOI: 10.14258/turczaninowia.25.4.12
- Rodionov A.V., Dobryakova K.S., Punina E.O. Polymorphic sites in ITS1-5.8S rDNA-ITS2 region in hybridogenic genus *Elyhordeum* and putative interspecific hybrids *Elymus* (Poaceae: Triticeae). *Russian Journal of Genetics*. 2018;54(9):1025-1039. DOI: 10.1134/s1022795418090120
- Romanov V.S., Kan L.Yu., Domblides A.S., Timin N.I., Gurkina L.K., Tareeva M.M. Genetic diversity of interspecific hybrids of the genus *Allium* L. *Vegetable Crops of Russia*. 2018;(1):21-27. [in Russian] (Романов В.С., Кан Л.Ю., Домблидес А.С., Тимин Н.И., Гуркина Л.К., Тареева М.М. Генетическое разнообразие межвидовых гибридов рода *Allium* L. *Овощи России*. 2018;(1):21-27). DOI: 10.18619/2072-9146-2018-1-21-27
- Shang Z.Y., Li R.J., Cui T.C., Xu J.M. Studies on chromosomes of eight species of *Allium* from China. *Journal of Systematics and Evolution*. 1997;35(5):434-444. [in Chinese]
- Shatalova S.A. Chromosome numbers in vascular plants of the Primorsky territory. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 2000;85(1):152-156. [in Russian] (Шаталова С.А. Числа хромосом сосудистых растений Приморского края. *Ботанический журнал*. 2000;85(1):152-156).
- Shaw J., Lickey E.B., Schilling E.E., Small R.L. Comparison of whole chloroplast genome sequence to choose noncoding regions for phylogenetic studies in angiosperms: the tortoise and the hare III. *American Journal of Botany*. 2007;94(3):275-288. DOI: 10.3732/ajb.94.3.275
- Sinitsyna T.A. Genus *Allium* L. (Alliaceae) in Siberia. *Vavilovskaya*. 2019;2(3):3-22. [in Russian] (Синецына Т.А. Род *Allium* L. (Alliaceae) Сибири. *Vavilovskaya*. 2019;2(3):3-22). DOI: 10.30901/2658-3860-2019-3-3-22
- Sinitsyna T.A., Herden T., Friesen N. Dated phylogeny and biogeography of the Eurasian *Allium* section *Rhizirideum* (Amaryllidaceae). *Plant Systematics and Evolution*. 2016;302(9):1311-1328. DOI: 10.1007/s00606-016-1333-3
- Skaptsov M.V., Kutsev M.G., Smirnov S.V., Vaganov A.V., Uvarova O.V., Shmakov A.I. Standards in plant flow cytometry: an overview, polymorphism and linearity issues. *Turczaninowia*. 2024;27(2):86-104. DOI: 10.14258/turczaninowia.27.2.10
- Smirnov S., Skaptsov M., Shmakov A., Fritsch R.M., Friesen N. Spontaneous hybridization among *Allium tulipifolium* and *A. robustum* (*Allium* subg. *Melanocrommyum*, Amaryllidaceae) under cultivation. *Phytotaxa*. 2017;303(2):155-164. DOI: 10.11646/phytotaxa.303.2.5
- Smirnov S.V., Friesen N. Use of molecular-genetic analysis for detection of hybrids by the example of *Brachanthemum baranovii* (Asteraceae) (Ispolzovaniye molekulyarno-geneticheskogo analiza dlya vyyavleniya gibridov na primere *Brachanthemum baranovii* [Asteraceae]). In: *Problems of Botany in South Siberia and Mongolia (Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii): Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference (Barnaul, November 21–23, 2006)*. Barnaul: AzBuka; 2006. p.256-258. [in Russian] (Смирнов С.В., Фризен Н.В. Использование молекулярно-генетического анализа для выявления гибридов на примере *Brachanthemum baranovii* (Asteraceae). В кн.: *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: материалы V Международной научно-практической конференции. Барнаул, 21–23 ноября 2006 г.*) Барнаул: АзБука; 2006. С.256-258).
- State register of varieties and hybrids of agricultural plants admitted for usage (national list): official publication. Moscow: Rosinformagrotech; 2024. [in Russian] (Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию: официальное издание. Москва: Росинформагротех; 2024).

Tanaka R. A comparative karyotype analysis in *Haplopappus gracilis* ($2n = 4$) and *Haplopappus ravenii* ($2n = 8$). *Cytologia*. 1967;32(3-4):542-554. DOI: 10.1508/cytologia.32.542

Urfus T., Chrtek J., Kaplan Z., Prančl J., Ponert J., Trávníček P. et al. Flow cytometry in conservation: detecting hybridization risks in threatened plant species. *Biodiversity and Conservation*. 2025;34(7):2337-2358. DOI: 10.1007/s10531-025-03062-5

Zaikov V.F., Kechaykin A.A., Kutsev M.G., Dorofeyev V.I., Sinitsyna T.A., Karakulov A.V. et al. *Pulsatilla chemalensis* (Ranunculaceae), a new nothospecies from Altai. *Turczaninowia*. 2025;28(2):127-138. [in Russian] (Зайков В.Ф., Кечайкин А.А., Куцев М.Г., Дорофеев В.И., Синицына Т.А., Каракулов А.В. и др. *Pulsatilla chemalensis* (Ranunculaceae) – новый для науки нотовид с Алтая). *Turczaninowia*. 2025;28(2):127-138). DOI: 10.14258/turczaninowia.28.2.13

Information about the authors

Tatiana A. Sinitsyna, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, t.sinitsyna@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7644-9176>

Mikhail V. Skaptsov, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, mr.skaptsov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4884-0768>

Olga V. Uvarova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, uwarowa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3318-5163>

Maksim G. Kutsev, Cand. Sci. (Biology), Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, m_kucev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2284-6851>

Sergey V. Smirnov, Cand. Sci. (Biology), Head of a Department, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, serg_sm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9657-3959>

Информация об авторах

Татьяна Александровна Синицына, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, t.sinitsyna@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7644-9176>

Михаил Викторович Скапцов, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, mr.skaptsov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4884-0768>

Ольга Васильевна Уварова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, uwarowa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3318-5163>

Максим Геннадьевич Куцев, кандидат биологических наук, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, m_kucev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2284-6851>

Сергей Владимирович Смирнов, кандидат биологических наук, заведующий отделом, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, serg_sm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9657-3959>

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 27.01.2026; approved after reviewing on 15.06.2026; accepted for publication on 06.07.2026.

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; одобрена после рецензирования 15.06.2026; принята к публикации 06.07.2026.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ

Научная статья
УДК 633.491:631.527.2
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-012



Оценка устойчивости перспективных образцов картофеля к цистообразующим нематодам и раку картофеля

А. В. Худякова, Э. А. Князева

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Ижевск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Валерьевна Худякова, a.khudyakova@udman.ru

Актуальность. Цистообразующие нематоды и рак картофеля являются карантинными патогенами и наносят значительный экономический ущерб (потери урожая могут достигать 100%). Единственным надежным, экономичным и экологичным методом снижения потерь урожайности является выведение сортов с генетическими детерминантами резистентности. Поскольку фенотипическая оценка устойчивости трудоемка и затратна, перспективным направлением в селекции является применение ДНК-маркеров, сцепленных с R-генами, которые позволяют идентифицировать ценные генотипы на ранних этапах селекционного процесса.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись 5 сортов, 8 перспективных предсортов и 14 гибридов картофеля совместной селекции Удмуртского федерального исследовательского центра с ведущими селекционными центрами России. В молекулярно-генетическом анализе использовали 5 ДНК-маркеров генов устойчивости к цистообразующим нематодам и раку картофеля, наиболее часто применяющихся в селекционных программах.

Результаты. У большинства генотипов (88,9%) выявлен маркер, сцепленный с геном устойчивости к раку картофеля (*Sen1*). Среди маркеров устойчивости к золотистой картофельной нематодой гораздо чаще встречались 57R и N195 (74,1 и 70,4% соответственно), чем Gro1-4 (22,2%). Наличием гена устойчивости к бледной картофельной нематодой *Gra2* характеризовались 12 образцов из 27 (44,4% выборки). Результаты генотипирования сопоставили с уровнем восприимчивости некоторых образцов к *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Behrens и *Synchytrium endobioticum* (Schilbersky) Percival. Диагностическая эффективность обоих маркеров гена *H1* (57R и N195) на данной выборке составила 100%, маркера NL25 – 86,7%; наименьшую эффективность показал Gro1-4 – всего 27,6%. Выявлены случаи с ложноположительными и ложноотрицательными результатами.

Заключение. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности использования в селекционных программах маркеров генов *H1* (57R и N195) и *Sen1* (NL25) и о неэффективности маркеров гена *Gro1-4* (Gro1-4).

Ключевые слова: картофель, устойчивость, ДНК-маркеры, *Globodera rostochiensis*, *Globodera pallida*, *Synchytrium endobioticum*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Удмуртскому федеральному исследовательскому центру УрО РАН (тема № FUUE-2025-0004).

Для цитирования: Худякова А.В., Князева Э.А. Оценка устойчивости перспективных образцов картофеля к цистообразующим нематодам и раку картофеля. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2026;187(3):245-254. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-012

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

IDENTIFICATION OF THE DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o12

Assessing resistance of promising potato cultivars to cyst-forming nematodes and wart

Anna V. Khudyakova, Elzhibora A. Knyazeva

Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

Corresponding author: Anna V. Khudyakova, a.khudyakova@udman.ru

Background. Potato cyst-forming nematodes and wart are quarantine pathogens and cause significant economic damage (harvest losses can reach 100%). Compared to fungicides, host resistance is one of the most eco-friendly, cost-effective, sustainable, and consumer-oriented (chemical-free produce) options. Since the phenotypic assessment of resistance is laborious and costly, a promising breeding trend is the use of DNA markers linked to *R*-genes, which make it possible to identify valuable genotypes at the early stages of the breeding process.

Materials and methods. The material of the study included 5 cultivars, 8 promising precultivars, and 14 hybrids developed by the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences cooperatively with leading breeding centers in Russia. The molecular genetic analysis employed 5 DNA markers of nematode and wart resistance genes, most often used in breeding programs.

Results. A majority of genotypes (88.9%) had a marker linked to the wart resistance gene (*Sen1*). Among the markers of resistance to the golden potato nematode, 57R and N195 (74.1 and 70.4%, respectively) were much more common than Gro1-4 (22.2%). The presence of the *Gpa2* gene for potato nematode resistance was observed in 12 cultivars out of 27 (44.4% of the studied set). The results of genotyping were compared with the levels of susceptibility to *Globodera rostochiensis* and *Synchytrium endobioticum* in a number of cultivars. Diagnostic effectiveness of both *H1* gene markers (57R and N195) in this set was 100%, the NL25 marker showed 86.7%, and the DNA marker Gro1-4 manifested the lowest efficiency, only 27.6%. Cases with false positive and false negative results were identified.

Conclusion. The data obtained in this study attest to the expediency of using markers of the *H1* (57R and N195) and *Sen1* (NL25) genes in breeding programs, while markers of the *Gro1-4* gene (Gro1-4) proved inefficient.

Keywords: potato, resistance, DNA markers, *Globodera rostochiensis*, *Globodera pallida*, *Synchytrium endobioticum*

Acknowledgments: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state task assigned to the Udmurt Federal Research Center, UrB RAS (Project No. FUUE-2025-0004).

For citation: Khudyakova A.V., Knyazeva E.A. Assessing resistance of promising potato cultivars to cyst-forming nematodes and wart. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):245-254. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o12

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) – ключевая сельскохозяйственная культура, занимающая центральное место в потребительском сегменте питания населения России. Важным фактором в производстве продовольственного и семенного картофеля является использование устойчивых к основным болезням и вредителям сортов. По сравнению с применением фунгицидов, устойчивость к воздействию патогена является одним из наиболее экологичных, экономичных, устойчивых и ориентированных на потребителя вариантов (продукция не содержит химикатов) (Dalamu et al., 2023).

Наиболее опасными и вредоносными патогенами картофеля считаются рак картофеля и цистообразующие картофельные нематоды (ЦКН) (Manankov et al., 2025). Эффективных средств защиты против данных патогенов нет, поэтому основным способом борьбы является возделывание устойчивых сортов (Saynakova et al., 2018). При регистрации новых сортов картофеля в Государственном реестре сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию, необходимы сведения об устойчивости к золотистой картофельной нематодой и раку картофеля, причем последнее является обязательным требованием (Saynakova et al., 2018; Totsky et al., 2021).

При поражении урожая раком картофеля (заражение патогенным грибом *Synchytrium endobioticum* (Schilbersky) Percival) потери могут составлять от 35 до 100%. По состоянию на 31 декабря 2023 г. очаги возбудителя рака были обнаружены в 10 районах четырех субъектов РФ только на приусадебных участках (Totsky et al., 2021). Площадь заражения сельскохозяйственных угодий золотистой картофельной нематодой *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Behrens (ЗКН) в России достаточно высока (1,8 млн га), фитопаразит встречается в 7 федеральных округах 61 субъекта РФ (Mironenko et al., 2020; Doguzova et al., 2025). В то же время бледная картофельная нематода *G. pallida* (Stone) Behrens (БКН) в России не обнаружена, но в Европе широко распространена, поэтому существует возможность ввоза патогена на территорию страны путем импорта семенного картофеля (Gadjiev et al., 2020; Mironenko et al., 2020).

Селекция картофеля – важный процесс создания новых сортов, позволяющий выводить устойчивые сорта к основным болезням и вредителям. Кроме того, это наиболее экономичный и экологически безопасный способ повышения продуктивности культур (Bakulina et al., 2021).

Перспективным решением проблемы повышения эффективности селекции картофеля является применение комплексного подхода, включающего традиционную и маркер-вспомогательную селекцию (MAS, marker-assisted selection), в частности за счет использования ДНК-маркеров доминантных генов устойчивости к болезням и вредителям (Gerieva, Gazdanova, 2022; Gazdanova, Doguzova, 2023). Использование ДНК-маркеров в селекционной работе позволяет идентифицировать ценные генотипы на ранних этапах селекции, в том числе формы с несколькими R-генами. Такой подход используется для ускорения отбора устойчивых образцов с хорошими хозяйственно ценными признаками (Rogozina et al., 2019; Zoteeva et al., 2022; Doguzova, Gazdanova, 2024; Gazdanova, Gerieva, 2024). Преимуществом MAS является проведение молекулярно-генетических анализов в лаборатории на любой стадии развития растений; кроме

того, нет необходимости проведения фенотипической оценки в полевых условиях в определенное время года (Leonova, 2013).

Примерно 17 генов и локусов связаны с устойчивостью картофеля к ЗКН, три из которых (гены *H1*, *GroV1*, *Gro1-4*) обеспечивают почти абсолютную устойчивость к *G. rostochiensis* (Ivanova-Pozdejeva et al., 2023). Для детекции гена *H1* разработан целый ряд ПЦР-маркеров: TG689, TG689_1P, 57R, N146, N195 и CP113, к наиболее часто используемым в MAS относятся 57R, N195 и TG689 (Bakulina et al., 2021; Zoteeva et al., 2022; Dalamu et al., 2023). В кластере *Gro1* идентифицирован доминантный ген *Gro1-4*, детерминирующий устойчивость к патотипу Ro1 ЗКН (Antonova et al., 2016).

Второй вид цистообразующих нематод, *G. pallida*, является более агрессивным видом, так как способен поражать сорта картофеля, устойчивые к *G. rostochiensis* (Khiutti et al., 2017). Основным геном, контролирующим устойчивость картофеля к бледной картофельной нематодой (патотипы Pa2/Pa3), является ген *Gpa2*. Для его идентификации предложены внутренние ДНК-маркеры *Gpa2-1* и *Gpa2-2* (Asano et al., 2012), которые в настоящее время преимущественно используются в MAS, в том числе на территории Российской Федерации (Saynakova et al., 2018).

Устойчивость к возбудителю *Synchytrium endobioticum* детерминруется целым рядом генов (Totsky et al., 2021). Присутствие в геноме доминантного аллеля гена *Sen1* обеспечивает устойчивость к патотипу 1 рака картофеля (Van de Vossen et al., 2022). На сегодняшний день в практически ориентированных исследованиях наиболее используемым остается маркер NL25. Этот маркер выявлен почти у всех изученных в молекулярном скрининге ракоустойчивых отечественных сортов (Khiutti et al., 2017).

Цель исследования – молекулярно-генетический скрининг перспективных образцов картофеля с использованием ДНК-маркеров, сцепленных с генами устойчивости к цистообразующим нематодам и раку картофеля.

Материалы и методы

Материалом для исследования служили пять сортов, 8 перспективных предсортот и 14 гибридов картофеля совместной селекции Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (УдмФИЦ УрО РАН) с ведущими селекционными центрами России (табл. 1).

Выделение геномной ДНК из листьев картофеля осуществляли с помощью набора реагентов «ДНК-Экстракт-3» (ООО «НПФ Синтол», Москва) согласно протоколу производителя. Качество выделенных препаратов ДНК проверяли методом электрофореза.

ПЦР проводили в общем объеме 15 мкл с использованием готовой 2,5-кратной реакционной смеси «ПЦР-микс» (ООО «НПФ Синтол», Москва), соответствующих праймеров (прямой и обратный), матрицы ДНК и деионизированной воды в количестве, необходимом до конечного объема смеси. Нуклеотидные последовательности праймеров и режимы амплификации взяты из литературных источников и представлены в таблице 2. Для определения устойчивости к золотистой нематодой использовали SCAR-маркеры к генам *H1* (N195 и 57R) и *Gro1-4* (*Gro1-4*), к бледной нематодой – STS-маркер к гену *Gpa2* (*Gpa2-2*). Устойчивость к патотипу 1 рака картофеля идентифицировали с помощью SCAR-маркера NL25

Таблица 1. Селекционная характеристика перспективных образцов картофеля**Table 1. Breeding descriptions of promising potato accessions**

Сорта, отборные формы / Cultivars, selected forms	Селекционный питомник на 2025 г. / Breeding nursery for 2025	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator
‘Жуковский Ранний’	стандартный сорт	‘Ягодка’ × Гидра	ФИЦ картофеля им. Лорха
‘Винета’	стандартный сорт	2.1347-75N × ‘Solina’	EUROPLANT
‘Виза’	стандартный сорт	A6-2404-4 × ‘Berolina’	ФАНЦ Северо-Востока
‘Чайка’	стандартный сорт	‘Kingston’ × ‘Шурминский 2’	ФАНЦ Северо-Востока
2799-8	K ₁	‘Эликсред’ × ‘Беллароза’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2907-8	K ₁	‘Метеор’ × FZ2392	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2951-5	K ₁	‘Кармен’ × ‘Ночка’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2770-2	K ₂	BP808 × ‘Сигнал’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2398-2	K ₃	‘Элмундо’ × ‘Вымпел’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
Батыр	УПС	136-02 × 45-7-17	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
Богатырь	УПС	–	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
Зарни	УПС	121-00 × ‘Karlana’	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
Мелун	УПС	46-1-26 × 359-01	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
Парус	УПС	–	УдмФИЦ УрО РАН и УрФАНИЦ УрО РАН
Тюрагай	УПС	165-00 × 282-97	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
‘Шудбур’	УПС	316-02 × 45-7-17	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
Югдон	УПС	‘Сиреневый Туман’ × ‘Романце’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
1-13-1	УПС	–	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
20-11-2	УПС	37-4-29 × ‘Лазарь’	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
39-16-8	УПС	‘Беллароза’ × 428-05	УдмФИЦ УрО РАН и ФАНЦ Северо-Востока
1751-1	УПС	‘КоLETTE’ × 128-6	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2016-1	УПС	‘Ред Скарлетт’ × FZ2373	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Сорта, отборные формы / Cultivars, selected forms	Селекционный питомник на 2025 г. / Breeding nursery for 2025	Происхождение / Origin	Оригинатор / Originator
2059-3	УПС	‘Метеор’ × ‘Беллароза’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2261-4	УПС	‘Ягодка’ × ‘Bora Valley’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2261-5	УПС	‘Ягодка’ × ‘Bora Valley’	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
2326-3	УПС	‘Волат’ × BP808	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха
4792-2	УПС	–	УдмФИЦ УрО РАН и ФИЦ картофеля им. Лорха

Примечание: K₁ – конкурсный питомник испытания I года; K₂ – конкурсный питомник испытания II года; K₃ – конкурсный питомник испытания III года; УПС – участок перспективных образцов

Note: K₁ – competitive nursery of the first year of testing; K₂ – competitive nursery of the second year of testing; K₃ – competitive nursery of the third year of testing; УПС – site for promising accessions

Таблица 2. Характеристика маркеров генов устойчивости к патогенам картофеля, используемых в работе

Table 2. Characteristics of the markers of potato pathogen resistance genes used in the work

Ген / Gene	Маркер / Marker	Последовательность нуклеотидов 5'→3' / Nucleotide sequence 5'→3'	Размер фрагмента, пн / Fragment size, bp	Литературный источник / References
Устойчивость к золотистой нематоде				
H1	57R	F: TGCCTGCCTCTCCGATTTCT R: GGTTCAGCAAAAGCAAGGACGTG	450	Schultz et al., 2012
	N195	F: TGGAAATGGCACCCCACTA R: CATCATGGTTTCACTTGTTCAC	337	Asano et al., 2012
Gro 1-4	Gro 1-4	F: TCTTTGGAGATACTGATTCTCA R: CGACCTAAATGAAAAGCATCT	602	Gebhardt et al., 2006
Устойчивость к бледной нематоде				
Gpa2	Gpa2-2	F: GCACTTAGAGACTCATTCCA R: ACAGATTGTTGGCAGCGAAA	452	Asano et al., 2012
Устойчивость к раку картофеля				
Sen1	NL25	F: TATTGTTAATCGTTACTCCCTC R: AGAGTCGTTTACCGACTCC	1400	Asano et al., 2012

к гену *Sen1*. В качестве положительного контроля использовали сорт картофеля ‘Жуковский Ранний’, характеризующийся, согласно литературным данным, наличием диагностических маркеров 57R, N195, Gpa2-2, NL25 и отсутствием ДНК-маркера Gro1-4 (Klimenko et al., 2017; Totsky et al., 2021), отрицательный контроль – вода.

Реакцию амплификации проводили на термоциклере Trident 960 (HealForce, Китай) по соответствующим программам. Разделение продуктов амплификации проводили в 1,7-процентном агарозном геле в трис-ацетатном буфере с последующим окрашиванием бромидом этидия. Визуализацию полос и документирование данных

осуществляли с использованием системы визуализации гелей MaXidoc G2 (DAIHAN Scientific, Китай). Для оценки молекулярной массы фрагментов использовали ДНК-маркеры Step100+50 и Step100 Long (ООО «Биолабмикс», Новосибирск).

Фенотипическая оценка устойчивости исследуемых генотипов картофеля к карантинным патогенам (*Globodera rostochiensis* и *Synchytrium endobioticum*) проводилась на провокационном фоне в Федеральном исследовательском центре картофеля имени А.Г. Лорха (ФИЦ картофеля им. Лорха). При отсутствии полевых данных за истину принимали данные лабораторных испытаний.

Диагностическую эффективность ДНК-маркеров определяли как долю правильных результатов тестирования в общем количестве результатов.

Результаты и обсуждение

Результаты проведенного молекулярного скрининга генов устойчивости к ЦКН и раку картофеля приведены в таблице 3. Маркерный профиль контрольного сорта 'Жуковский Ранний' полностью совпал с литературными данными, указанными выше. Также результаты по двум стандартным сортам ('Виза', 'Чайка') согласуются с данными оригинатора (Bakulina et al., 2021).

Установлено, что большая часть исследованных образцов (88,9%) является носителями гена *Sen1* (см. табл. 3). Маркер NL25, наиболее используемый в прикладных исследованиях, обнаружен практически у всех ракоустойчивых отечественных и зарубежных сортов (Bakulina et al., 2021). В исследованной выборке носителями гена устойчивости к золотистой цистообразующей картофельной нематоды *H1* являются 20 образцов, гена *Gro1-4* – 6 образцов. Маркеры гена *H1* (57R и N195) детектировались совместно у всех генотипов картофеля, за исключением образца Первомай; частота их встречаемости составила 74,1% и 70,4% соответственно. Оба гена устойчивости к золотистой цистообразующей не-

Таблица 3. Маркерные профили перспективных образцов картофеля

Table 3. Marker profiles of promising potato accessions

Сорта, отборные формы / Cultivars, selected forms	ДНК-маркер (ген) / DNA marker (gene)				
	57R (<i>H1</i>)	N195 (<i>H1</i>)	Gro1-4-1 (<i>Gro1-4</i>)	Gpa2-2 (<i>Gpa2</i>)	NL 25 (<i>Sen1</i>)
'Жуковский Ранний' (контроль)	1	1	0	1	1
'Винета'	1	1	0	0	1
'Виза'	0	0	0	0	1
'Чайка'	0	0	0	1	1
2799-8	1	1	1	1	1
2907-8	1	1	0	1	1
2951-5	1	1	0	0	1
2770-2	0	0	0	1	1
2398-2	1	1	0	0	1
Батыр	1	1	0	1	1
Богатырь	1	1	0	0	1
Зарни	1	1	0	0	1
Занла	1	1	0	1	1
Мелун	1	1	1	0	1
Парус	0	0	0	0	1
Первомай	1	0	0	1	0
Тюрагай	1	1	1	1	1
'Шудбур'	1	1	0	0	1
Югдон	1	1	0	0	1
1-13-1	1	1	0	0	1
20-11-2	0	0	0	0	0
39-16-8	1	1	0	1	1
1751-1	1	1	1	0	1
2016-1	1	1	0	0	1
2261-4	0	0	1	1	0
2261-5	0	0	1	0	1
4792-2	1	1	0	1	1

методе выявлены у четырех образцов: Мелун, Тюрагай, 2799-8 и 1751-1.

Ген устойчивости к бледной картофельной нематоде (*Gpa2*) идентифицировали у 12 перспективных образцов, 10 из которых также имеют гены *H1* или *Gro1-4* и, следовательно, несут гены устойчивости к двум видам нематод (*Globodera rostochiensis* и *G. pallida*). Сорт 'Чайка' и образец 2770-2 являются носителями только гена *Gpa2*.

Современные направления в селекции сельскохозяйственных культур предусматривают создание исходного материала, обладающего устойчивостью к комплексу фитопатогенов (Zoteeva et al., 2022). В таблице 4 представлены генотипы, совмещающие гены устойчивости к картофельным нематодам и раку картофеля.

Таблица 4. Генотипы с комплексом генов устойчивости к золотистой и бледной картофельным нематодам и раку картофеля

Table 4. Genotypes with a complex of resistance genes to golden and pale potato nematodes, and wart

Комбинация генов / Gene combination	Генотипы / Genotypes
<i>H1, Gro1-4, Gpa2, Sen1</i>	Тюрагай, 2799-8
<i>H1, Gro1-4, Sen1</i>	Мелун, 1751-1
<i>H1, Gpa2, Sen1</i>	'Жуковский Ранний', Батыр, 2059-3, 4792-2, 39-16-8, 2907-8
<i>H1, Sen1</i>	'Винета', Зарни, Югдон, 'Шудбур', Богатырь, 2016-1, 1-13-1, 2951-5, 2398-2
<i>H1, Gpa2</i>	2326-3
<i>Gro1-4, Gpa2</i>	2261-4
<i>Gro1-4, Sen1</i>	2261-5
<i>Gpa2, Sen1</i>	'Чайка', 2770-2
<i>Sen1</i>	'Виза', Парус
Нет генов	20-11-2

Из 27 изученных генотипов картофеля наличием четырех генов устойчивости – к ЗКН (*H1, Gro1-4*), БКН (*Gpa2*), раку картофеля (*Sen1*) – характеризовались Тюрагай и гибрид 2799-8. Самой распространенной оказалась комбинация генов *H1, Sen1* (9 образцов). У гибрида 20-11-2 (37-4-29 × 'Лазарь') не обнаружен ни один ген устойчивости.

Информация о наличии в селекционном материале маркеров генов устойчивости к карантинным патогенам, таким как цистообразующие нематоды и рак картофеля, имеет особое значение, поскольку отбор устойчивых к этим патогенам генотипов с использованием стандартных фитопатологических методов ограничен.

В таблице 5 представлены результаты двухлетних лабораторных (предварительных) и полевых (государственных) испытаний 15 образцов картофеля совместной селекции УдмФИЦ УрО РАН с ведущими селекционными центрами на устойчивость к возбудителю рака (Далемский патотип) и золотистой картофельной нематодой (патотип Ro1).

В результате сопоставления данных детекции маркеров и полевой оценки на устойчивость к нематоду *G. rostochiensis* Ro1 выявлено, что все устойчивые образцы (2398-2, 2016-1, 39-16-8, Батыр, 'Шудбур', 1-13-1, 1751-1, Мелун, Зарни, Тюрагай, Югдон, 4792-2) имели два маркера (57R и N195) гена *H1*. Восприимчивые гибриды 2261-4, 2261-5, 20-11-2 (по результатам лабораторных испыта-

ний) характеризовались отсутствием ДНК-маркеров гена *H1*. Таким образом, диагностическая эффективность данных маркеров в нашем исследовании составила 100%. В работе A. Ivanova-Pozdejeva et al. (2023) авторы представили результаты 11-летних исследований по сопоставлению полевой устойчивости к *G. rostochiensis* и наличия ДНК-маркеров гена *H1* (57R и TG689). Диагностическая эффективность маркеров в их работе оказалась равна 99,1%. В то же время в работе И. В. Тоцкого с соавторами (Totsky et al., 2021) аналогичный показатель маркера 57R составил 86,11%. В целом полученные нами данные по маркерам гена *H1* подтверждают высокую надежность этих маркеров, что позволяет использовать их при отборе устойчивых к ЗКН образцов.

Еще один маркер устойчивости к ЗКН, *Gro1-4*, встречался достаточно редко – у трех устойчивых и двух восприимчивых генотипов, что свидетельствует о ложноотрицательных (когда есть устойчивость и нет маркера) и ложноположительных (есть маркер, но нет устойчивости) результатах исследований. Диагностическая эффективность составила всего 26,7%. Несмотря на то что маркер *Gro1-4* часто используется в скрининге и маркерной селекции картофеля, результаты на нашей выборке показали, что его применение не гарантирует положительного результата. Аналогичная картина прослеживается в работе О. Ю. Антоновой с коллегами, где они также выявили маркер *Gro1-4* всего у четырех генотипов из 109: двух устойчивых сортов, одного слабопоражаемого сорта и одного восприимчивого (Antonova et al., 2016).

По результатам фенотипической оценки устойчивости образцов картофеля к *Synchytrium endobioticum* вся выборка характеризовалась как устойчивая. При этом маркер NL25 гена *Sen1* детектировали у 13 генотипов. Для гибридов 20-11-2, 2261-4 таким образом получены ложноотрицательные результаты. В литературе можно встретить противоположные мнения насчет эффективности применения маркера NL25. Так, О. Ю. Антонова с соавторами в своей работе (Antonova et al., 2016) показывают высокий уровень корреляции наличия или отсутствия маркера и устойчивости/чувствительности генотипа к раку соответственно. В то же время проведен-

Таблица 5. Результаты испытаний на устойчивость к возбудителю рака и золотистой картофельной нематоде
Table 5. Results of the tests for resistance to the causative agent of wart and to the golden potato nematode

Сорта, отборные формы / Cultivars, selected forms	Рак картофеля / Potato wart disease				Золотистая картофельная нематода / Potato golden cyst nematode			
	Лабораторные / Laboratory		Полевые / Field		Лабораторные / Laboratory		Полевые / Field	
	1-й год / 1st year	2-й год / 2nd year	1-й год / 1st year	2-й год / 2nd year	1-й год / 1st year	2-й год / 2nd year	1-й год / 1st year	2-й год / 2nd year
2398-2	R	–	–	–	R	–	–	–
2261-4	R	R	R	R	S	S	–	–
2261-5	R	R	–	–	S	S	–	–
2016-1	R	R	R	R	R	R	R	–
39-16-8	R	R	R	R	R	R	R	–
Батыр	R	R	R	R	R	R	R	–
‘Шудбур’	R	R	R	R	R	R	R	–
1-13-1	R	R	R	R	R	R	R	–
1751-1	R	R	R	R	R	R	R	–
Мелун	R	R	R	R	R	R	R	–
Зарни	R	R	R	R	R	R	R	R
Тюрагай	R	R	R	R	R	R	R	R
Югдон	R	R	R	R	R	R	R	–
4792-2	R	R	R	R	R	R	R	–
20-11-2	R	R	R	–	S	S	–	–

Примечание: R (resistant) – устойчивый; S (susceptible) – восприимчивый; «–» – нет данных

Note: R – resistant; S – susceptible; “–” – no data available

ный И. В. Тощим с соавторами анализ 73 образцов картофеля не позволил говорить о надежности применения маркера NL25 для скрининга устойчивых сортов (Totsky et al., 2021). Диагностическая эффективность оценки устойчивости картофеля с применением маркера NL25, по нашим данным, составила 86,7%, что свидетельствует о целесообразности использования данного маркера для скрининга на устойчивость к *S. endobioticum* (патотип 1).

Заключение

Таким образом, по результатам молекулярно-генетического анализа установлено, что в изучаемой выборке чаще всего встречался ДНК-маркер, сцепленный с геном устойчивости к раку картофеля *Sen1* (у 88,9% генотипов). Отмечено его отсутствие у двух устойчивых генотипов, диагностическая эффективность маркера NL25 составила 86,7%. Маркеры гена *H1* устойчивости к ЗКН (57R и N195) встречались с частотой 74,1% и 70,4% соответственно. Согласно результатам лабораторных и полевых испытаний на устойчивость к *Globodera rostochiensis* (патотип Ro1), все резистентные образцы обладали геном *H1*, и лишь у трех детектировали ген *Gro1-4*. Диагно-

стическая эффективность маркеров этих генов в нашем исследовании составила 100% и 26,7% соответственно. В целом полученные нами данные свидетельствуют о необходимости использования в селекции маркеров генов *H1* (57R и N195) и *Sen1* (NL25) и об отсутствии эффективности применения маркеров гена *Gro1-4* (Gro1-4).

References / Литература

- Antonova O.Yu., Shvachko N.A., Novikova L.Yu., Shuvalov O.Y., Kostina L.I., Klimenko N.S. et al. Genetic diversity of potato varieties bred in Russia and near-abroad countries based on polymorphism of SSR-loci and markers associated with resistance *R*-genes. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(5):596-606. [in Russian] (Антонова О.Ю., Швачко Н.А., Новикова Л.Ю., Шувалов О.Ю., Костина Л.И., Клименко Н.С. и др. Генетическое разнообразие сортов картофеля российской селекции и стран ближнего зарубежья по данным полиморфизма SSR-локусов и маркеров *R*-генов устойчивости. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(5):596-606). DOI: 10.18699/VJ16.181
- Asano K., Kobayashi A., Tsuda S., Nishinaka M., Tamiya S. DNA marker-assisted evaluation of potato genotypes for poten-

- tial resistance to potato cyst nematode pathotypes not yet invading into Japan. *Breeding Science*. 2012;62(2):142-150. DOI: 10.1270/jsbbs.62.142
- Bakulina A.V., Savintseva L.S., Bashlakova O.N., Sintsova N.F. Molecular screening of potato varieties bred by Falenki Breeding station for resistance to phytopathogens. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(3):340-350. [in Russian] (Бакулина А.В., Савинцева Л.С., Башлакова О.Н., Синцова Н.Ф. Молекулярный скрининг сортов картофеля Фаленской селекционной станции на устойчивость к фитопатогенам. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(3):340-350). DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.3.340-350
- Dalamu, Tiwari J.K., Bairwa A., Bhatia N., Zinta R., Kaushal N. et al. Resistance evaluation for native potato accessions against late blight disease and potato cyst nematodes by molecular markers and phenotypic screening in India. *Life*. 2023;13(1):33. DOI: 10.3390/life13010033
- Doguzova N.N., Gazdanova I.O. Studying resistance of potato breeding material to *Phytophthora infestans* with DNA markers. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2024;4(72):18-22. [in Russian] (Догузова Н.Н., Газданова И.О. Изучение устойчивости к *Phytophthora infestans* селекционного материала картофеля с помощью ДНК-маркеров. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2024;4(72):18-22). DOI: 10.31563/1684-7628-2024-72-4-18-22
- Doguzova N.N., Pukhaev A.R., Gazdanova I.O. Identification of potato genotypes using DNA markers for potential resistance to potato cyst nematode. *The Agrarian Scientific Journal*. 2025;(10):11-17. [in Russian] (Догузова Н.Н., Пухаев А.Р., Газданова И.О. Идентификация генотипов картофеля с помощью ДНК-маркеров на предмет потенциальной устойчивости к картофельной цистообразующей нематоды. *Аграрный научный журнал*. 2025;(10):11-17). DOI: 10.28983/asj.y2025i10pp11-17
- Gadjiyev N.M., Lebedeva V.A., Rybakov D.A., Ivanov A.V., Zheltova V.V., Fomina N.A. et al. On using data from marker-assisted selection of source material and intervarietal hybrids in practical potato breeding. *Agricultural Biology*. 2020;55(5):981-994. [in Russian] (Гаджиев Н.М., Лебедева В.А., Рыбаков Д.А., Иванов А.В., Желтова В.В., Фомина Н.А. и др. Использование в практической селекции картофеля результатов ДНК-маркирования исходных родительских форм и межсортных гибридов. *Сельскохозяйственная биология*. 2020;55(5):981-994). DOI: 10.15389/agrobiology.2020.5.981rus
- Gazdanova I.O., Doguzova N.N. Potato resistance to *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida* using molecular markers. *Volga Region Farmland*. 2023;3(67):1001. [in Russian] (Газданова И.О., Догузова Н.Н. Устойчивость картофеля к *Globodera rostochiensis* и *Globodera pallida* с использованием молекулярных маркеров. *Нива Поволжья*. 2023;3(67):1001). DOI: 10.36461/NP.2023.67.3.002
- Gazdanova I.O., Gerieva F. Resistance of potato varieties to X, Y viruses using molecular markers. *The Bulletin of KrasGAU*. 2024;10(211):3-9. [in Russian] (Газданова И.О., Гериева Ф.Т. Устойчивость сортов картофеля к вирусам X, Y с применением молекулярных маркеров. *Вестник КрасГАУ*. 2024;10(211):3-9). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-10-3-9
- Gebhardt C., Bellin D., Henselewski H., Lehmann W., Schwarzfischer J., Valkonen J.P.T. Marker-assisted combination of major genes for pathogen resistance in potato. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;112(8):1458-1464. DOI: 10.1007/s00122-006-0248-8
- Gerieva F.T., Gazdanova I.O. Molecular and genetic analysis of potato cultivars from the collection of VSC RAS for resistance to phytopathogens. *The Agrarian Scientific Journal*. 2022;(6):11-14. [in Russian] (Гериева Ф.Т., Газданова И.О. Молекулярно-генетический анализ сортов картофеля на устойчивость к фитопатогенам. *Аграрный научный журнал*. 2022;(6):11-14). DOI: 10.28983/asj.y2022i6pp11-14
- Ivanova-Pozdejeva A., Jakobson L., Ilves K., Kivistik A., Kann L., Aida J. et al. Studies of potato resistance to *Globodera rostochiensis* revealed novel alleles for 57R marker. *Breeding Science*. 2023;73(3):300-312. DOI: 10.1270/jsbbs.22094
- Khiutti A.V., Antonova O.Yu., Mironenko N.V., Gavrilenko T.A., Afanasenko O.S. Potato resistance to quarantine diseases. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(1):51-61. [in Russian] (Хютти А.В., Антонова О.Ю., Мироненко Н.В., Гавриленко Т.А., Афанасенко О.С. Устойчивость картофеля к карантинным болезням. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(1):51-61). DOI: 10.18699/VJ17.223
- Klimenko N.S., Antonova O.Yu., Kostina L.I., Mamadbokirova F.T., Gavrilenko T.A. Marker-associated selection of Russian potato varieties with using markers of resistance genes to the golden potato cyst nematode (pathotype Ro1). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(4):66-75. [in Russian] (Клименко Н.С., Антонова О.Ю., Костина Л.И., Мамадобкирова Ф.Т., Гавриленко Т.А. Маркер-опосредованная селекция отечественных сортов картофеля с маркерами генов устойчивости к золотистой картофельной нематоды (патотип Ro1). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(4):66-75). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-4-66-75
- Leonova I.N. Molecular markers: implementation in crop plant breeding for identification, introgression, and gene pyramiding. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2013;17(2):314-325. [in Russian] (Леонова И.Н. Молекулярные маркеры: использование в селекции зерновых культур для идентификации, интрогрессии и пирамидирования генов. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013;17(2):314-325).
- Manankov V.V., Dobrov S.M., Yanyushkina N.A. Evaluation results of potato breeding material for resistance to wart and nematode in 2024. *Research Papers on Agronomy*. 2025;1(16):47-53. [in Russian] (Мананков В.В., Добров С.М., Янющкина Н.А. Результаты оценки селекционного материала картофеля на устойчивость к раку и нематоды в 2024 году. *Научные труды по агрономии*. 2025;1(16):47-53). DOI: 10.35244/2658-7963-2025-16-1-47-53
- Mironenko N.V., Gavrilenko T.A., Khiutti A.V., Afanasenko O.S. Quarantine nematode species and pathotypes potentially dangerous for domestic potato production: populations diversity and the genetics of potato resistance. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(7):705-721. [in Russian] (Мироненко Н.В., Гавриленко Т.А., Хютти А.В., Афанасенко О.С. Потенциально опасные для отечественного картофелеводства карантинные виды и патотипы нематод: изменчивость популяций и генетика устойчивости картофеля. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2020;24(7):705-721). DOI: 10.18699/VJ20.665
- Rogozina E.V., Terentjeva E.V., Potokina E.K., Yurkina E.N., Nikulin A.V., Alekseev Ya.I. Multiplex PCR-based identification of potato genotypes as donors in breeding for resistance to diseases and pests. *Agricultural Biology*. 2019;54(1):19-30. [in Russian] (Рогозина Е.В., Терентьева Е.В., Потоккина Е.К., Юркина Е.Н., Никulin А.В., Алексеев Я.И. Мультиплекс ПЦР-базированная идентификация сортов картофеля как доноров в селекции на устойчивость к болезням и вредителям. *Аграрная биология*. 2019;54(1):19-30). [in Russian] (Рогозина Е.В., Терен-

- тьева Е.В., Потокина Е.К., Юркина Е.Н., Никулин А.В., Алексеев Я.И. Идентификация родительских форм для селекции картофеля, устойчивого к болезням и вредителям, методом мультиплексного ПЦР-анализа. *Сельскохозяйственная биология*. 2019;54(1):19-30. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.1.19rus
- Saynakova A.B., Romanova M.S., Krasnikov S.N., Litvinchuk O.V., Alekseev Ya.I., Nikulin A.V. et al. Testing potato collection samples for the presence of genes for resistance to phytopathogens by means of DNA markers. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(1):18-24. [in Russian] [Сайнакова А.Б., Романова М.С., Красников С.Н., Литвинчук О.В., Алексеев Я.И., Никулин А.В. и др. Исследование коллекционных образцов картофеля на наличие генетических маркеров устойчивости к фитопатогенам. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(1):18-24]. DOI: 10.18699/VJ18.326
- Schultz L., Cogan N.O.I., McLean K., Dale M.F.B., Bryan G.J., Forster J.N.W. et al. Evaluation and implementation of a potential diagnostic molecular marker for *H1*-conferred potato cyst nematode resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Breeding*. 2012;131(2):315-321. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2012.01949.x
- Totsky I.V., Rozanova I.V., Safonova A.D., Batov A.S., Gureeva Yu.A., Khlestkina E.K. et al. Genotyping of potato samples from the GenAgro ICG SB RAS collection using DNA markers of genes conferring resistance to phytopathogens. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(6):677-686. [in Russian] [Тоцкий И.В., Розанова И.В., Сафонова А.Д., Батов А.С., Гуреева Ю.А., Хлесткина Е.К. и др. Генотипирование образцов картофеля коллекции «ГенАгро» ИЦиГ СО РАН с применением ДНК-маркеров генов устойчивости к фитопатогенам. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(6):677-686]. DOI: 10.18699/VJ21.077
- Van de Vossen B.T.L.H., Prodhomme C., Vossen J.H., van der Lee T.A.J. *Synchytrium endobioticum*, the potato wart disease pathogen. *Molecular Plant Pathology*. 2022;23(4):461-474. DOI: 10.1111/mpp.13183
- Zoteeva N.M., Antonova O.Yu., Klimenko N.S., Gavrilenko T.A. Markers of genes for resistance to late blight, potato virus Y and potato cyst nematode identified in advanced interspecific potato hybrids. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022;5(1):5-16. [in Russian] [Зотеева Н.М., Антонова О.Ю., Клименко Н.С., Гавриленко Т.А. Маркеры генов устойчивости к фитофторозу, Y вирусу картофеля и золотистой картофельной нематоды у перспективных клонов межвидовых гибридов картофеля. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(1):5-16]. DOI: 10.30901/2658-6266-2022-1-01

Информация об авторах

Анна Валерьевна Худякова, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 426067 Россия, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34, a.khudyakova@udman.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0125-9335>

Эльжибора Азатовна Князева, младший научный сотрудник, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 426067 Россия, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34, kasimova@udman.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7045-003X>

Information about the authors

Anna V. Khudyakova, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 T. Baramzinoy St., Izhevsk 426067, Russia, a.khudyakova@udman.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0125-9335>

Elzhibora A. Knyazeva, Associate Researcher, Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 T. Baramzinoy St., Izhevsk 426067, Russia, kasimova@udman.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7045-003X>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.04.2026; одобрена после рецензирования 26.06.2026; принята к публикации 08.07.2026.

The article was submitted on 06.04.2026; approved after reviewing on 26.06.2026; accepted for publication on 08.07.2026.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 632.4.01/.08
DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o10



Вирулентность краснодарской и дагестанской популяций *Puccinia hordei* Otth.

А. В. Данилова, Г. В. Волкова, О. А. Кудинова

Федеральный научный центр биологической защиты растений, Краснодар, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ольга Александровна Кудинова, alosa@list.ru

Актуальность. Карликовая ржавчина – одна из вредоносных болезней ячменя, которая ежегодно отмечается в Краснодарском крае и в Республике Дагестан. Вирулентность популяции *Puccinia hordei* Otth. в Дагестане ранее не изучалась, этот вопрос представляет интерес для установления границ северокавказской популяции, а также для мониторинга возможного заноса популяции фитопатогена из соседнего региона.

Материалы и методы. Вирулентность популяций изучали с использованием 15 сортов и линий-дифференциаторов ячменя международного набора. Учет инфекционных типов осуществляли с помощью шкалы Левина и Черевика. Разнообразие популяций по вирулентности считали по индексу Нея (Hs), различие между популяциями – по генетическому расстоянию Нея (N).

Результаты и выводы. Проанализирована вирулентность 76 монопустульных изолятов *P. hordei* из Краснодарского края и Республики Дагестан. Большинство изолятов были вирулентны к носителям генов *Rph1*, *Rph2*, *Rph3*, *Rph4*, *Rph5*, *Rph6* + *Rph2*, *Rph8*, *Rph12*, *Rph21* + *Rph2*, *Rph25*. В популяции из Дагестана не обнаружено изолятов, вирулентных к *Rph7* и *Rph9*, при этом преобладали изоляты, вирулентные к генам *Rph13* и *Rph14*. Различие между популяциями по индексу Нея составило 0,04 у. е. Разнообразие популяций из Краснодарского края и Дагестана составило соответственно 0,18 у. е. и 0,32 у. е. Популяции фитопатогена из обоих регионов насыщены изолятами с высоким содержанием аллелей вирулентности и не имеют значительных различий по индексу Нея. При этом популяция из Дагестана отличается более высоким разнообразием по частотам генов вирулентности.

Ключевые слова: карликовая ржавчина ячменя, ячмень озимый, гены устойчивости, фитопатоген

Благодарности: исследование проведено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ Федеральному научному центру биологической защиты растений по теме № FGRN-2025-0002 «Разработка приемов оптимизации фитосанитарного состояния посевов зерновых культур на основе мониторинга внутрипопуляционной структуры опасных патогенов, сортовой устойчивости и научно обоснованного применения индукторов болезнеустойчивости».

Для цитирования: Данилова А.В., Волкова Г.В., Кудинова О.А. Вирулентность краснодарской и дагестанской популяций *Puccinia hordei* Otth. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2026;187(3):255-261. DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o10

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o10

Virulence of the Krasnodar and Dagestan populations of *Puccinia hordei* Otth.

Anastasia V. Danilova, Galina V. Volkova, Olga A. Kudinova

Federal Research Center of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

Corresponding author: Olga A. Kudinova, alosa@list.ru

Background. Barley leaf rust is a harmful disease of barley in Russia and worldwide. In Krasnodar Territory, as well as in the Republic of Dagestan, this disease has been recorded every year. Dagestan, a geographically isolated terrain with contrasting climate conditions, harbors a diversity of wild barleys. The virulence of the *Puccinia hordei* Otth. population in Dagestan has not been studied, but this issue is of interest for establishing the boundaries for the North Caucasian population and for monitoring possible invasions of the pathogen's populations from adjacent areas.

Materials and methods. Virulence of the studied populations was analyzed on 15 barley cultivars and lines from international and Australian differential sets. Infectious types were registered using the Levine and Cherewick scale. Nei's genetic diversity index (Hs) was employed to calculate the diversity of the populations in their virulence, and Nei's genetic distance (N) for the differences between the populations.

Results and conclusions. Virulence of 76 monouredinal *P. hordei* isolates from Krasnodar Territory and the Republic of Dagestan was analyzed. Most of the isolates were virulent to *Rph1*, *Rph2*, *Rph3*, *Rph4*, *Rph5*, *Rph6* + *Rph2*, *Rph8*, *Rph12*, *Rph21* + *Rph2*, and *Rph25*. The Dagestan population had no isolates virulent to *Rph7* and *Rph9*, while the isolates virulent to *Rph13* and *Rph14* predominated. The difference between the populations scored 0.04 according to Nei, and the diversity of the Krasnodar and Dagestan populations was 0.18 and 0.32, respectively. The pathogen's populations from both regions were saturated with isolates with high content of virulent alleles and had no significant differences in Nei's index. At the same time, the population from Dagestan demonstrated higher diversity in the frequencies of virulence genes.

Keywords: barley leaf rust, winter barley, resistance genes, phytopathogen

Acknowledgments: the research was conducted in the framework of the state task assigned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to the Federal Research Center of Biological Plant Protection, Project No FGRN-2025-0002 "Development of methods for optimizing the phytosanitary status of cereal crops, based on monitoring the intrapopulation structure of dangerous pathogens, varietal resistance, and scientifically justified use of disease resistance inducers".

For citation: Danilova A.V., Volkova G.V., Kudinova O.A. Virulence of the Krasnodar and Dagestan populations of *Puccinia hordei* Otth. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2026;187(3):255-261. (In Russ.). DOI: 10.30901/2227-8834-2026-3-o10

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors or their employers.

Введение

Среди всех регионов России Краснодарский край занимает первое место по посевной площади и валовому сбору ячменя (930 тыс. тонн). Здесь выращивается большое количество сортов озимого и ярового ячменя, созданных ведущими селекционными центрами юга России. Площади под этой культурой в регионе занимают в среднем 300 тысяч гектаров (Repko et al., 2015). Ожидается, что производство ячменя увеличится на 50% и более в течение следующих 50 лет из-за быстро растущего спроса на эту культуру (Miralles et al., 2021).

Карликовая ржавчина ячменя (возбудитель – *Puccinia hordei* Otth.) является опасным заболеванием, широко распространенным во многих регионах мира (Verma et al., 2022; Rodríguez-Vázquez, Carrieri, 2024). В ряде публикаций обсуждались потери урожая восприимчивых сортов, достигающие 32% (Kumar et al., 2024). В некоторых случаях сообщалось о значительных потерях, достигающих 62% (Mehnaz et al., 2021; Nazareno et al., 2023). Возбудитель ежегодно регистрируется в Краснодарском крае (Danilova, Volkova, 2023).

Республика Дагестан – субъект Российской Федерации, крупнейший по территории и населению в Северо-Кавказском федеральном округе. Он граничит по суше и Каспийскому морю с пятью странами – Азербайджаном, Грузией, Казахстаном, Туркменистаном и Ираном, а в пределах Российской Федерации граничит с Калмыкией, Ставропольским краем и Чеченской Республикой. Дагестан является своего рода природной экологической лабораторией. На небольшой территории сочетаются очень контрастные почвенные, климатические и ландшафтные условия. Здесь сформировались многочисленные оригинальные виды и популяции дикорастущих растений, а также появилось множество культурных форм. Н. И. Вавилов рассматривал Дагестан как важнейший регион для формирования дикорастущих видов злаков – пшеницы, ржи и ячменя. На этой территории, кроме возделываемого ячменя *Hordeum vulgare* L. (ячмень обыкновенный) – как двурядного пленчатого (subsp. *distichon* convar. *distichon* L. и голозерного (convar. *nudum* (L.) A. Trof.), так и многорядного пленчатого (subsp. *vulgare* convar. *vulgare*) и голозерного (convar. *celeste* (L.) A. Trof.) (Lukyanova et al., 1990), распространены и дикорастущие виды: *H. spontaneum* L. (K. Koch) Thell. (я. дикий); *H. murinum* L. (я. мышиный) subsp. *murinum*, subsp. *leporinum*

(Ling.) Arcang. (я. заячий), subsp. *glaucum* (Steud.) Tzvel. (я. сизый); *H. marinum* Hunds. (я. приморский); *H. geniculatum* All. (я. коленчатый); *H. bulbosum* L. (я. луковичный); *H. brevisibulatum* (Trink.) Link (я. короткоостный) subsp. *brevisibulatum*, subsp. *violaceum* (Boiss. et Huet) Tzvel. (я. фиолетовый) (Tzvelev, 1987). Такое разнообразие дикорастущих видов ячменя может оказать огромное влияние на популяции возбудителей листовых болезней, включая карликовую ржавчину ячменя.

Федеральный научный центр биологической защиты растений (ФНЦБЗР) – единственный научный центр в России, где проводятся популяционные исследования *Puccinia hordei*. В основном изучается вирулентность популяции, собранной в южном регионе России (Краснодарский край, Ставропольский край, Ростовская область) (Danilova, Volkova, 2023). Популяционные исследования *P. hordei* из Дагестана ранее не проводились.

Споры ржавчины переносятся ветром на большие расстояния, и фитопатоген может переноситься через целые континенты (Prashant, Kurian, 2023). Несмотря на то что Краснодарский край и Республика Дагестан относятся к Северному Кавказу, уникальный климат и географический барьер в виде Кавказского хребта позволяют предположить, что дагестанская популяция *P. hordei* значительно отличается от краснодарской. Цель исследования – проанализировать вирулентность краснодарской и дагестанской популяций *P. hordei*.

Материалы и методы

Исследования были проведены на базе ФНЦБЗР (г. Краснодар) в течение 2022–2023 гг. Обобщение и анализ полученных данных осуществлены в 2024–2025 гг. Мы использовали оборудование Уникальной научной установки «Фитотрон для выделения, идентификации, изучения и поддержания рас, штаммов, фенотипов патогенов» (<https://fncbzz.ru/brk-i-unu/unique-installation-2/>) и объекты биоресурсной коллекции ФНЦБЗР «Государственная коллекция энтомоакарифагов и микроорганизмов» (<https://fncbzz.ru/brk-i-unu/unique-installation-1/>).

Инфекционный материал *P. hordei* был получен в результате маршрутных обследований производственных и селекционных посевов озимого ячменя в 2022 г. на территории Краснодарского края и Республики Дагестан. Карта с точками сбора биоматериала в двух регионах представлена на рисунке. Собранные листья ячменя, по-

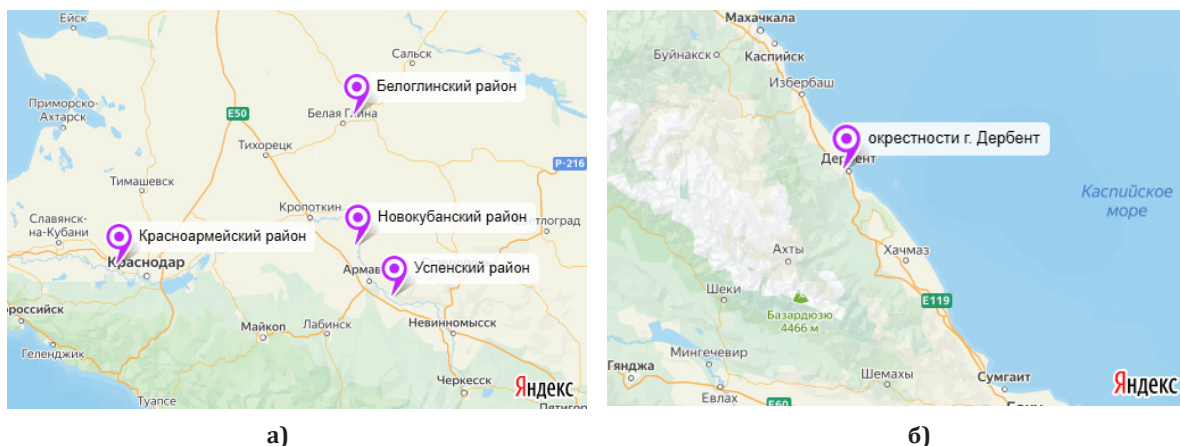


Рисунок. Места сбора инфекционного материала карликовой ржавчины ячменя в Краснодарском крае (а) и Республике Дагестан (б) в 2022 г.

Figure. Sites where the infectious material of barley leaf rust was collected in Krasnodar Territory (a), and the Republic of Dagestan (b) in 2022

раженные ржавчиной, маркировали и хранили в фильтровальной бумаге при температуре 4–6°C. Впоследствии инфекционный материал был размножен на восприимчивом сорте 'Виват'.

Инокуляцию проростков ячменя восприимчивого сорта 'Виват' водной суспензией спор, полученных из гербарного материала, а также выделение монопустульных изолятов *P. hordei* проводили общепринятыми фитопатологическими методами. После инокуляции проростки помещали в климатическую камеру и выдерживали в оптимальных для патогена условиях: температура – +18...+22°C; освещенность – 12–15 тыс. люкс в течение 16 ч (Volkova et al., 2024). Всего было получено 76 монопустульных изолятов *P. hordei*.

Анализ популяционной структуры грибов проводили на наборе сортов и линий ячменя, содержащих *Rph*-гены или их комбинации: *Rph1*, *Rph2*, *Rph3*, *Rph4*, *Rph5*, *Rph6* + *Rph2*, *Rph7*, *Rph8*, *Rph9*, *Rph12*, *Rph13*, *Rph14*, *Rph19*, *Rph21* + *Rph2* и *Rph25*.

Семисуточные проростки сортов и линий-дифференциаторов с генами *Rph* были инокулированы спорным материалом каждого из монопустульных изолятов *P. hordei*. На 10–14-е сутки оценивали типы реакций растений по шкале Левина и Черевика (Levine, Cherevick, 1952; Babayants et al., 1988). Растения с типами реакции 0, 0₁, 1, 2 были классифицированы как устойчи-

вые, а с типами реакции 3, 4 балла – как восприимчивые.

Разнообразие популяции *P. hordei* по частотам генов вирулентности считали с помощью индекса Нея (Hs) (Nei, 1978):

$$Hs(P) = \sum [1 - q_i^2 - (1 - q_i)^2] / k, 1 \leq i \leq k,$$

где q_i – частота i -го гена в данной популяции, k – количество генов.

Различия между популяциями гриба по частотам генов вирулентности оценивали с использованием генетического расстояния Нея (Nei, 1978; Kosman, Leonard, 2007):

$$D = -\ln B$$

$$B = \sum x_{ij} y_{ij} / \sqrt{\sum x_{ij}^2 \sum y_{ij}^2},$$

где x_{ij} и y_{ij} – частоты i -го гена за j -й год в сравниваемых популяциях.

Результаты

За период исследований была изучена вирулентность 76 монопустульных изолятов популяций возбудителя карликовой ржавчины ячменя, полученных из Краснодарского края и Республики Дагестан (табл. 1).

Установлено, что в популяции возбудителя карликовой ржавчины, собранной в Краснодарском крае, большинство изолятов вирулентны к *Rph1*, *Rph2*, *Rph3*, *Rph4*,

Таблица 1. Частота изолятов в популяциях *Puccinia hordei* Otth. из Краснодарского края и Республики Дагестан, вирулентных к линиям и сортам ячменя с генами *Rph*

Table 1. Frequencies of *Puccinia hordei* Otth. isolates virulent to barley lines and cultivars with *Rph* genes in the populations from Krasnodar Territory and the Republic of Dagestan

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Сорт/линия с геном <i>Rph</i> / Cultivar or line with a <i>Rph</i> gene	Частота вирулентных изолятов, % / Frequency of virulent isolates, %	
		Краснодарский край / Krasnodar Territory	Республика Дагестан / Republic of Dagestan
19643	'Sudan' (<i>Rph1</i>)	84,9	82,6
18718	'Peruvian' (<i>Rph2</i>)	90,6	43,5
25811	'Estate' (<i>Rph3</i>)	77,4	73,9
19648	'Gold' (<i>Rph4</i>)	100,0	69,6
21950	'Magnif 104' (<i>Rph5</i>)	98,1	87,0
18677	'Bolivia' (<i>Rph6</i> + <i>Rph2</i>)	94,3	65,2
18687	'Cebada Capa' (<i>Rph7</i>)	1,9	0,0
19647	'Egypt 4' (<i>Rph8</i>)	83,0	60,9
22361	'Triumph' (<i>Rph9</i>)	41,5	0,0
31188	'Abyssinian' (<i>Rph12</i>)	94,3	87,0
30728	PI 531849 (<i>Rph13</i>)	3,8	21,7
30729	PI 584760 (<i>Rph14</i>)	1,9	39,1
19393	'Prior' (<i>Rph19</i>)	52,8	34,8
18728	'Ricardo' (<i>Rph21</i> + <i>Rph2</i>)	98,1	91,3
22012	'Fong Tien' (<i>Rph25</i>)	84,9	73,9
Изучено изолятов, шт.		53	23
Индекс разнообразия Нея, Hs		0,18	0,32

Rph5, *Rph6* + *Rph2*, *Rph8*, *Rph12*, *Rph21* + *Rph2*, *Rph25* (образцы к-19643, к-18718, к-25811, к-19648, к-21950, к-18677, к-19647, к-31188, к-18728, к-22012) – их частота составляет 70–80%. Аналогичная ситуация наблюдалась и в предыдущие годы исследований (Volkova et al., 2019; Danilova, Volkova, 2023). Частота вирулентных изолятов к *Rph9* (к-22361) и *Rph19* (к-1939) составила 41,5% и 52,8% соответственно. В предыдущие годы исследований частоты вирулентности к образцам с данными генами устойчивости варьировали сильно – от 17,2% до 97,0% (Danilova, Volkova, 2023). Отмечено низкое содержание изолятов, вирулентных к носителю *Rph14* (к-30729), – 1,9%. Были идентифицированы изоляты, вирулентные к *Rph7* (к-18687) и впервые – к *Rph13* (к-30728). Их содержание составляло 1,9% и 3,8% соответственно. Это свидетельствует о появлении в краснодарской популяции *P. hordei* патотипов, вирулентных к образцам с генами, ранее считавшимися высокоэффективными (Danilova, Volkova, 2023).

В обеих популяциях *P. hordei* отмечена высокая частота изолятов (более 70–80%), вирулентных к *Rph1*, *Rph3*, *Rph5*, *Rph12*, *Rph21* + *Rph2*, *Rph25* (к-19643, к-25811, к-21950, к-31188, к-18728, к-2201). В дагестанской популяции частоты изолятов, вирулентных к *Rph4*, *Rph6* + *Rph2*, *Rph8*, варьировали от 60,9% до 69,6%, что ниже, чем в популяции из Краснодарского края. Отмечено, что до 50% изолятов из Дагестана являются вирулентными к *Rph2* и *Rph19*. По сравнению с краснодарской, для дагестанской популяции характерно более высокое содержание изолятов, вирулентных к *Rph13* (к-30728) и *Rph14* (к-30729) (21,7% и 39,1% соответственно). Изоляты гриба, вирулентные к *Rph7* (к-18687) и *Rph9* (к-22361), не были идентифицированы, в отличие от изолятов, полученных из Краснодарского края.

Статистический анализ разнообразия популяций *P. hordei* в соответствии с частотами аллелей вирулентности (согласно индексу Нея) показал, что краснодарская популяция была менее разнообразной ($H_s = 0,18$) по сравнению с дагестанской ($H_s = 0,32$). В обеих популяциях фитопатогена преобладали изоляты со средним числом (6–10) генов вирулентности (табл. 2). При анализе различий между популяциями по частотам аллелей вирулентности по индексу Нея (N) отмечено высокое сходство популяций фитопатогена из двух регионов ($N = 0,04$ у. е.).

Обсуждение результатов

По результатам проведенных исследований большинство изученных генов устойчивости оказались неэффективными против *P. hordei* как в Краснодарском крае, так и в Республике Дагестан. Наибольшей эффективностью отличается *Rph7* (к-18687), к которому с 2019 по 2022 г. в Краснодарском крае не было идентифицировано ни одного вирулентного изолята. В настоящей работе впервые зарегистрированы вирулентные к *Rph7* изоляты, которые отсутствуют в популяции из Дагестана.

Опубликованные данные показывают, что *Rph7*, ранее много лет обеспечивавший устойчивость против *P. hordei* во всем мире, теряет свою эффективность благодаря появлению новых патотипов патогена (Golan et al., 1978; Parlevliet et al., 1981; Steffenson et al., 1993; Dinh et al., 2020). В США *Rph7* был введен в большинство коммерческих сортов, которые использовались в течение 30 лет. В 1990-х годах, с появлением патотипов, вирулентных к данному гену, были зарегистрированы серьезные эпифитотии *P. hordei*, в результате которых эффективность *Rph7* значительно снизилась (Steffenson et al., 1993; Griffey et al., 1994). В отдельные годы вирулентные к *Rph7* патотипы гриба периодически наблюдали в Израиле (Singh et al., 2020), Марокко (Parlevliet et al., 1981) и Северной Америке (Steffenson et al., 1993). В Австралии *Rph7* по-прежнему эффективен (Park, 2003; Park et al., 2015). Исследователи из Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) указывали на высокую эффективность гена *Rph7* в России (Tyryshkin, 2009). Однако позднее были отмечены признаки поражения болезнью (единичные пустулы) у образцов, несущих идентифицированный ген *Rph7* (Abdullaev, 2015).

Носители генов *Rph13* и *Rph14* являются устойчивыми в Краснодарском крае (Danilova, Volkova, 2023), а в популяции гриба, собранной в Дагестане, выявлено более высокое содержание вирулентных к данным линиям изолятов. В Европе и Австралии отмечена потеря эффективности *Rph13* (Czembor H., Czembor J., 2007; Park et al., 2015), а *Rph14* и *Rph21* в настоящее время не поражаются изолятами из Австралии (Park, 2003; Park et al., 2015). В Краснодарском крае выявлена вирулентность изолятов к *Rph9* с частотой 41,5%, тогда как в Дагестане данная линия была устойчива к *P. hordei*. Гены *Rph3* и частично

Таблица 2. Частота изолятов *Puccinia hordei* Otth. с различным количеством генов вирулентности в популяциях Краснодарского края и Республики Дагестан

Table 2. Frequencies of *Puccinia hordei* Otth. isolates with different numbers of virulence genes in the populations from Krasnodar Territory and the Republic of Dagestan

Число аллелей вирулентности / Number of virulence alleles	Частота изолятов с разным числом аллелей вирулентности, % / Frequency of isolates with different numbers of virulence genes, %	
	Краснодарский край / Krasnodar Territory	Республика Дагестан / Republic of Dagestan
0	0	0
1–5	0	8,7
6–10	60,4	73,9
11–15	39,6	17,4
Изучено изолятов, шт.	53	23

Rph9 ранее были эффективны против карликовой ржавчины ячменя на территории бывшего СССР (Tyryshkin, 2009). Более поздние исследования показали потерю их эффективности (Abdullaev, 2015). Большее разнообразие дагестанской популяции по индексу Нея (Hs) по сравнению с популяцией из Краснодарского края, скорее всего, обусловлено контрастными агроклиматическими условиями, а также обилием дикорастущих видов ячменя.

Заключение

На основании результатов изучения популяционной структуры возбудителя карликовой ржавчины ячменя в Краснодарском крае и Республике Дагестан установлена высокая вирулентность обеих популяций. Большинство образцов ячменя с идентифицированными генами устойчивости были поражены патогеном с высокой частотой. В дагестанской популяции *P. hordei* отсутствуют изоляты, вирулентные к сортам с генами *Rph7* и *Rph9*, и преобладают изоляты, вирулентные к *Rph13* и *Rph14*. В популяции гриба, собранной в Краснодарском крае, зафиксированы изоляты, вирулентные к эффективному гену *Rph7*, при этом частота изолятов, вирулентных к образцам с генами *Rph13* и *Rph14*, низка. Популяция, собранная в Дагестане, характеризуется более высоким разнообразием по индексу Нея, при этом установлено высокое сходство структуры двух популяций гриба по частотам аллелей вирулентности ($N = 0,04$ у. е.), что свидетельствует об их стабильности по этому критерию. Большее разнообразие дагестанской популяции может быть обусловлено контрастными агроклиматическими условиями, а также обилием дикорастущих видов ячменя, произрастающих в данном регионе.

Мониторинг вирулентности популяций *P. hordei* в Краснодарском крае и в соседних регионах важен для селекции ячменя на иммунитет к карликовой ржавчине и планировании решений о сорторазмещении.

References / Литература

- Abdullaev R.A. Genetic diversity of local barley forms from Dagestan in adaptively important traits (Geneticheskoye raznoobrazie mestnykh form yachmenya iz Dagestana po adaptivno vazhnyim priznakam) [dissertation]. St. Petersburg: VIR; 2015. [in Russian] (Абдуллаев Р.А. Генетическое разнообразие местных форм ячменя из Дагестана по адаптивно важным признакам: дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург: ВИР; 2015).
- Babayants L.T., Mesterhazy A., Wachter F., Neklesa N.P., Dubinina L.V., Koch C., Slowinski M., Pfreit J., Schmidt E., Getov E., Barabas L. Methods of breeding and assessing resistance of wheat and barley to diseases in CMEA Member States. Prague; 1988. [in Russian] (Бабаянц Л.Т., Мештерхазы А., Вехтер Ф., Неклеса Н.П., Дубинина Л.В., Кох К., Словинский М., Пфрейт Я., Шмидт Э., Гетев Е., Баранбас Л. Методы селекции и оценки устойчивости пшеницы и ячменя к болезням в странах – членах СЭВ. Прага; 1988).
- Czembor H.J., Czembor J.H. Leaf rust resistance in winter barley cultivars and breeding lines. *Plant Breeding and Seed Science*. 2007;56:47-56.
- Danilova A., Volkova G. Efficiency of *Rph* genes against *Puccinia hordei* in Southern Russia in 2019–2021. *Agronomy*. 2023;13(4):1046. DOI: 10.3390/agronomy13041046
- Dinh H.X., Singh D., Periyannan S., Park R.F., Pourkheirandish M. Molecular genetics of leaf rust resistance in wheat and barley. *Theoretical and Applied Genetics*. 2020;133(7):2035-2050. DOI: 10.1007/s00122-020-03570-8
- Golan T., Anikster Y., Moseman J.G., Wahl I. A new virulent strain of *Puccinia hordei*. *Euphytica*. 1978;27(1):185-189. DOI: 10.1007/BF00039134
- Griffey C.A., Das M.K., Baldwin R.E., Waldenmaier C.M. Yield losses in winter barley resulting from a new race of *Puccinia hordei* in North America. *Plant Disease*. 1994;78:256-260.
- Kumar S., Bhardwaj S.C., Gangwar O.P., Prasad P., Sharma C.L., Singh A. et al. Developing a differential system for designating the pathotypes of *Puccinia hordei* causing barley leaf rust in India. *Journal of Plant Pathology*. 2024;107(1):315-326. DOI: 10.1007/s42161-024-01734-9
- Kosman E., Leonard K.J. Conceptual analysis of methods applied to assessment of diversity within and distance between populations with asexual or mixed mode of reproduction. *The New Phytologist*. 2007;174(3):683-696. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2007.02031.x
- Levine M.N., Cherevick W.J. USDA Technical Bulletin No. 1056. Studies on dwarf leaf rust of barley. Washington, DC: United States Department of Agriculture; 1952.
- Lukyanova M.V., Trofimovskaya A.Ya., Gudkova G.N., Terenteva I.A., Yarosh N.P. Flora of cultivated plants. Vol. 2 (Pt 2). Barley (Yachmen). V.D. Kobylansky, M.V. Lukyanova (eds). Leningrad: Agropromizdat; 1990. [in Russian] (Лукьянова М.В., Трофимовская А.Я., Гудкова Г.Н., Терентьева И.А., Ярош Н.П. Культурная флора СССР. Т. 2 (ч. 2). Ячмень / под ред. В.Д. Кобылянского, М.В. Лукьяновой. Ленинград: Агропромиздат; 1990).
- Mehnaz M., Dracatos P.M., Park R.F., Singh D. Mining Middle Eastern and Central Asian barley germplasm to understand diversity for resistance to *Puccinia hordei*, causal agent of leaf rust. *Agronomy*. 2021;11(11):2146. DOI: 10.3390/agronomy11112146
- Miralles D.J., Abeledo G.L., Prado S.A., Chenu K., Serrago R.A., Savin R. Barley. In: V.O. Sadras, D.F. Calderini (eds). *Crop Physiology Case Histories for Major Crops*. Cambridge, MA: Academic Press; 2021. p.164-195. DOI: 10.1016/B978-0-12-819194-1.00004-9
- Nazareno E.S., Matny O., Jin Y., Fetch Jr. T., Rouse M.N., Steffenson B.J. Virulence dynamics of the barley leaf rust pathogen (*Puccinia hordei*) in the United States from 1989 to 2020. *Plant Disease*. 2023;107(12):3952-3957. DOI: 10.1094/PDIS-03-23-0583-RE
- Nei M. Estimation of average heterozygosity and genetic distance from a small number of individuals. *Genetics*. 1978;89(3):583-590. DOI: 10.1093/genetics/89.3.583
- Park R.F. Pathogenic specialization and pathotype distribution of *Puccinia hordei* in Australia, 1992 to 2001. *Plant Disease*. 2003;87(11):1311-1316. DOI: 10.1094/PDIS.2003.87.11.1311
- Park R.F., Golegaonkar P.G., Derevnina L., Sandhu K.S., Karagolu H., Elmansour H.M. et al. Leaf rust of cultivated barley: pathology and control. *Annual Review of Phytopathology*. 2015;53:565-589. DOI: 10.1146/annurev-phyto-080614-120324
- Parlevliet J.E., van der Beek J.G., Pieters R. Presence in Morocco of brown rust, *Puccinia hordei*, with a wide range of virulence to barley. *Cereal Rusts Bulletin*. 1981;9:3-8.
- Prashant P., Kurian J.A. *Puccinia* spore movement in India compared to other sub-continent of the World: A review. *The Pharma Innovation Journal*. 2023;SP-12(7):2582-2587.
- Repko N.V., Podolyak K.V., Smirnova E.V., Ostrozhnaya Yu.V. Statistical study on world production of barley grain. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2015;(106):1062-1070. [in Russian] (Репко Н.В.,

- Подольяк К.В., Смирнова Е.В., Острожная Ю.В. Статистические исследования мирового производства зерна ячменя. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2015;(106):1062-1070).
- Rodríguez-Vázquez R., Carrieri V. A proteomic approach to abiotic and biotic stress in barley: a review. *Plant Molecular Biology Reporter*. 2024;42(1):1-33. DOI: 10.1007/s11105-023-01399-1
- Singh D., Mehnaz M., Dracatos P., Park R.F. Australian barley cultivar pedigree and leaf rust seedling and adult plant resistance genotype information. *Cereal Rust Report*. 2020;17(1):1-9.
- Steffenson B.J., Jin Y., Griffey C.A. Pathotypes of *Puccinia hordei* with virulence for the barley leaf rust resistance gene *Rph7* in the United States. *Plant Disease*. 1993;77:867-869.
- Tyryshkin L.G. Genetic control of effective leaf rust resistance in collection accessions of barley *Hordeum vulgare* L. *Russian Journal of Genetics*. 2009;45(1):376-378. DOI: 10.1134/S1022795409030181
- Tzvelev N.N. Systema graminearum (Poaceae) ac earum evolutionis (relatio in sessijne Komaroviana annua XXXVII die 11 mensis Februarii anna 1985). Leningrad: Nauka; 1987. [in Russian] (Цвелев Н.Н. Система злаков (Poaceae) и их эволюция (доложено на тридцать седьмом ежегодном Комаровском чтении 11 февраля 1985 г.). Ленинград: Наука; 1987).
- Verma R.P.S., Lal C., Malik R., Kharub A.S., Kumar L., Kumar D. Barley improvement: Current status and future prospects in changing scenario. In: P.L. Kashyap, V. Gupta, O.P. Gupta, R. Sendhil, K. Gopalareddy, P. Jasrotia, G.P. Singhet (eds). *New Horizons in Wheat and Barley Research. Crop Protection and Resource Management*. Singapore: Springer; 2022. p.93-134. DOI: 10.1007/978-981-16-4449-8_6
- Volkova G., Danilova A.V., Kudinova O.A. The virulence of the barley leaf rust pathogen in the North Caucasus in 2014–2017. *Agricultural Biology*. 2019;54(3):589-596. [in Russian] (Волкова Г.В., Данилова А.В., Кудинова О.А. Вирулентность популяции возбудителя карликовой ржавчины ячменя на Северном Кавказе в 2014–2017 годах. *Сельскохозяйственная биология*. 2019;54(3):589-596). DOI: 10.15389/agrobiology.2019.3.589rus
- Volkova G.V., Yakhnik Y.V., Kudinova O.A., Danilova A.V., Gvozdeva M.S., Rudenko V.D., Kim Y.S., Kustadinchev A.D. (comp). Fungal pathogens of spiked cereal crops: biology, distribution, harmfulness, methods of recording, collecting and storage of biomaterial. Creation of artificial infection backgrounds: Scientific and practical recommendations (Gribnye patogeny zernovykh kolosovykh kultur: biologiya, rasprostraneniye, vredonosnost, metody ucheta, sbora i khraneniya biomateriala. Sozdaniye iskusstvennykh infektsionnykh fonov: Nauchno-prakticheskiye rekomendatsii). Krasnodar: FRC of Biological Plant Protection; 2024. [in Russian] (Грибные патогены зерновых колосовых культур: биология, распространение, вредоносность, методы учета, сбора и хранения биоматериала. Создание искусственных инфекционных фонов: Научно-практические рекомендации / сост. Г.В. Волкова, Я.В. Яхник, О.А. Кудинова, А.В. Данилова, М.С. Гвоздева, В.Д. Руденко, Ю.С. Ким, А.Д. Кустадинчев. Краснодар, ФНЦ биологической защиты растений; 2024).

Информация об авторах

Анастасия Валерьевна Данилова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр биологической защиты растений, 350039 Россия, Краснодар, ул. Калинина, 62, starlight001@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6009-9757>

Галина Владимировна Волкова, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории, Федеральный научный центр биологической защиты растений, 350039 Россия, Краснодар, ул. Калинина, 62, galvol.bpp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3696-2610>

Ольга Александровна Кудинова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр биологической защиты растений, 350039 Россия, Краснодар, ул. Калинина, 62, alosa@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0568-4312>

Information about the authors

Anastasia V. Danilova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Federal Research Center of Biological Plant Protection, 62 Kalinina St., Krasnodar 350039, Russia, starlight001@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6009-9757>

Galina V. Volkova, Dr. Sci. (Biology), Corresponding Member of the RAS, Chief Researcher, Head of a Laboratory, Federal Research Center of Biological Plant Protection, 62 Kalinina St., Krasnodar 350039, Russia, galvol.bpp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3696-2610>

Olga A. Kudinova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Federal Research Center of Biological Plant Protection, 62 Kalinina St., Krasnodar 350039, Russia, alosa@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0568-4312>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.12.2025; одобрена после рецензирования 19.06.2026; принята к публикации 06.07.2026. The article was submitted on 16.12.2025; approved after reviewing on 19.06.2026; accepted for publication on 06.07.2026.

**Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции /
Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding**

**Научный рецензируемый журнал /
Scientific Peer-Reviewed Journal**

ISSN 2227-8834 (Print); ISSN 2619-0982 (Online)
4 выпуска в год (ежеквартально) / Publication frequency: quarterly
<https://elpub.vir.nw.ru>; e-mail: trudyVIR@vir.nw.ru

Языки: русский, английский / Languages: Russian, English
Индексируется в РИНЦ (НЭБ), Scopus, RSCI, DOAJ, AGRIS, входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук / Indexed/abstracted by the Russian Science Citation Index on eLIBRARY.RU platform, Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI) on the Web of Science platform, DOAJ, AGRIS, included in the list of publications recognized by the Russian Higher Attestation Commission (VAK RF) when candidate and doctoral dissertations are defended.

Открытый доступ к полным текстам / Open access to full texts
<https://elpub.vir.nw.ru>
<http://www.vir.nw.ru/trudy>
<https://www.elibrary.ru/contents.asp?titleid=27909>

Требования к статьям и правила рецензирования, электронный архив в открытом доступе и иная дополнительная информация размещены на сайте журнала <https://elpub.vir.nw.ru> / Full information for authors, reviewers, and readers (open access to electronic versions and subscription to print editions) can be found at <https://elpub.vir.nw.ru>

Прием статей через электронную редакцию на сайте журнала <https://elpub.vir.nw.ru>. Предварительно необходимо зарегистрироваться как автору, затем в правом верхнем углу страницы выбрать «Отправить рукопись». После завершения загрузки материалов обязательно выбрать опцию «Отправить письмо», в этом случае редакция автоматически будет уведомлена о получении новой рукописи / Manuscripts are accepted via the online editing resource at the Journal's website <https://elpub.vir.nw.ru>. The sender needs to register as the author and select in the upper righthand corner "Send a manuscript". After the loading of the materials, the option "Send a letter" is to be chosen, so that the editors would be automatically informed that a new manuscript has been received.

Научный редактор: *Е.А. Соколова*
Корректора: *А.Г. Крылов*
Компьютерная верстка: *А.В. Иванов*

Адрес редакции:

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42
Тел.: (812) 314-49-14; e-mail: trudyVIR@vir.nw.ru; i.kotielkina@vir.nw.ru

Почтовый адрес редакции:

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Подписано в печать 25.09.2026.
Дата выхода в свет 30.09.2026.
Формат 70×100¹/₈.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 33. Тираж 100 экз. Заказ № 390/2.

Подписной индекс 80333.
Журнал распространяется бесплатно и по подписке.

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР)

Адрес издателя:

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Отпечатано:

ИП «Владимиров Вадим Исаакович»
Адрес: 192284, Малая Балканская ул., д.4, к.1 литера А кв. 55

