

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

**ТРУДЫ
ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ,
ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ, том 184
выпуск 3**

(основаны Р. Э. Регелем в 1908 г.)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

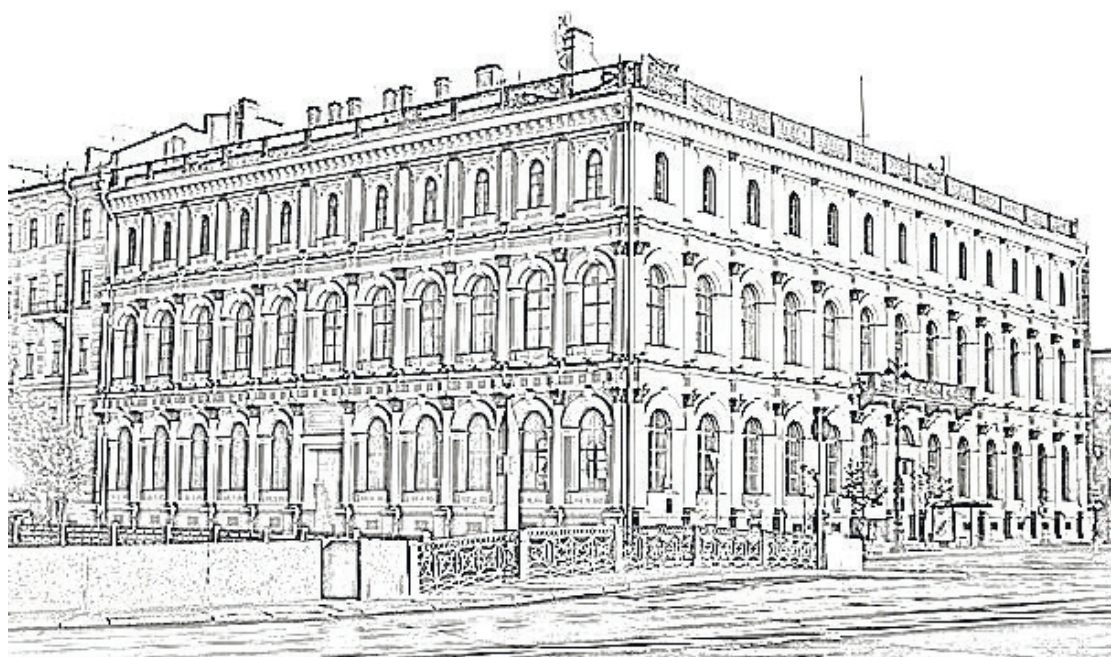
**PROCEEDINGS
ON APPLIED BOTANY, GENETICS
AND BREEDING, vol. 184
issue 3**

(founded by Robert Regel in 1908)

**ST. PETERSBURG
2023**

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»

Главный редактор

Хлесткина Елена Константиновна, д-р биол. наук, профессор 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, чл.-кор. РАО (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)
Зотеева Надежда Мубаровна, д-р биол. наук (Россия)
Корзун Виктор Николаевич, д-р биол. наук (Германия)
Лоскутов Игорь Градиславович, д-р биол. наук (Россия)
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, чл.-кор. 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)
Солодوخина Ольга Владимировна, д-р биол. наук (Россия)
Тихонова Надежда Геннадьевна, канд. биол. наук (Россия)
Турусбеков Ерлан Кенесбекович, канд. биол. наук, профессор (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)
Бервилле Андре, д-р (Франция)
Бёрнер Андреас, д-р (Германия)
Беспалова Людмила Андреевна, д-р с.-х. наук, академик РАН (Россия)
Вишнякова Маргарита Афанасьевна, д-р биол. наук (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, профессор, академик РАН (Россия)
Моргунов Алексей Иванович, д-р (Турция)
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

2023 Volume 184 issue 3

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3
<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

Editor-in-chief

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor 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

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

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

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

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

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

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

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

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

Erlan K. Turuspekov, Cand. Sci. (Biology), Professor, Kazakhstan

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

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

Andre Jean Berville, Dr., France

Lyudmila A. Bepalova, 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, Dr., Turkey

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

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

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

Ответственные редакторы выпуска

Хлесткина Елена Константиновна, д-р биол. наук, профессор 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, 2023. Т. 184, вып. 3. 246 с.

Отслежено расширение криоколлекции образцов картофеля, сохраняемой в криобанке ВИР. Дан анализ генетического улучшения показателей урожайности и качества зерна у сортов мягкой пшеницы, созданных в Марокко за 40 лет селекции. Проведена оценка урожайности и качества зерна различных по происхождению гибридов кукурузы в условиях Приморского края. Исследован эффект гетерозиса и показаны перспективы гибридных популяций яровой пшеницы в селекции на продуктивность и засухоустойчивость. Проанализирован потенциал продуктивности гибридов кукурузы селекции национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко для глубокой переработки зерна. На основе нормированных индексов отобранны сорта земляники по признакам продуктивности и качества ягод. Определены показатели экологической изменчивости у сортов яровой мягкой пшеницы в условиях Тюменской области. Проведено эколого-географическое изучение образцов арахиса из коллекции ВИР. В условиях Московской области дана фенологическая оценка скороспелых образцов сои (*Glycine max* (L.) Merr.). В контрастных эколого-географических условиях исследована стабильность продуктивности и периода вегетации фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.). С помощью методологии Хаймана изучено наследование количественных признаков у 15 диаллельных гибридов овощной фасоли. Проведен сравнительный анализ сортов тысячелистника обыкновенного в Подмоскowie. Продемонстрировано использование маркер-опосредованного отбора в создании селекционных образцов и комплексных доноров яблони, сочетающих устойчивость к парше с повышенным потенциалом лежкоспособности плодов. С использованием SSR- и SCoT-маркеров изучена генетическая структура коллекции сортов райграса (*Lolium*). Описана структура сеgetальной флоры полевых культур степной зоны Краснодарского края. В условиях западносибирской лесостепи показана изменчивость фенологических и морфологических признаков *Caltha palustris* L. *in situ* и *ex situ*. Охарактеризовано генетическое разнообразие образцов ячменя из стран Восточной Азии по устойчивости к мучнистой росе. Представлены результаты изучения линий яровой мягкой пшеницы, содержащих хроматин от иностранных сортов твердой пшеницы. Оценена устойчивость сортов и линий яровой мягкой пшеницы к возбудителям септориозной, пиренофорозной и темно-бурой пятнистостей. Проанализирована экспрессия гена фактора транскрипции *StTCP23* в растениях картофеля, инокулированных виридом веретеновидности клубней. Обсуждаются эколого-биологические особенности и перспективы интродукции *Cornus mas* в центральной России. Рассмотрено генетическое разнообразие мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по аллельному составу HMW-GS. Опубликованы: краткое сообщение к 95-летию юбилею профессора В. Л. Витковского, а также «Список основных методических рекомендаций (указаний) ВИР за 2000–20022 гг.».

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, 2023

Editors in charge of this issue

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor 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, 2023. Vol. 184, iss. 3. 246 p.

An overview showing the development of the potato cryocollection preserved in the VIR cryobank is presented. Genetic gain of grain yield and quality is analyzed for bread wheat cultivars representing 40 years of breeding in Morocco. Grain yield and quality indicators have been assessed in maize hybrids of various origin under the conditions of Primorsky Territory. The effect of heterosis and the prospects of hybrid spring wheat populations in breeding for productivity and drought resistance have been studied. Productivity potential for deep grain processing has been analyzed in maize hybrids developed at the P.P. Lukyanenko National Grain Center. Normalized indices have been used to select strawberry cultivars according to their productivity and berry quality. Indicators of environmental variability have been identified for spring bread wheat cultivars under the conditions of Tyumen Province. An ecogeographic study of peanut accessions from the VIR collection has been conducted. Phenological assessment of early-maturing soybean accessions (*Glycine max* (L.) Merr.) has been carried out under the conditions of Moscow Province. Productivity and growing-season stability has been studied in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under contrasting ecogeographic conditions. Hayman's methodology has been applied to study the genetic control of yield components in 15 diallel hybrids of green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Comparative ecological testing of *Achillea millefolium* (L.) cultivars has been performed in Moscow Province. Marker-assisted selection has been used in the development of advanced apple-tree forms and donors combining scab resistance with increased fruit storability. The genetic structure of the collection of ryegrass (*Lolium*) cultivars has been studied using SSR and SCoT markers. The segetal flora of field crops and its structure are described for the steppe zone of Krasnodar Territory. *In situ* and *ex situ* variability of phenological and morphological features in *Caltha palustris* L. is demonstrated for the conditions of the West Siberian forest steppe. Genetic diversity of barley accessions from East Asian countries is evaluated for resistance to powdery mildew. Spring bread wheat lines containing alien chromatin from foreign durum wheat cultivars have been tested. Resistance of spring bread wheat cultivars and lines to *Septoria* leaf blotch, tan spot, and spot blotch pathogens has been assessed. The expression of the transcription factor encoding gene *StTCP23* in potato plants infected with the tuber spindle viroid has been analyzed. Ecological and biological features and prospects of the introduction of *Cornus mas* in Central Russia are discussed. Genetic diversity of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in the allelic composition of HMW-GS is reviewed. A brief report dedicated to the 95th birthday of Prof. V. L. Vitkovsky, and a selective list of VIR's methodological recommendations (guidelines) for 2000–2022 are published.

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, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Ефремова О.С., Волкова Н.Н., Рыбаков Д.А., Лисицына О.В., Озерский П.В., Гавриленко Т.А. Расширение криоколлекции образцов картофеля, сохраняемой в криобанке ВИР.....	9
--	---

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Беннани С., Тагути М., Габун Ф. Генетическое улучшение показателей урожайности и качества зерна у сортов мягкой пшеницы, созданных в Марокко за 40 лет селекции.....	21
--	----

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Бутовец Е.С., Даниленко И.Н., Красковская Н.А. Оценка урожайности и качества зерна различных по происхождению гибридов кукурузы в условиях Приморского края.....	32
--	----

Волкова Л.В., Амунова О.С. Изучение эффекта гетерозиса и прогноз перспективности гибридных популяций яровой пшеницы в селекции на продуктивность и засухоустойчивость.....	41
--	----

Гольдштейн В.Г., Супрунов А.И., Богдан П.М., Шерстобитов В.В., Хорева В.И., Носовская Л.П., Адикаева Л.В., Хатефов Э.Б. Потенциал продуктивности гибридов кукурузы селекции национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко для глубокой переработки зерна.....	51
--	----

Лапшин В.И., Яковенко В.В. Отбор сортов земляники по признакам продуктивности и качества ягод на основе нормированных индексов.....	61
---	----

Новохатин В.В., Зуев Е.В., Шеломенцева Т.В., Леонова Т.А. Показатели экологической изменчивости у сортов яровой мягкой пшеницы в условиях Тюменской области.....	70
--	----

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Бемова В.Д., Асфандиярова М.Ш., Якушева Т.В., Гаврилова В.А., Кишлян Н.В. Эколого-географическое изучение образцов арахиса коллекции ВИР.....	79
---	----

Власова Е.В., Горбунова Ю.В., Сеферова И.В. Фенологическая оценка скороспелых образцов сои (<i>Glycine max</i> (L.) Merr.) в условиях Московской области.....	90
--	----

Новикова Л.Ю., Берзегова А.А., Гуркина М.В., Буравцева Т.В. Стабильность продуктивности и периода вегетации фасоли обыкновенной (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) в контрастных эколого-географических условиях.....	105
--	-----

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Контрерас-Рохас М., Гусман Д.Г.Г., Саласар Меркадо С.А. Генетический контроль компонентов урожайности овощной фасоли (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.).....	116
---	-----

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Коротких И.Н., Невкрытая Н.В., Платонова Т.В. Сравнительное экологическое испытание сортов тысячелистника обыкновенного в Подмосковье.....	125
--	-----

Супрун И.И., Егоров Е.А., Насонов А.И., Лободина Е.В., Токмаков С.В., Степанов И.В. Маркер-опосредованный отбор в создании селекционных образцов и комплексных доноров яблони с устойчивостью к парше и повышенным потенциалом лежкоспособности плодов.....	135
---	-----

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

Мавлютов Ю.М., Вертикова Е.А., Шамустакимова А.О., Клименко И.А. Изучение генетической структуры коллекции сортов райграса (<i>Lolium</i>) с использованием SSR- и SCoT-маркеров	146
---	-----

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Лулева Н.Н., Закота Т.Ю. Структура сегетальной флоры полевых культур степной зоны Краснодарского края.....	161
Фомина Т.И. Изменчивость фенологических и морфологических признаков <i>Caltha palustris</i> L. <i>in situ</i> и <i>ex situ</i> в условиях западносибирской лесостепи	169

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Абдуллаев Р.А., Лукина К.А., Баташева Б.А., Ковалева О.Н., Радченко Е.Е. Генетическое разнообразие образцов ячменя из стран Восточной Азии по устойчивости к мучнистой росе.....	178
Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Гульязева Е.И., Андреева Л.В. <i>Triticum durum</i> Desf. – ценный источник генов для расширения генетического разнообразия яровой мягкой пшеницы.....	187
Зеленева Ю.В., Судникова В.П., Коваленко Н.М., Гусев И.В. Устойчивость сортов и линий яровой мягкой пшеницы к возбудителям септориозной, пиренофорозной и темно-бурой пятнистостей.....	196
Мироненко Н.В., Орина А.С., Лашина Н.М., Афанасенко О.С. Экспрессия гена фактора транскрипции <i>StTCP23</i> в растениях картофеля, инокулированных вириодом веретеновидности клубней	207

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Емельянова О.Ю., Цой М.Ф. Эколого-биологические особенности и перспективы интродукции <i>Cornus mas</i> в центральной России.....	214
---	-----

ОБЗОРЫ

Чебатарева М.В. Генетическое разнообразие мягкой пшеницы (<i>Triticum aestivum</i> L.) по аллельному составу HMW-GS.....	221
--	-----

11. ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

Ухатова Ю.В., Шлявас А.В. Витковский Всеволод Леонидович (1928–2005): к 95-летию со дня рождения	233
Список основных методических рекомендаций (указаний) ВИР за 2000–2022 гг.	240

CONTENTS

MOBILIZATION AND CONSERVATION OF THE GENETIC DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

- Efremova O.S., Volkova N.N., Rybakov D.A., Lisitsyna O.V., Ozerski P.V., Gavrilenko T.A.**
Development of the potato cryocollection preserved in the VIR cryobank 9

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

- Bennani S., Taghouti M., Gaboun F.**
Genetic gain of grain yield and quality in bread wheat cultivars representing 40 years of breeding in Morocco..... 21
- Butovets E.S., Danilenko I.N., Kraskovskaya N.A.**
Evaluation of grain yield and quality in maize hybrids of various origin under the conditions of Primorsky Territory..... 32
- Volkova L.V., Amunova O.S.**
Studying the effect of heterosis and predicting the prospects of hybrid spring wheat populations in breeding for productivity and drought resistance..... 41
- Goldshstein V.G., Suprunov A.I., Bogdan P.M., Sherstobitov V.V., Khoreva V.I., Nosovskaya L.P., Adikaeva L.V., Khatefov E.B.**
Productivity potential of maize hybrids developed at the P.P. Lukyanenko National Grain Center for deep grain processing 51
- Lapshin V.I., Yakovenko V.V.**
Selection of strawberry cultivars according to their productivity and berry quality using normalized indices 61
- Novokhatin V.V., Zuev E.V., Shelomentseva T.V., Leonova T.A.**
Indicators of environmental variability in spring bread wheat cultivars under the conditions of Tyumen Province..... 70

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

- Bemova V.D., Asfandiyarova M.Sh., Yakusheva T.V., Gavrilova V.A., Kishlyan N.V.**
Ecogeographic study of peanut accessions from the VIR collection..... 79
- Vlasova E.V., Gorbunova Yu.V., Seferova I.V.**
Phenological assessment of early-maturing soybean accessions (*Glycine max* (L.) Merr.) under the conditions of Moscow Province 90
- Novikova L.Yu., Berzegova A.A., Gurkina M.V., Buravtseva T.V.**
Productivity and growing-season stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under contrasting ecogeographic conditions 105

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

- Contreras-Rojas M., Guzmán D.G.G., Salazar Mercado S.A.**
Genetic control of yield components in green beans (*Phaseolus vulgaris* L.) 116

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

- Korotkikh I.N., Nevkrytaya N.V., Platonova T.V.**
Comparative ecological testing of *Achillea millefolium* (L.) cultivars in Moscow Province 125
- Suprun I.I., Egorov E.A., Nasonov A.I., Lobodina E.V., Tokmakov S.V., Stepanov I.V.**
Marker-assisted selection in the development of advanced apple-tree forms and donors combining scab resistance with increased fruit storability 135

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

- Mavlyutov Yu.M., Vertikova E.A., Shamustakimova A.O., Klimenko I.A.**
Genetic structure of the collection of ryegrass (*Lolium*) cultivars: a study based on SSR and SCoT markers 146

SYSTEMATICS, PHYLOGENY AND GEOGRAPHY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Luneva N.N., Zakota T.Yu.

The structure of the segetal flora of field crops in the steppe zone of Krasnodar Territory161

Fomina T.I.

In situ and *ex situ* variability of phenological and morphological features in *Caltha palustris* L.

under the conditions of the West Siberian forest steppe.169

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Abdullaev R.A., Lukina K.A., Batasheva B.A., Kovaleva O.N., Radchenko E.E.

Genetic diversity of barley accessions from East Asian countries in terms of resistance to powdery mildew.....178

Druzhin A.E., Sibikeev S.N., Gulyaeva E.I., Andreeva L.B.

Triticum durum Desf. is a valuable source for spring bread wheat genetic diversity enhancement.....187

Zeleneva Yu.V., Sudnikova V.P., Kovalenko N.M., Gusev I.V.

Resistance of spring bread wheat cultivars and lines to *Septoria* leaf blotch, tan spot, and spot blotch pathogens196

Mironenko N.V., Orina A.S., Lashina N.M., Afanasenko O.S.

Expression of the transcription factor encoding gene *StTCP23* in potato plants

infected with the tuber spindle viroid207

BRIEF REPORTS

Emelyanova O.Yu., Tsoy M.F.

Ecological and biological features and prospects of the introduction of *Cornus mas* in Central Russia214

SURVEYS

Chebatareva M.V.

Genetic diversity of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in the allelic composition of HMW-GS (a review).....221

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

Ukhatova Yu.V., Shlavas A.V.

Vsevolod L. Vitkovsky (1928–2005): dedication to his 95th birthday233

Selective list of VIR's methodological recommendations (guidelines) for 2000–2022240

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 635.21:57.043
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-9-20



Расширение криоколлекции образцов картофеля, сохраняемой в криобанке ВИР

О. С. Ефремова, Н. Н. Волкова, Д. А. Рыбаков, О. В. Лисицына, П. В. Озерский, Т. А. Гавриленко

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

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Андреевна Гавриленко, tatjana9972@yandex.ru

Актуальность. В настоящей статье приведены результаты реализации комплексной программы, направленной на долгосрочное сохранение в криобанке Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) генотипированных образцов отечественных сортов картофеля, генетически идентичных номенклатурным стандартам.

Материалы и методы. В качестве материала для исследования выбраны экспланты 24 образцов сортов картофеля, выведенных в различных селекционных центрах РФ, сохраняющиеся в коллекции *in vitro* ВИР. Эти сорта имеют молекулярно-генетические паспорта и соответствуют номенклатурным стандартам сортов, хранящихся в гербарии ВИР (WIR). Криоконсервацию проводили с использованием метода дроблет-витрификации, несколько этапов которого были модифицированы в отделе биотехнологии ВИР.

Результаты и обсуждение. Частота посткриогенной регенерации у проанализированных 24 сортов в контрольных вариантах с краткосрочным погружением эксплантов в жидкий азот варьировала от 20,0 до 47,3% и у 9 образцов превышала 39% – современный уровень надежного долгосрочного сохранения образцов в криобанках. Данные статистического анализа не выявили достоверного влияния генотипа, а также календарных сроков проведения опытов на частоту регенерационной способности образцов. В результате проведенных экспериментов криоколлекция картофеля, сохраняемая в криобанке ВИР, была пополнена 24 образцами российских сортов. В статье анализируется состав и структура криоколлекции картофеля ВИР, которая в настоящее время включает 140 образцов.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum*, криоконсервация, криосохранение, селекционные сорта, генетические ресурсы картофеля

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания ЕГИСУ НИОКР: № FGEM-2022-0004 «Совершенствование подходов и методов *ex situ* сохранения идентифицированного генофонда вегетативно размножаемых культур и их диких родичей, разработка технологий их эффективного использования в селекции». Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Ефремова О.С., Волкова Н.Н., Рыбаков Д.А., Лисицына О.В., Озерский П.В., Гавриленко Т.А. Расширение криоколлекции образцов картофеля, сохраняемой в криобанке ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):9-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-9-20

MOBILIZATION AND CONSERVATION OF THE GENETIC DIVERSITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-9-20

Development of the potato cryocollection preserved in the VIR cryobank

Olga S. Efremova, Natalia N. Volkova, Daniil A. Rybakov, Olga V. Lisitsyna, Pavel V. Ozerski, Tatjana A. Gavrilenko

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

Corresponding author: Tatjana A. Gavrilenko, tatjana9972@yandex.ru

Background. The article presents the results of the studies carried out within the framework of a complex program for the long-term conservation of genotyped accessions of advanced potato cultivars in the cryobank of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR). These accessions are genetically identical to the nomenclature standards of the corresponding cultivars.

Materials and methods. The research material included 24 accessions from the *in vitro* collection of VIR, corresponding to the nomenclature standards of Russian potato cultivars developed in different breeding centers of the Russian Federation. Cryopreservation was carried out using the droplet vitrification method, several stages of which were modified in the Department of Biotechnology of VIR.

Results and discussion. The frequency of post-cryogenic regeneration for the analyzed 24 cultivars in control variants with short-term immersion of explants in liquid nitrogen varied from 20 to 47.3%, and in 9 accessions it exceeded 39% – the current level of reliable long-term preservation of samples in cryobanks. The data of the statistical analysis failed to reveal a significant effect of the genotype or the calendar dates of different experiment replications on the regeneration ability. These 24 accessions were added to the potato cryocollection stored in the VIR cryobank. An analysis of the composition and structure of VIR's potato cryocollection, which currently includes 140 accessions, is presented.

Keywords: *Solanum tuberosum*, cryoconservation, cryopreservation, released cultivars, potato genetic resources

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0004 "Improving the approaches and methods for *ex situ* conservation of the identified genetic diversity of vegetatively propagated crops and their wild relatives, and development of technologies for their effective utilization in plant breeding".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Efremova O.S., Volkova N.N., Rybakov D.A., Lisitsyna O.V., Ozerski P.V., Gavrilenko T.A. Development of the potato cryocollection preserved in the VIR cryobank. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):9-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-9-20

Список сокращений

CIP – International Potato Center, Peru (Международный центр картофеля, Перу);

IPGRI – International Plant Genetic Resources Institute (Международный институт генетических ресурсов растений);

IPK – Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Germany (Институт генетики растений и исследований сельскохозяйственных культур имени Лейбница, Германия);

NAC – National Agrobiodiversity Center, Republic of Korea (Национальный центр агробиоразнообразия, Республика Корея);

NARO – National Agriculture and Food Research Organization, Japan (Национальная организация сельскохозяйственных и продовольственных исследований, Япония);

USPG – U.S. Potato Genebank, USA (Генный банк картофеля США);

VÚB Havlíčkův Brod – Potato Research Institute Havlíčkův Brod, Czech Republic (Научно-исследовательский институт картофеля в Гавличкув-Броде, Чехия);

ВИР – Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Россия;

ГРП – генетические ресурсы растений.

Методы криоконсервации, питательные среды, растворы и варианты использования этих методов:

Dr – Droplet;

DV – Droplet-Vitrification;

EV – Encapsulation-Vitrification;

‘-LN’ – контрольный вариант – без погружения в жидкий азот;

‘+LN’ – контрольный вариант – краткосрочное погружение в жидкий азот на 1 час;

LS – Loading Solution (Panis et al., 2005);

MS – Питательная среда Мурасиге – Скуга (Murashige, Skoog, 1962);

MSTo – Питательная среда для посткриогенной регенерации (Towill, 1983);

PVS2 – Plant Vitrification Solution (Sakai et al., 1990);

RS – Rewarming Solution (Sakai, 1997).

Введение

Генетические ресурсы растений вегетативно размножаемых культур сохраняются *ex situ* в полевых коллекциях и в контролируемых условиях в дублетных коллекциях *in vitro* и криоколлекциях, а также *in situ*. Криоконсервация является наиболее эффективным подходом к долгосрочному хранению коллекций генетических ресурсов растений вегетативно размножаемых культур и минимизации рисков их потерь (Panis et al., 2020). В то же время в ведущих генбанках мира объем криоколлекций меньше объема коллекций *in vitro* и значительно меньше объема полевых коллекций, поскольку методы криоконсервации требуют наличия дорогостоящих инфраструктуры и оборудования, а также обученного персонала.

Картофель является наиболее важной вегетативно размножаемой культурой умеренного климата, генетические ресурсы которой сохраняются в полевых коллекциях, коллекциях *in vitro* и криоколлекциях. Долгосрочное хранение образцов картофеля обеспечивается на основе криоконсервации апексов растений *in vitro*, которые хранятся в криобанках при сверхнизкой температуре в жидком азоте (–196°C) или в парах жидкого азота (–140°C) (Engelmann, Takagi, 2000; Forsline et al., 1999; Dussert et al., 2003; Panis et al., 2016; <https://cipotato.org>; <https://www.genesys-pgr.org>). Крупнейшие криоколлекции картофеля сохраняются в генбанках: CIP, Перу (Vollmer et al., 2017, 2022; Muthoni et al., 2019); IPK, Германия (Stock et al., 2019; Muthoni et al., 2019); USPG, США (Bamberg et al., 2016; Muthoni et al., 2019); NAC – Ю. Корея (Niino, Arizaga, 2015); NARO, Япония (Nagel et al., 2022) (табл. 1).

Для криоконсервации образцов картофеля используют разные методы (см. табл. 1), но наиболее часто приме-

Таблица 1. Наиболее крупные криоколлекции картофеля, сохраняемые в генбанках разных стран, и используемые методы криоконсервации

Table 1. The largest potato cryocollections and methods of cryoconservation used in genebanks of different countries

Генбанк, страна / Genebank, country	Большая часть хранящихся в криобанке образцов представлена: / Most of the accessions stored in the cryobank are represented by:	Число образцов <i>in cryo</i> / Number of <i>in cryo</i> accessions	Метод / Method	Ссылка / Reference
CIP, Перу	андийскими аборигенными сортами, чилийскими сортами и гибридами	4100	DV	Vollmer et al., 2017, 2022; Muthoni, 2019; https://cipotato.org
IPK, Германия	селекционными сортами	1456	Dr	https://www.genesys-pgr.org ; Stock et al., 2019; Muthoni et al., 2019
NARO, Япония	сортами и гибридами	640	EV	Nagel et al., 2022
USPG, США	селекционными сортами	247	DV	Bamberg et al., 2016; Muthoni et al., 2019
NAC, Ю. Корея	селекционными сортами	130	DV	Niino, Arizaga, 2015; Muthoni et al., 2019
VÚB Havlíčkův Brod, Чехия	сортами и гибридами	100	no data	https://www.genesys-pgr.org

няют метод капель-витрификации (DV), разработанный ведущим специалистом по криобиологии растений Б. Панисом (Panis et al., 2005). Этот метод основан на двухступенчатой инкубации апексов растений *in vitro* в растворах LS и PVS2, содержащих смесь осмо- и криопротекторов, и последующем быстром погружении эксплантов в капли раствора PVS2, нанесенных на полоски фольги, в жидкий азот. В настоящее время в разных криобанках для криоконсервации образцов картофеля используют различные модификации DV-метода (Hirai, 2011; Niino, Arizaga, 2015; Köpnick et al., 2018; Ukhatova, Gavrilenko, 2018; Muthoni et al., 2019).

В состав криоколлекций картофеля входят образцы селекционных сортов, аборигенных южноамериканских сортов, а также гибридов. В наиболее крупном криобанке картофеля СІР (Перу) хранится 4100 образцов (см. табл. 1), что составляет 84% от общего числа образцов, поддерживаемых в этом генбанке (Vollmer et al., 2022; Nagel et al., 2022). Из более чем 4000 образцов картофеля, сохраняемых в криобанке СІР, 88,9% образцов представлены южноамериканскими аборигенными сортами, 3% – чилийскими аборигенными сортами, и 8,1% – селекционными сортами и гибридами (Vollmer et al., 2022; <https://cipotato.org>). Во втором по величине криобанке картофеля ІРК сохраняется около 1500 образцов (Muthoni et al., 2019; Stock et al., 2019; <https://www.genesys-pgr.org>), большая часть которых представлена старыми европейскими сортами (см. табл. 1).

В настоящее время суммарно в условиях *in cryo* в различных генбанках мира хранится лишь около 4% от общего числа образцов, сохраняемых в полевых коллекциях картофеля и *in vitro* (Köpnick et al., 2018). По данным перуанских коллег, стоимость криоконсервации одного образца составляет ~400 долларов США в год, тогда как стоимость его дальнейшего хранения в криобанке составляет ~7 долларов США в год. При этом чем больше криоколлекция, тем дешевле стоимость ее хранения, рассчитанная на один образец (Vollmer et al., 2022).

В начале 2000-х годов IPGRI рекомендовал считать надежным уровень посткриогенной регенерации эксплантов не менее 20%, который рассчитывается по данным трех повторностей по 30 эксплантов в каждой. Суммарно в криобанк на длительное хранение закладываются 90 эксплантов на образец, размещенных в 9 криопробирках, что дает возможность проводить мониторинг жизнеспособности эксплантов в процессе длительного хранения (Engelmann, Takagi, 2000). Частота посткриогенной регенерации определяется в контрольных экспериментах с кратковременным погружением эксплантов в жидкий азот ('+LN'), проводимых в трехкратной повторности. Позднее S. Dussert et al. (2003) показали, что вероятность получения как минимум одного регенеранта из каждой криопробирки составит 0,95 при уровне посткриогенной регенерации образца не менее 39%.

В настоящее время в ведущих криобанках мира именно этот уровень посткриогенной регенерации считают достаточным для надежного долгосрочного хранения образцов. При более низких значениях этого показателя число закладываемых на хранение эксплантов должно быть увеличено (Vollmer et al., 2016, 2017).

В ВИР работы по криоконсервации апексов растений картофеля *in vitro* были инициированы в 2012 г. (Shvachko, 2012) с использованием Dr-метода, а с 2014 г. начались исследования по модификации и оптимизации DV-метода (Dunaeva et al., 2017; Ukhatova, 2017; Ukhatova,

Gavrilenko, 2018; Gavrilenko et al., 2019). С 2016 г. проводится плановая закладка образцов на длительное хранение в криобанк ВИР. Принятыми на длительное хранение считаются образцы, содержащие не менее 90 эксплантов (три повторности, в каждой по 30 апексов растений *in vitro*). Подробный регламент закладки эксплантов на длительное хранение в криобанк ВИР приведен в статье О. С. Ефремовой с коллегами (Efremova et al., 2020).

Поначалу основное внимание при создании криоколлекции картофеля в ВИР уделялось наиболее ценным образцам коллекции *in vitro* ВИР – генотипированным и фенотипированным по многим признакам образцам культурных видов (Gavrilenko et al., 2010, 2013). В последнее время криоколлекция картофеля активно пополняется генотипированными образцами отечественных сортов, генетически идентичными номенклатурным стандартам (Efremova et al., 2020). Данная стратегия была разработана в ВИР (Gavrilenko, Chukhina, 2020) и реализуется в сотрудничестве с авторами сортов – селекционерами из различных регионов РФ (Fomina et al., 2020; Klimenko et al., 2020; Rybakov et al., 2022).

Задачи настоящей работы состояли в продолжении этих исследований – криоконсервации новых образцов российских сортов, генетически идентичных номенклатурным стандартам, и изучении их посткриогенной регенерации, а также в проведении инвентаризации криоколлекции картофеля, заложенной на длительное хранение в криобанк ВИР.

Материалы и методы

Материал для исследований включал образцы 24 сортов картофеля, которые были выведены в следующих селекционных центрах: ЛенНИИСХ «Белогорка» и ООО Селекционной фирме «ЛиГа», Татарском НИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН и в Омском АНЦ. Согласно комплексной стратегии регистрации и сохранения идентифицированного сортового генофонда, разработанной в ВИР (Gavrilenko, Chukhina, 2020), эти образцы были введены в культуру *in vitro* из растительного материала, переданного авторами сортов в гербарий ВИР для создания номенклатурных стандартов и разработки их генетических паспортов (Klimenko et al., 2020; Fomina et al., 2020; Rybakov et al., 2022).

Методы. Криоконсервацию проводили в 2021–2022 гг. с использованием метода DV (Panis et al., 2005), некоторые этапы которого были модифицированы в отделе биотехнологии ВИР (Dunaeva et al., 2017; Gavrilenko et al., 2019) так же, как и регламент закладки эксплантов на длительное хранение в криобанк ВИР (Efremova et al., 2020). На рисунке 1 приведена общая схема криоконсервации образцов апексов картофеля в ВИР, включающая их оценку по регенерационной способности перед закладкой на криохранение в двух вариантах контрольных экспериментов: (а) без погружения эксплантов в жидкий азот ('-LN') – для проверки качества приготовленных растворов и сред; (б) с погружением эксплантов на один час в жидкий азот ('+LN') – для суммарной оценки влияния обработки растворами криопротекторов и процедур замораживания/оттаивания на посткриогенную регенерацию.

Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью компьютерной программы PAST (версия 4.11) (Hammer et al., 2001). Средние значения и значения ошибок для показателей регенерационной

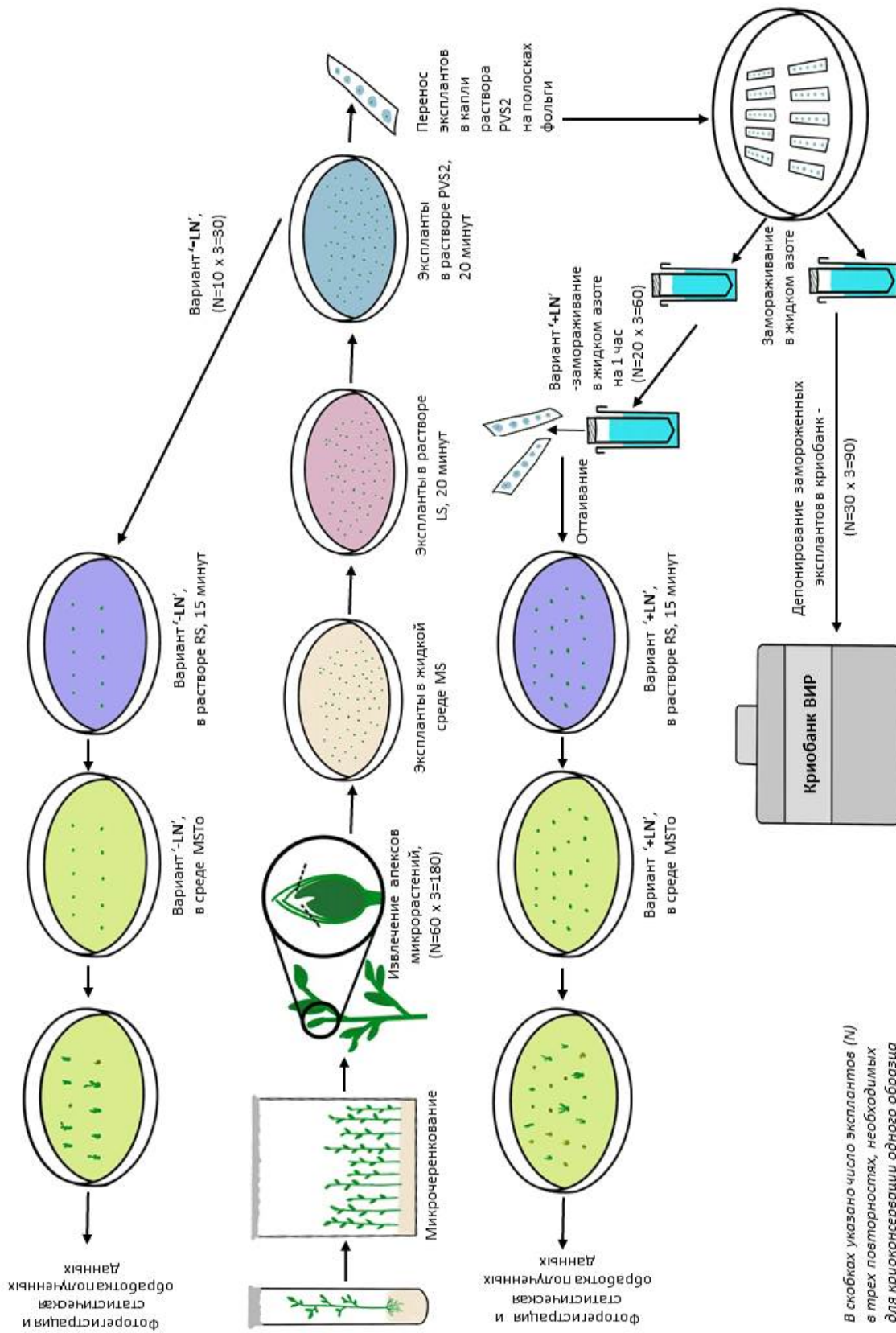


Рис. 1. Схема криоконсервации апексов микрорастений картофеля при помощи модифицированного метода дроблет-витрификации (Dunaeva et al., 2017; Gavrilenko et al., 2019); приведено число эксплантов (N) для криоконсервации одного коллекционного образца (Dunaeva et al., 2017; Gavrilenko et al., 2019); the number of explants (N) is indicated for cryoconservation of one accession

способности образцов рассчитывались в программе LibreOffice CALC (версия 7.2.3).

Различия между двумя вариантами экспериментов ('-LN' и '+LN') оценивали с использованием U-критерия Манна – Уитни (Kobzar, 2006). Достоверность различий по показателям регенерационной способности эксплантов разных сортов (влияние генотипа) оценивали с использованием критерия Краскела – Уоллиса (Kobzar, 2006). Поскольку у ряда образцов первые повторности опытов по криоконсервации были выполнены в зимний период, а последняя повторность – в весенний период, мы провели оценку влияния на уровень регенерации сортов разных сроков проведения опытов с использованием критерия Краскела – Уоллиса. Для этого результаты оценки регенерационной способности сортов были сгруппированы по календарным срокам проведения разных повторностей с интервалом в 10 дней.

Результаты и обсуждение

1. Изучение способности к посткриогенному восстановлению 24 образцов сортов картофеля

В таблице 2 и на рисунке 2 представлены результаты экспериментов по криоконсервации апексов микро-растений 24 образцов сортов картофеля. Как и ожидалось, различия по регенерационной способности образцов между вариантами '-LN' (без погружения эксплантов в жидкий азот) и '+LN' (с краткосрочным погружением в жидкий азот на 1 час) были статистически значимыми, что подтверждено с использованием U-критерия Манна – Уитни ($z = 4,60$; $p < 0,001$).

В контрольных экспериментах с краткосрочным погружением в жидкий азот на 1 час ('+LN') у всех сортов зафиксирована способность к посткриогенному восстановлению. Показатели регенерационной способности образцов в этом варианте опытов варьировали от 20,0 до 47,3% (см. табл. 2). Таким образом, у всех 24 образцов сортов частота посткриогенной регенерации превышала 20%, при этом у девяти образцов уровень регенерационной способности был выше 39% ('Сударыня', 'Чароит', 'Триумф', 'Сказка', 'Сальса', 'Вдохновение', 'Весна Белая', 'Майский Цветок', 'Вечерний Омск') (см. табл. 2).

У ряда образцов сортов было выявлено варьирование значений регенерационной способности между повторностями опыта (см. табл. 2), поэтому мы оценили влияние календарных сроков проведения разных повторностей опытов на уровень этого показателя для всех 24 образцов выборки. Результаты статистического анализа, проведенного с помощью критерия Краскела – Уоллиса, не выявили достоверного влияния календарных сроков проведения опытов на регенерационную способность эксплантов как в варианте '-LN' ($H = 18,38$; $H_{\text{коррект}} = 18,46$; $p = 0,49$), так и в варианте '+LN' ($H = 17,23$; $H_{\text{коррект}} = 17,46$; $p = 0,62$).

Следующая задача состояла в изучении влияния генотипа на показатели регенерационной способности образцов. Согласно результатам статистического анализа, выполненного с помощью критерия Краскела – Уоллиса, в анализируемой выборке 24 сортов не обнаружено достоверного влияния генотипа на показатели регенерационной способности в варианте '-LN' ($H = 24,04$; $H_{\text{коррект}} = 24,15$; $p = 0,40$) и в варианте '+LN' ($H = 27,00$; $H_{\text{коррект}} = 27,37$; $p = 0,24$), что согласуется с нашими предыдущими исследованиями (Efremova et al., 2020).

Таблица 2. Регенерационная способность апексов микро-растений сортов картофеля после замораживания/оттаивания

Table 2. Regeneration ability of *in vitro* shoot tips of potato cultivars after freezing/thawing

Сорт / Cultivar	№ интродукции / Introduction No.	№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Регенерационная способность* / Regeneration ability (%)	
			'-LN'	'+LN'
Сорта селекции Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха» и ООО Селекционной фирмы «ЛиГа»:				
Вдохновение	o161645	12192p	49,7 ± 18,8	40,0 ± 2,6
Весна Белая	o161646	11895p	43,3 ± 3,7	40,0 ± 2,9
Жемчужина	o161650	-	36,0 ± 12,5	32,3 ± 8,7
Калибр	633317	25519p	46,3 ± 1,9	30,7 ± 2,3
Майский Цветок	o161653	-	48,3 ± 10,9	40,3 ± 2,6
Наяда	o161654	12157p	59,0 ± 16,7	24,7 ± 5,2
Невский	o161655	10736p	44,7 ± 11,3	35,0 ± 2,9

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

Сорт / Cultivar	№ интродукции / Introduction No.	№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Регенерационная способность* / Regeneration ability (%)	
			'-LN'	'+LN'
Сорта селекции Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха» и ООО Селекционной фирмы «ЛиГа»:				
Очарование	o161656	12214p	58,0 ± 4,9	33,3 ± 6,7
Памяти Осиповой	o161657	12105p	45,0 ± 2,9	38,3 ± 1,7
Русская Красавица	o161659	25142p	30,3 ± 5,5	35,0 ± 0
Сказка	o161662	11987p	67,7 ± 16,2	46,7 ± 8,3
Снегирь	o161663	11984p	41,7 ± 15,9	39,3 ± 5,8
Сударыня	o161664	12206p	28,0 ± 6,4	41,3 ± 10,4
Холмогорский	o161665	12111p	51,7 ± 20,5	34,7 ± 10,5
Чародей	o161666	11908p	66,0 ± 17,3	32,3 ± 4,3
Чароит	o161667	25221p	57,3 ± 11,6	46,7 ± 1,7
Сорта селекции Татарского НИИСХ ФИЦ КазНИЦ РАН:				
Зумба	633211	25511p	51,7 ± 13,0	25,0 ± 5,8
Регги	633213	25313p	48,7 ± 11,0	37,3 ± 3,9
Сальса	633215	25512p	50,0 ± 16,2	47,3 ± 11,1
Сорта селекции Омского АНЦ:				
Алена	638065	12145p	63,3 ± 8,8	33,3 ± 3,3
Былина Сибири	638066	-	50,7 ± 4,7	20,0 ± 0
Вечерний Омск	638067	-	61,0 ± 11,0	40,0 ± 7,6
Триумф	638068	-	34,3 ± 4,7	41,7 ± 4,4
Хозяюшка	638069	24755p	70,0 ± 17,3	35,0 ± 2,9

Примечание: * Mean ± Se – среднее с доверительным интервалом (± стандартная ошибка) варианта опыта

Note: * Mean ± Se is the mean with a confidence interval (± standard error) of the experiment replication

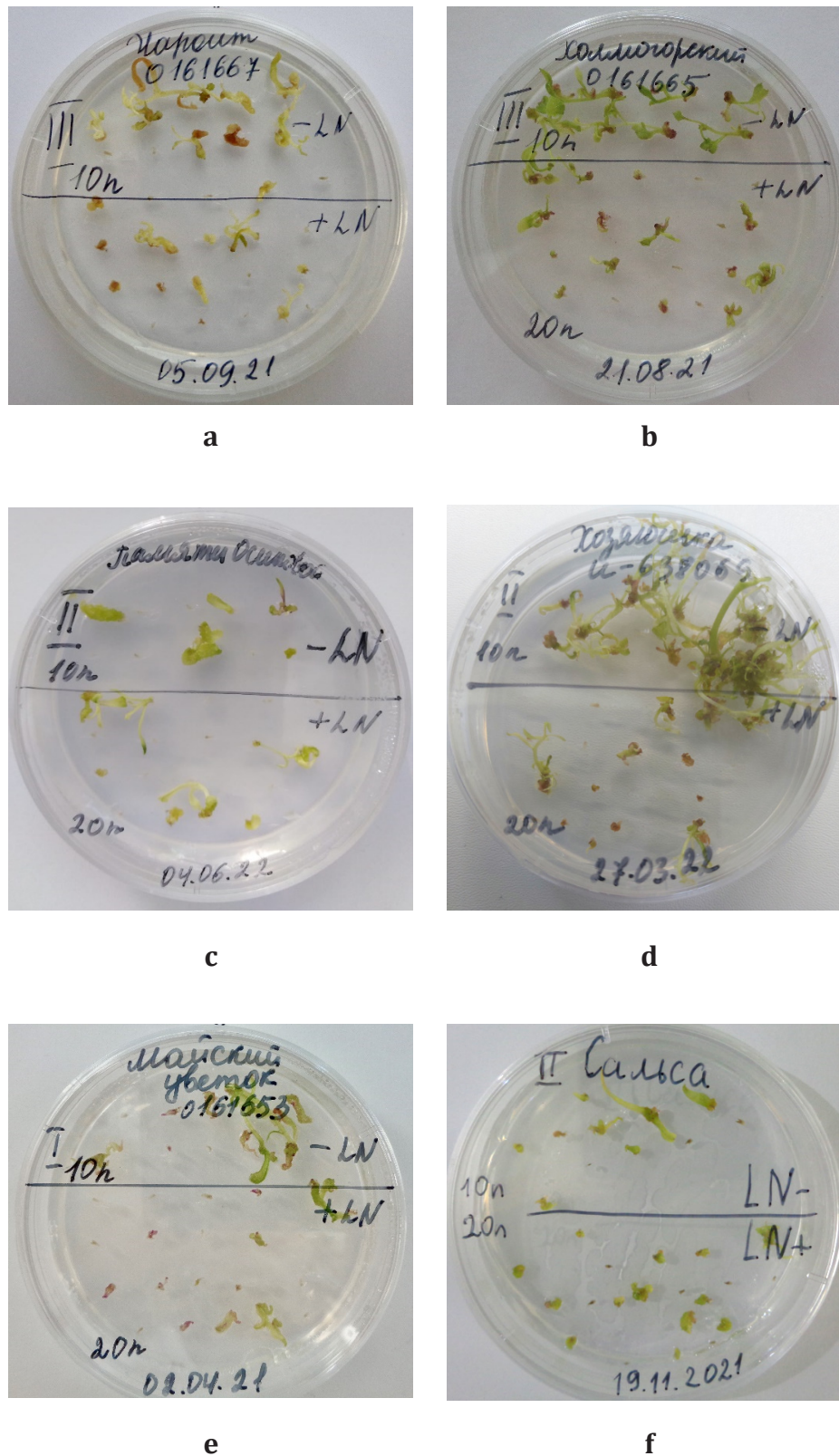


Рис. 2. Посткриогенная регенерация эксплантов после замораживания/оттаивания в контрольных экспериментах у шести сортов:

a – ‘Чароит’ (i-o161667); **b** – ‘Холмогорский’ (i-o161665); **c** – ‘Памяти Осиповой’ (i-o161657); **d** – ‘Хозяюшка’ (i-638069); **e** – ‘Майский Цветок’ (i-o161653); **f** – ‘Сальса’ (i-633215)

Fig. 2. Post-cryogenic regeneration of isolated explants after freezing/thawing in control experiments for six potato cultivars:

a – ‘Charoit’ (i-o161667); **b** – ‘Kholmogorsky’ (i-o161665); **c** – ‘Pamyati Osipovoy’ (i-o161657); **d** – ‘Khozyayushka’ (i-638069); **e** – ‘Maysky Tsvetok’ (i-o161653); **f** – ‘Salsa’ (i-633215)

В ряде других работ авторы выявили существенное влияние генотипа на посткриогенную регенерацию после оттаивания (Kaczmarczyk et al., 2010; Panta et al., 2006; Ukhatoва, 2017; Gavrilenko et al., 2019).

Не исключено, что различия между образцами, наблюдаемые в ряде работ, а также между разными повторностями опытов, могут быть связаны с различиями в размерах вычлененных апексов, что было показано в недавней работе R. Vollmer et al. (2022). В дальнейшем мы также планируем учитывать данный показатель в наших исследованиях.

2. Инвентаризации криоколлекции картофеля ВИР

Следующая задача состояла в инвентаризации криоколлекции картофеля, сохраняемой в криобанке ВИР. При проведении инвентаризации учитывались образцы, для которых были выполнены все три повторности контрольных экспериментов ('+LN') с соблюдением регламента закладки в криобанк – 90 эксплантов на образец. Инвентаризация показала, что на настоящий момент эта криоколлекция картофеля включает 140 образцов,

из них: 68 селекционных сортов (56 отечественных и 12 зарубежных), 65 образцов шести южноамериканских культурных видов, а также единичные гибридные клоны и клоны образцов нескольких диких видов. Состав и структура криоколлекции картофеля ВИР представлены на диаграмме (рис. 3) и в Приложении (Supplementary Materials, Table)¹.

Из 56 отечественных сортов, сохраняемых в Криобанке ВИР, 46 сортов генетически идентичны номенклатурным стандартам, из них: 3 сорта селекции Татарского НИИСХ, 19 сортов селекции ЛенНИИСХ «Белогорка» и ООО Селекционной фирмы «ЛиГа», 14 сортов – ФГБНУ «ФИЦ картофеля им. А.Г. Лорха» и 10 сортов, выведенных в различных сибирских институтах (см. Приложение). В коллекции *in vitro* ВИР поддерживается еще 25 образцов российских сортов картофеля, генетически идентичных номенклатурным стандартам; в дальнейшем мы планируем заложить все эти образцы на долгосрочное хранение в криобанк ВИР.

Большая часть образцов (74,2%) в криоколлекции обладает уровнем регенерации выше 39%, что соответствует современным стандартам криобанков (рис. 4; см.

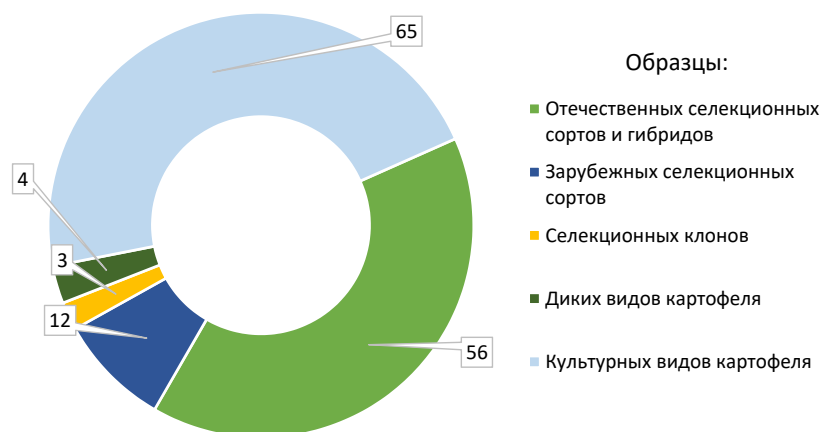


Рис. 3. Структура и состав криоколлекции ВИР (N = 140)

Fig. 3. Structure and composition of the VIR cryocollection (N = 140)

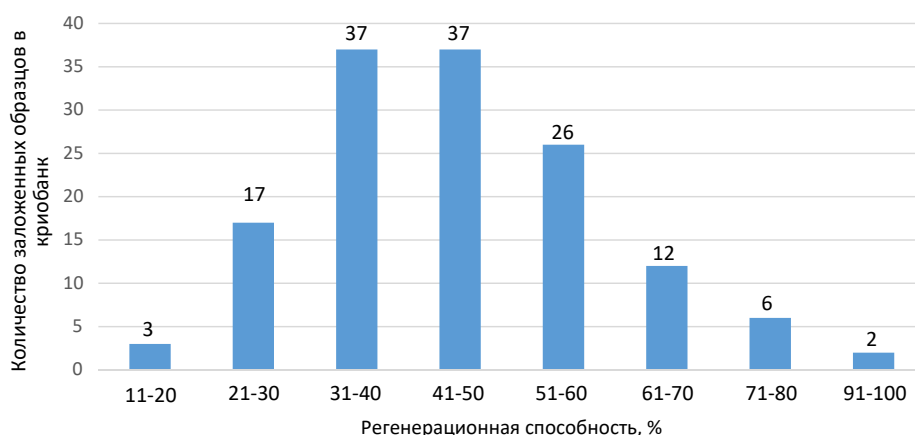


Рис. 4. Уровень посткриогенной регенерации образцов картофеля, сохраняемых в криоколлекции ВИР (N = 140); приведены средние значения в контрольных вариантах опытов '+LN'

Fig. 4. Post-cryogenic regeneration rate of potato accessions preserved in the VIR cryobank (N = 140); mean values for the control experiments '+LN' are given

¹ Приложение, таблица, представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-3-9-20>
Electronic supplementary material. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-3-9-20>.

Приложение). В группу с повышенным уровнем регенерации преимущественно входили образцы южноамериканских культурных видов картофеля (см. Приложение).

Для единичных образцов, заложенных в криобанк с уровнем посткриогенной регенерации ниже 20%, планируются дополнительные эксперименты по криоконсервации для закладки в криобанк большего числа эксплантов.

Заключение

Проведена криоконсервация 24 генотипированных образцов российских сортов из коллекции *in vitro* ВИР. Показатели посткриогенной регенерации этих образцов варьировали от 20,0 до 47,3%, и у девяти образцов уровень регенерационной способности был выше 39%. Результаты статистического анализа изученной выборки из 24 сортов не выявили достоверного влияния генотипа и календарных сроков проведения экспериментов на регенерационную способность эксплантов.

В результате проведенных экспериментов криоколлекция картофеля, сохраняемая в криобанке ВИР, пополнилась 24 генотипированными образцами российских сортов. Проведена инвентаризация криоколлекции картофеля ВИР, которая в настоящее время включает 140 образцов, заложенных на хранение в трех повторностях по 30 апексов микрорастений в каждой. В настоящее время в состав криоколлекции входят 46 образцов российских сортов, генетически идентичных номенклатурным стандартам.

References / Литература

Bamberg J.B., Martin M.W., Abad J., Jenderek M.M., Tanner J.D., Donnelly D. et al. *In vitro* technology at the US Potato Genebank. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2016;52(3):213-225. DOI: 10.1007/s11627-016-9753-x

CIP Genebank: [website]. Available from: <https://cipotato.org> [accessed Sept. 20, 2022].

Dunaeva S.E., Pendinen G.I., Antonova O.Yu., Shvachko N.A., Ukhatova Yu.V., Shuvalova L.E., Volkova N.N., Gavrilenko T.A. Preservation of vegetatively propagated crops *in vitro* and cryo collections: methodological guidelines (Sokhraneniye vegetativno razmnozhayemykh kultur v in-vitro- i kriokollektsiyakh: metodicheskiye ukazaniya). T.A. Gavrilenko (ed.). 2nd ed. St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Дунаева С.Е., Пендинен Г.И., Антонова О.Ю., Швачко Н.А., Ухатова Ю.В., Шувалова Л.Е., Волкова Н.Н., Гавриленко Т.А. Сохранение вегетативно размножаемых культур в *in-vitro*- и криоколлекциях: методические указания / под ред. Т.А. Гавриленко. 2-е изд. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).

Dussert S., Engelmann F., Noirot M. Development of probabilistic tools to assist in the establishment and management of cryopreserved plant germplasm collections. *CryoLetters*. 2003;24(3):149-160.

Efremova O.S., Volkova N.N., Gavrilenko T.A. Long-term preservation of modern Russian potato cultivars in the VIR cryobank. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(3):68-76. [in Russian] (Ефремова О.С., Волкова Н.Н., Гавриленко Т.А. Длительное сохранение современных российских сортов картофеля в криобанке ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(3):68-76). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-3-01

Engelmann F., Takagi H. (eds). Cryopreservation of tropical plant germplasm. Current research progress and applica-

tion. Tsukuba: JIRCAS; Roma: IPGRI; 2000. Available from: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/2021-08/010023387.pdf [accessed Sept. 12, 2022].

Fomina N.A., Antonova O.Yu., Chukhina I.G., Gimaeva E.A., Stashevski Z., Gavrilenko T.A. Nomenclatural standards and genetic passports of potato cultivars bred by the Tatar Research Institute of Agriculture "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences". *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(3):55-67. [in Russian] (Фомина Н.А., Антонова О.Ю., Чухина И.Г., Гимаева Е.А., Сташевски З., Гавриленко Т.А. Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов картофеля селекции Татарского НИИСХ «Казанский научный центр РАН». *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(3):55-67). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-3-04

Forsline P.L., McFerson J.R., Lamboy W.F., Towill L.E. Development of base and active collections of *Malus* germplasm with cryopreserved dormant buds. *Acta Horticulturae*. 1999;484:75-78. DOI: 10.17660/ActaHortic.1998.484.8

Gavrilenko T., Antonova O., Ovchinnikova A., Novikova L., Krylova E., Mironenko N. et al. A microsatellite and morphological assessment of the Russian National Potato Collection. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2010;57(8):1151-1164. DOI: 10.1007/s10722-010-9554-8

Gavrilenko T., Antonova O., Shuvalova A., Krylova E., Alpatyeva N., Spooner D.M. et al. Genetic diversity and origin of cultivated potatoes based on plastid microsatellite polymorphism. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2013;60(7):1997-2015. DOI: 10.1007/s10722-013-9968-1

Gavrilenko T.A., Chukhina I.G. Nomenclatural standards of modern Russian potato cultivars preserved at the VIR herbarium (WIR): A new approach to cultivar gene-pool registration in a genebank. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(3):6-17. [in Russian] (Гавриленко Т.А., Чухина И.Г. Номенклатурные стандарты современных российских сортов картофеля, хранящиеся в гербарии ВИР (WIR): новые подходы к регистрации сортового генофонда в генбанках. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(3):6-17). DOI: 10.30901/2658-6266-2020-3-02

Gavrilenko T.A., Shvachko N.A., Volkova N.N., Ukhatova Yu.V. A modified droplet vitrification method for cryopreservation of shoot tips from *in vitro* potato plants. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(4):422-429. [in Russian] (Гавриленко Т.А., Швачко Н.А., Волкова Н.Н., Ухатова Ю.В. Модифицированный метод дроблет-витрификации для криоконсервации апексов *in vitro* растений картофеля. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(4):422-429). DOI: 10.18699/VJ19.505

Genesys PGR: [website]. Available from: <https://www.genesys-pgr.org> [accessed Sept. 20, 2022].

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: paleontological statistics software. Package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):4. Available from: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf [accessed Sept. 06, 2022].

Hirai D. Gelled droplet vitrification improves recovery of cryopreserved potato germplasm. *CryoLetters*. 2011;32(4):287-296.

Kaczmarczyk A., Rokka V.M., Keller E.R.J. Potato shoot tip cryopreservation. A review. *Potato Research*. 2010;54(1):45-79. DOI: 10.1007/s11540-010-9169-7

Klimenko N.S., Gavrilenko T.A., Chukhina I.G., Gadzhiev N.M., Evdokimova Z.Z., Lebedeva V.A. Nomenclatural standards and genetic passports of potato cultivars bred at the Leningrad Research Institute for Agriculture "Belogorka".

- Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(3):18-54. [in Russian] [Клименко Н.С., Гавриленко Т.А., Чухина И.Г., Гаджиев Н.М., Евдокимова З.З., Лебедева В.А. Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов картофеля, выведенные селекционерами Ленинградского НИИСХ «Белогорка». *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(3):18-54]. DOI: 10.30901/2658-6266-2020-3-03
- Kobzar A.I. Applied mathematical statistics (Prikladnaya matematicheskaya statistika). Moscow: Fizmatlit; 2006. [in Russian] [Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Москва: Физматлит, 2006].
- Körnig C., Grube M., Stock J., Senula A., Mock H.P., Nagel M. Changes of soluble sugars and ATP content during DMSO droplet freezing and PVS3 droplet vitrification of potato shoot tips. *Cryobiology*. 2018;85:79-86. DOI: 10.1016/j.cryobiol.2018.09.005
- Murashige T., Skoog F.A. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962;15(3):473-497. DOI: 10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x
- Muthoni J., Shimelis H., Melis R. Long-term conservation of potato genetic resources: Methods and status of conservation. *Australian Journal of Crop Science*. 2019;13(5):717-725. DOI: 10.21475/ajcs.19.13.05.p1400
- Nagel M., Dulloo M.E., Bissessur P., Gavrilenko T., Bamberg J., Ellis D., Giovannini P. A global strategy for the conservation of potato. Bonn: Global Crop Diversity Trust; 2022. DOI: 10.5447/ipk/2022/29
- Niino T., Arizaga M.V. Cryopreservation for preservation of potato genetic resources. *Breeding Science*. 2015;65(1):41-52. DOI: 10.1270/jsbbs.65.41
- Panis B., Nagel M., Van den Houwe I. Challenges and prospects for the conservation of crop genetic resources in field genebanks, in *in vitro* collections and/or in liquid nitrogen. *Plants*. 2020;9(12):1634. DOI: 10.3390/plants9121634
- Panis B., Piette V., Swennen R. Droplet vitrification of apical meristems: a cryopreservation protocol applicable to all *Musaceae*. *Plant Science*. 2005;168(1):45-55. DOI: 10.1016/j.plantsci.2004.07.022
- Panis B., Van den Houwe I., Swennen R., Rhee J., Roux N. Securing plant genetic resources for perpetuity through cryopreservation. *Indian Journal of Plant Genetic Resources*. 2016;29(3):300-302. DOI: 10.5958/0976-1926.2016.00051.6
- Panta A., Panis B., Ynoue C., Criel B., Swennen R., Roca W. 78. Improvement of potato cryopreservation for the long-term conservation of Andean landraces at the International Potato Center (CIP). *Cryobiology*. 2006;53(3):401. DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.908.45
- Rybakov D.A., Cheremisina A.I., Antonova O.Yu., Chukhina I.G., Gavrilenko T.A. Nomenclatural standards and genetic passports of potato cultivars bred by the Omsk Agrarian Research Center. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022;5(4):6-23. [in Russian] [Рыбаков Д.А., Черемисина А.И., Антонова О.Ю., Чухина И.Г., Гавриленко Т.А. Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов картофеля селекции Омского Аграрного научного центра. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(4):6-23]. DOI: 10.30901/2658-6266-2022-4-04
- Sakai A. Potentially valuable cryogenic procedures for cryopreservation of cultured plant meristems. In: M.K. Razdan, E.C. Cocking (eds). *Conservation of Plant Genetic Resources in Vitro. Volume 1: General Aspects*. Enfield, NC: Science Publishers Inc.; 1997. p.53-66.
- Sakai A., Kobayashi S., Oiyama I. Cryopreservation of nucellar cells of navel orange (*Citrus sinensis* Osb. var. *brasiliensis* Tanaka) by vitrification. *Plant Cell Reports*. 1990;9(1):30-33. DOI: 10.1007/bf00232130
- Shvachko N.A. Genetic diversity of potato cultivars in the VIR collection identified by the SSR analysis (Geneticheskoye raznoobrazie selektsionnykh sortov kartofelya kollektzii VIR, vyuyavlennoye SSR analizom) [dissertation]. St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] [Швачко Н.А. Генетическое разнообразие селекционных сортов картофеля коллекции ВИР, выявленное SSR анализом: дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург: ВИР; 2012]. URL: http://vir.nw.ru/biot/pdf/autoreferat_shvachko_2012.pdf [дата обращения: 05.09.2022].
- Stock J., Mock H.P., Senula A., Nagel M. *Arabidopsis* – a model to elucidate complex stress response mechanism during cryopreservation. *Acta Horticulturae*. 2019;1234:85-96. DOI: 10.17660/ActaHortic.2019.1234.11
- Towill L.E. Improved survival after cryogenic exposure of shoot tips derived from *in vitro* plantlet cultures of potato. *Cryobiology*. 1983;20(5):567-573. DOI: 10.1016/0011-2240(83)90045-7
- Ukhatova Yu.V. Improving the methods of cryopreservation and recovery from viral diseases of vegetatively propagated crop accessions (Sovershenstvovaniye metodov kriokonservatsii i ozdorovleniya ot virusnykh bolezney obraztsov vegetativno razmnzhayemykh kultur) [dissertation]. St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] [Ухатова Ю.В. Совершенствование методов криоконсервации и оздоровления от вирусных болезней образцов вегетативно размножаемых культур: дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург: ВИР; 2017]. URL: http://vir.nw.ru/desert/yhatova/diss_ukhatova.pdf [дата обращения: 06.09.2022].
- Ukhatova Yu.V., Gavrilenko T.A. Cryoconservation methods for vegetatively propagated crops. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2018;1(1):52-63. [in Russian] [Ухатова Ю.В., Гавриленко Т.А. Методы криоконсервации вегетативно размножаемых культурных растений. *Биотехнология и селекция растений*. 2018;1(1):52-63]. DOI: 10.30901/2658-6266-2018-1-52-63
- VIR Databases: [website]. [in Russian] [Базы данных ВИР: [сайт]]. URL: <http://db.vir.nw.ru/virdb/maindb> [дата обращения: 20.09.2022].
- Vollmer R., Villagaray R., Cárdenas J., Castro M., Chávez O., Anglin N.L. et al. A large-scale viability assessment of the potato cryobank at the International Potato Center (CIP). *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2017;53(4):309-317. DOI: 10.1007/s11627-0179846-1
- Vollmer R., Villagaray R., Castro M., Cárdenas J., Pineda S., Espirilla J. et al. The world's largest potato cryobank at the International Potato Center (CIP) – Status quo, protocol improvement through large-scale experiments and long-term viability monitoring. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:1059817. DOI: 10.3389/fpls.2022.1059817
- Vollmer R., Villagaray R., Egusquiza V., Espirilla J., García M., Torres A. et al. The potato cryobank at the International Potato Center (CIP): A model for long-term conservation of clonal plant genetic resources collections of the future. *CryoLetters*. 2016;37(5):318-329.

Информация об авторах

Ольга Сергеевна Ефремова, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, efremo.olga2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9212-2117>

Наталья Николаевна Волкова, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, nata.volckova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8034-9891>

Даниил Александрович Рыбаков, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, da-rybakov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1520-0219>

Ольга Владимировна Лисицына, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, olgalis86@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6632-3465>

Павел Викторович Озерский, 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, ozerski@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7627-5412>

Татьяна Андреевна Гавриленко, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующая отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, tatjana9972@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2605-6569>

Information about the authors

Olga S. Efremova, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, efremo.olga2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9212-2117>

Natalia N. Volkova, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, nata.volckova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8034-9891>

Daniil A. Rybakov, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, da-rybakov@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1520-0219>

Olga V. Lisitsyna, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, olgalis86@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6632-3465>

Pavel V. Ozerski, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, ozerski@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7627-5412>

Tatjana A. Gavrilenko, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, tatjana9972@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2605-6569>

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 30.12.2022; одобрена после рецензирования 25.04.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 30.12.2022; approved after reviewing on 25.04.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

UDC 633.11:631.527

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-21-31



Genetic gain of grain yield and quality in bread wheat cultivars representing 40 years of breeding in Morocco

Sahar Bennani, Mona Taghouti, Fatima Gaboun

*National Institute of Agricultural Research, Rabat, Morocco***Corresponding author:** Sahar Bennani, sahar.bennani@inra.ma

Background. Knowledge about the genetic gain for fundamental traits over time is essential for a critical assessment and improvement of breeding programs, especially regarding staple crops like bread wheat.

Materials and methods. To estimate the genetic gain in bread wheat breeding in Morocco, grain yield (GY) and grain protein content (GPC) data were collected from 12 multi-environment field trials for 20 bread wheat cultivars released between 1980 and 2022.

Results and discussion. Analysis of variance highlighted a high significant variability between environments (E), cultivars (G), and a significant $G \times E$ interaction ($P < 0.001$). Based on stability analysis, the modern cultivars released during the two last decades (2002–2012 and 2013–2022) showed the highest performances and wider stability than old ones, especially in low-yielding environments. Genetic gain (GG) for GY was $21.4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ($0.75\% \text{ yr}^{-1}$) over 4 decades of breeding. This progress was declining when advancing in decades and ranged from 11% (from 1980–1990 to 1991–2001) to less than 7% (from 2002–2012 to 2013–2022). The GG in low and intermediate yielding environments were the most important (17.34% and $6.88\% \text{ yr}^{-1}$ respectively), while GG was nonsignificant in high-yielding environments ($4.62\% \text{ yr}^{-1}$). Within the same period, GPC showed a nonsignificant negative trend of -0.007% ($-0.002\% \text{ yr}^{-1}$), while derivative parameters from GY and GPC indicated high positive genetic progress. More efforts should be deployed to implement a good balance between yield performance and quality in the new released cultivars despite the negative correlation between these two traits ($r = -0.36$; $P < 0.001$).

Conclusion. Adopting advanced technologies, like genomic selection, adequate agronomic practices, and more efficient selection criteria are essential steps to further increase simultaneously grain yield and quality traits.

Keywords: bread wheat, stability analysis, grain yield, grain protein content

Acknowledgements: this work could not have been accomplished without the contribution of the technical staff of all experiment stations at INRA.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Bennani S., Taghouti M., Gaboun F. Genetic gain of grain yield and quality in bread wheat cultivars representing 40 years of breeding in Morocco. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):21-31. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-21-31

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-21-31

Генетическое улучшение показателей урожайности и качества зерна у сортов мягкой пшеницы, созданных в Марокко за 40 лет селекции

С. Беннани, М. Тагути, Ф. Габун

Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Рабат, Марокко

Автор, ответственный за переписку: Сахар Беннани, sahar.bennani@inra.ma

Актуальность. Анализ наследственных изменений важнейших агрономических показателей в определенные периоды необходим для оценки и улучшения селекционных программ основных культур, включая мягкую пшеницу.

Материалы и методы. Для оценки генетического эффекта селекции в Марокко получены и проанализированы данные по урожайности (GY) и содержанию белка в зерне (GPC) у 20 сортов мягкой пшеницы, созданных в период с 1980 по 2022 г., при выращивании в поле в 12 пунктах.

Результаты и обсуждение. Дисперсионный анализ показал высокосignificant влияние на изучаемые показатели факторов среды (E), генотипа (G) и значимое влияние их взаимодействия $G \times E$ ($P < 0,001$). По результатам анализа стабильности созданные за два последних десятилетия (2002–2012 и 2013–2022 гг.) сорта характеризуется наивысшими показателями изучаемых признаков и их большей стабильностью по сравнению с ранее созданными сортами, особенно в неурожайные годы. За 40 лет генетический эффект (GG) для урожайности семян (GY) составил 21,4 кг/га за каждый год (0,75% в год). Этот эффект со временем снижался, варьируя в пределах от 11% (с 1980–1990 по 1991–2001 гг.) до менее чем 7% (с 2002–2012 по 2013–2022 гг.). Генетический эффект в низко- и среднеурожайных условиях был наиболее выражен (17,34% и 6,88% за год соответственно) и оказался незначимым в высокоурожайных условиях (4,62% за год). За тот же период показатель GPC показал статистически незначимое снижение: $-0,007\%$ ($-0,002\%$ за год), в то время как показатели, производные от GY и GPC, указывали на высокий положительный генетический эффект селекции. Следует приложить больше усилий для достижения хорошего баланса между урожайностью и качеством семян новых сортов, учитывая отрицательную корреляцию между этими двумя признаками ($r = -0,36$; $P < 0,001$).

Заключение. Внедрение передовых технологий, таких как геномная селекция, соответствующая агротехника и более эффективные критерии отбора способны в будущем обеспечить одновременное повышение урожайности зерна и его качества.

Ключевые слова: мягкая пшеница, анализ стабильности, генетический эффект, урожайность, содержание белка в зерне

Благодарности: настоящая работа реализована благодаря тому вкладу, который внесли технические сотрудники всех опытных станций ИНРА.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Беннани С., Тагути М., Габун Ф. Генетическое улучшение показателей урожайности и качества зерна у сортов мягкой пшеницы, созданных в Марокко за 40 лет селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):21-31. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-21-31

Introduction

Bread wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the most important staple food crops worldwide, playing a major role in food security. Wheat production is facing many challenges due to increased competition for arable land, depleting natural resources, degrading soil health, biotic and abiotic stresses, and has to be increased at an annual rate of 1.3% per year to feed 9 billion of the world's population by 2050 (Woyann et al., 2019).

The release of high-yielding and climate-resilient cultivars of appropriate quality has been the most efficient approach to meet these challenges. Although wheat breeding has experienced dramatic improvement during the last century thanks to new technological advances, yield growth has been slowing more recently and has reduced from 2.19% per year for the period 1960–1990 to 1.07 from 1990 to 2010, and it is expected to be further reduced to 0.62 for the period 2010–2050 (Rife et al., 2019; Woyann et al., 2019). Grain protein content (GPC) is another staple trait for consumers and industrials determining the end-use properties of wheat, as well as the nutritional value of derived products (Giancaspro et al., 2019). Grain yield and protein content are complex quantitative traits, making selection a major challenge in wheat breeding because of the large “genotype × environment” interaction and the negative relationship between these two primary traits (Iqbal et al., 2016; Giancaspro et al., 2019).

While the adoption of technological advances helps to achieve breeding objectives, it is of fundamental importance to determine and track the amount of genetic progress that has been made in a breeding program so that new processes and breeding techniques can be adopted to cover future demands (Woyann et al., 2019). Genetic gain can be defined as the increase in average performance through genetic improvement after the environmental effect is excluded (Woyann et al., 2019). Most studies about public plant breeding programs efficiency reported genetic gains for wheat grain yield under 1% over the last 30 years (Cobb et al., 2019). For quality traits, few studies have been undertaken to assess their genetic progress and revealed mostly a nonsignificant

gain or even a decline over time (Laidig et al., 2017; Hu et al., 2022).

In Morocco, bread wheat is highly consumed every day, mainly as bread, at an important rate of 200 kg/person/year. A limited number of studies have evaluated the rates of wheat genetic gains in drylands areas, such as Morocco, especially under the current environmental challenges, and so far, there has not been a study on the breeding progress for grain quality of bread wheat cultivars in Morocco. The objectives of the present work were to (I) determine the performance and stability of grain yield and quality of genotypes released over the 4 last decades from 1980 to 2022, and (II) quantify breeding progress over the main periods of release of bread wheat genotypes in the public breeding program in Morocco to propose an efficient breeding strategy and promote sustainable agriculture.

Materials and methods

1. Genetic material and field trials

In this study, a total of 20 bread wheat lines and cultivars spanning four decades of breeding from 1980 to 2022 at the National Institute of Agricultural Research (INRA) were evaluated under 12 Moroccan environments representative of the main bread wheat growing areas in Morocco. Genotypes were classified into 4 groups (decades) according to the year of release. A total of 4, 6, 2 and 8 lines/cultivars were respectively assigned to the decades 1980–1990, 1991–2001, 2001–2012, and 2013–2022. The last group comprises the latest registered cultivars in addition to the elite lines submitted for release. The full list is displayed in Table 1.

A randomized block design of three replications was used as the experimental design. Each entry was planted in plots of 6 m² at six experiment stations over the three seasons 2017, 2018, and 2020 in Morocco, for a total of 12 environments (sites × seasons). Planting was conducted between the 1st and the 10th of December. Agronomic management was performed according to recommended local practices at each location. None of the trials was subjected to insecticide or fungicide treatment to assess the genotypic performances and behavior under real environmental conditions.

Table 1. List of the 20 cultivars and elite lines of bread wheat used in the study and their year of release

Таблица 1. Список 20 сортов и элитных линий мягкой пшеницы, находившихся в изучении, и годы их создания

Cultivar/Line	Year of release	Decade of release	Cultivar/Line	Year of release	Decade of release
Marchouch	1984	1980–1990	Kharroba	2010	2002–2012
Kanz	1987	1980–1990	Khadija	2012	2002–2012
Achtar	1988	1980–1990	Malika	2016	2013–2022
Tilila	1989	1980–1990	Snina	2017	2013–2022
Massira	1992	1991–2001	Lina	2020	2013–2022
Amal	1993	1991–2001	BT175	2022	2013–2022
Mehdia	1993	1991–2001	BT155	Under submission	2013–2022
Rajae	1993	1991–2001	AV04	Under submission	2013–2022
Arrehane	1996	1991–2001	AV21	Under submission	2013–2022
Aguilal	1996	1991–2001	BTG	Under submission	2013–2022

2. Climatic conditions of cropping seasons

The 2017/2018 cropping season showed regularity and good distribution of rainfall in space and time, despite the late arrival of the autumn rains. The 2018/2019 and 2019/2020 seasons were characterized by restrictive rainfall, poorly distributed during the crop cycle (Table 2).

within and across environments per decade. The genetic gain per year was then measured by dividing this value by 10 (years). The Pearson correlation analysis was used to highlight the relationships between all the studied traits, and decades. All those analyses were performed using the Genstat software (18th edition).

Table 2. Description of environments and experiment sites used for field evaluation

Таблица 2. Погодные условия и пункты проведения полевого изучения

Environment	Coordinates	Mean rainfall* (mm)	T min*	T max*	Cropping season	Rainfall (mm)
Allal Tazi (AT18)	34°31' N / 6°19' W	514	5	33	2017–2018	274
Allal Tazi (AT19)					2018–2019	139
Allal Tazi (AT20)					2019–2020	349
Douyet (DYT18)	34°00' N / 5°00' W	410	5	31	2017–2018	426
Douyet (DYT19)					2018–2019	318
Marchouch (MCH18)	33°34'3.1" N / 6°38'0.1" W	375	7	32	2017–2018	512
Marchouch (MCH19)					2018–2019	113
Marchouch (MCH20)					2019–2020	354
Sidi El Aidi (SEA18)	33°9'36" N / 7°24'0" W	300	1	43	2017–2018	305
Sidi El Aidi (SEA20)					2019–2020	199
Jemaat Shaim (JSH18)	32°40' N / 10°0' W A	256	8	35	2017–2018	232
Khemiss Zemamra (KHZ18)	32°37' N / 8°42' W	250	12	28	2017–2018	340

* - Annual average rainfall and temperature during the last five cropping seasons

* - Среднегодовая сумма осадков и температура за последние пять вегетационных периодов

Rainfall was highly correlated with yield performance ($r = 0.70$; $P = 0.011$), while a nonsignificant correlation linked rainfall to GPC ($r = 0.09$; $P = 0.77$). The environments were categorized depending on their yield performance in three groups: low-yielding environments ($< 2 \text{ t ha}^{-1}$); intermediate yielding environments (> 2 and $< 4 \text{ t ha}^{-1}$) and high-yielding environments ($> 4 \text{ t ha}^{-1}$).

3. Trait measurements and statistical analysis

Grain yield (GY) was driven from 4.5 m^2 of harvested plot and converted to the standard unit of metric ton per hectare (t/ha). Grain protein content (GPC) was assessed using an infrared NIR grain analyzer as a percentage of dry weight (% DW).

At the first stage, an analysis of variance (ANOVA) was performed for each trait and environment independently using the SAS software. Then, a combined analysis of variance was carried out to assess the effects of the genotype, environment, and genotype \times environment. Significant differences at the 5% confidence limit were identified by the Bonferroni mean comparison. Based on mean data, the AMMI analysis (Yan et al., 2000) and superiority index (Pi) calculation (Lin, Binns, 1988) were used for the stability and adaptability analysis. Grain-yield protein (GYP) was calculated for each environment as the product of GPC and GY and corresponded to the grain protein harvested per area (Koekemoer et al., 1999). The absolute (AGG, trait unit/time unit) and relative genetic gain (RGG, %/time unit) were calculated for all traits. A regression analysis, with a standard linear model applied to decade cultivar means, was used to calculate rates of change

Results

1. Field trials - Combined and individual analyses of variance

The combined ANOVA showed very highly significant differences between environments, genotypes, and environment \times genotype interactions for both grain yield (GY) and grain protein content (GPC) ($P < 0.001$). The environmental component was the predominant source of variation, accounting for 87% and 90% of the total sum of squares of GY and GPC, respectively, while the genotypic effect was almost four times that of the genotype \times environment interaction (2 and 1% respectively) (data not shown). The average GY and GPC were respectively 2.98 t ha^{-1} and 14.24% DW across all 12 environments. The newly submitted lines BTA21 (4.41 t ha^{-1}), BTA04 (4.31 t ha^{-1}), and BTG (3.90 t ha^{-1}) presented the highest mean GY values, while the least performances were manifested by the old cvs. 'Kanz' (2.28 t ha^{-1}), 'Rajae' (2.55 t ha^{-1}), 'Marchouch' (2.67 t ha^{-1}), and 'Tilila' (2.68 t ha^{-1}). Regarding quality, cv. 'Marchouch' had the highest mean value of GPC (15.3%), followed by 'Massira' (15.1%), 'BT155' (15.2%), and 'Kharouba' (15.1%), whereas the lowest values were attributed to the new lines BTA04 (11%), BTA21 (11.1%), and BTG (12%) (Table 3).

The combined ANOVA revealed highly significant differences between groups in terms of GY, and nonsignificant differences for GPC. The groups 2013–2022 (3.19 t ha^{-1}) and 2002–2012 (2.98 t ha^{-1}) showed the highest performances in terms of GY (Table 3). The one-way ANOVA showed signifi-

Table 3. Grain yield (GY, t ha⁻¹), and grain protein content (GPC, % DW) of bread wheat cultivars and elite lines, and the corresponding superiority index (Pi)
Таблица 3. Урожайность зерна (GY, т/га), содержание белка зерна (GPC, %) у сортов и элитных линий мягкой пшеницы и соответствующие индексы превосходства (Pi)

Cultivar/Line/ Decade	Combined data		Low-yielding environments		High-yielding environments		Intermediate yielding environments	
	GY (Pi)	GPC (Pi)	GY (Pi)	GPC (Pi)	GY (Pi)	GPC (Pi)	GY (Pi)	GPC (Pi)
Marchouch	2.66 (1.45)	15.28 (0.84)	1.05 (0.69)	16.57 (0.29)	4.32 (2.62)	15.64 (2.33)	2.97 (1.37)	14.03 (0.39)
Kanz	2.29 (2.98)	14.34 (2.63)	1.03 (0.75)	15.07 (2.92)	3.12 (7.38)	15.45 (3.24)	2.79 (2.11)	13.08 (2.03)
Achtar	2.78 (1.51)	13.74 (3.54)	0.98 (0.81)	15.15 (2.45)	5.13 (1.67)	14.34 (4.99)	2.86 (1.97)	12.25 (3.54)
Tilila	2.68 (1.54)	13.84 (3.18)	0.93 (0.86)	14.55 (3.56)	4.07 (3.07)	14.16 (5.22)	3.23 (1.16)	13.09 (1.66)
Massira	2.74 (2.69)	15.14 (1.34)	1.70 (0.17)	16.38 (0.67)	3.90 (7.44)	15.91 (2.81)	2.87 (1.85)	13.68 (0.98)
Amal	2.79 (1.34)	13.63 (4.53)	1.25 (0.48)	15.12 (2.16)	4.68 (2.31)	13.42 (9.13)	2.90 (1.45)	12.56 (3.66)
Mehdia	2.95 (0.99)	13.86 (3.62)	1.19 (0.55)	15.76 (1.27)	4.87 (1.41)	13.99 (7.39)	3.21 (1.11)	12.26 (3.24)
Rajae	2.55 (1.51)	13.45 (4.45)	0.73 (1.12)	14.16 (6.02)	4.44 (2.07)	14.43 (4.60)	2.88 (1.49)	12.30 (3.09)
Arrehane	3.09 (0.78)	14.29 (2.55)	1.49 (0.30)	15.51 (1.52)	4.92 (1.26)	14.76 (5.06)	3.27 (0.88)	13.04 (1.86)
Aguilal	2.87 (1.23)	12.86 (6.53)	1.15 (0.61)	13.83 (5.48)	5.42 (0.73)	12.81 (11.7)	2.73 (2.02)	12.11 (4.25)
Kharroba	2.77 (1.76)	15.08 (0.96)	1.07 (0.65)	16.64 (0.15)	3.39 (5.55)	16.59 (0.43)	3.75 (0.38)	12.92 (1.91)
Khadija	3.16 (0.70)	14.35 (2.59)	1.54 (0.34)	15.68 (1.28)	5.34 (0.68)	14.69 (5.41)	3.14 (1.00)	13.07 (1.97)
Malika	2.97 (1.02)	14.51 (1.87)	1.73 (0.13)	15.57 (1.25)	4.72 (1.58)	15.22 (3.58)	2.90 (1.38)	13.23 (1.34)
Snina	3.04 (1.32)	14.51 (2.08)	1.79 (0.09)	15.37 (1.75)	4.96 (1.99)	14.92 (4.47)	2.88 (1.90)	13.59 (0.93)
Lina	3.35 (0.09)	14.46 (2.52)	1.55 (0.19)	16.80 (0.52)	5.46 (0.00)	12.00 (10.8)	4.99 (0.00)	12.18 (1.39)
BT175	3.28 (0.11)	13.96 (3.06)	2.07 (0.00)	16.08 (1.02)	4.85 (0.18)	12.15 (10.1)	4.28 (0.25)	11.70 (2.58)
BT155	2.82 (0.38)	14.68 (2.12)	1.43 (0.21)	17.06 (0.21)	5.14 (0.05)	12.25 (9.68)	3.75 (0.79)	12.32 (1.21)
BTA04	4.31 (0.43)	10.95 (7.78)	-	-	5.12 (0.06)	10.9 (16.5)	3.89 (0.61)	10.97 (3.41)
BTA21	4.41 (0.33)	11.13 (6.98)	-	-	5.18 (0.04)	11.45 (13.5)	4.02 (0.48)	10.98 (3.72)
BTG	3.91 (1.17)	11.70 (5.15)	-	-	4.64 (0.34)	11.7 (12.3)	3.54 (1.59)	11.70 (1.60)
1980-1990	2.60 (0.47)	14.32 (0.41)	0.99 (0.34)	15.34 (0.84)	4.16 (0.55)	14.90 (0.51)	2.96 (0.41)	13.11 (0.06)
1991-2001	2.88 (0.25)	13.73 (1.06)	1.25 (0.15)	15.13 (0.83)	4.71 (0.11)	14.22 (1.61)	2.97 (0.38)	12.66 (0.29)
2002-2012	2.98 (0.23)	14.71 (0.09)	1.30 (0.15)	16.16 (0.01)	4.36 (0.62)	15.64 (0.07)	3.45 (0.02)	12.99 (0.12)
2013-2022	3.19 (0.14)	14.54 (0.23)	1.72 (0.00)	16.09 (0.10)	4.96 (0.01)	13.40 (0.79)	3.54 (0.27)	12.44 (0.03)

cant to very highly significant differences between decades for GY under all the environments, except DYT18, KHZ18 and SEA18. The quality trait presented less variability within each environment between genotypes and groups. The highest GPC value belonged to the group 2002–2012, with 14.7%, instead of a mean value of 14.3% for the other groups (see Table 3).

2. Stability analysis

The GGE analysis showed a number of intercrossings between environments, making difficult to generate independent megaenvironments (Figure).

Based on the superiority index (P_i), the lowest value corresponded to the decade 2013–2022, showing dynamic sta-

best stable ($0.0 > P_i > 0.38$) and high-yielding genotypes, ranging from 3.75 and 4.99 t ha⁻¹; while their GPC values ranged from 12.18 to 12.92% DW. The highest-performing cultivars in terms of quality were 'Marchouch', 'Snina' and 'Massira', with the lowest P_i values and the highest GPC values (13.59–14.03% DW). Finally, for high-yielding environments, the group 2013–2022 was the most stable and the most high-yielding group (GY = 4.96 t ha⁻¹; $P_i = 0.013$), while it recorded a mean GPC value of only 13.40% DW. The new Lina, BT155, BTA04 and BTG lines were the most stable, with P_i values ranging from 0 to 0.06 and GY varying from 5.12 to 5.46 t ha⁻¹. For GPC, 'Kharroba' was the best cultivar in terms of GPC and stability (GPC = 16.59; $P_i = 0.43$) (see Table 3).

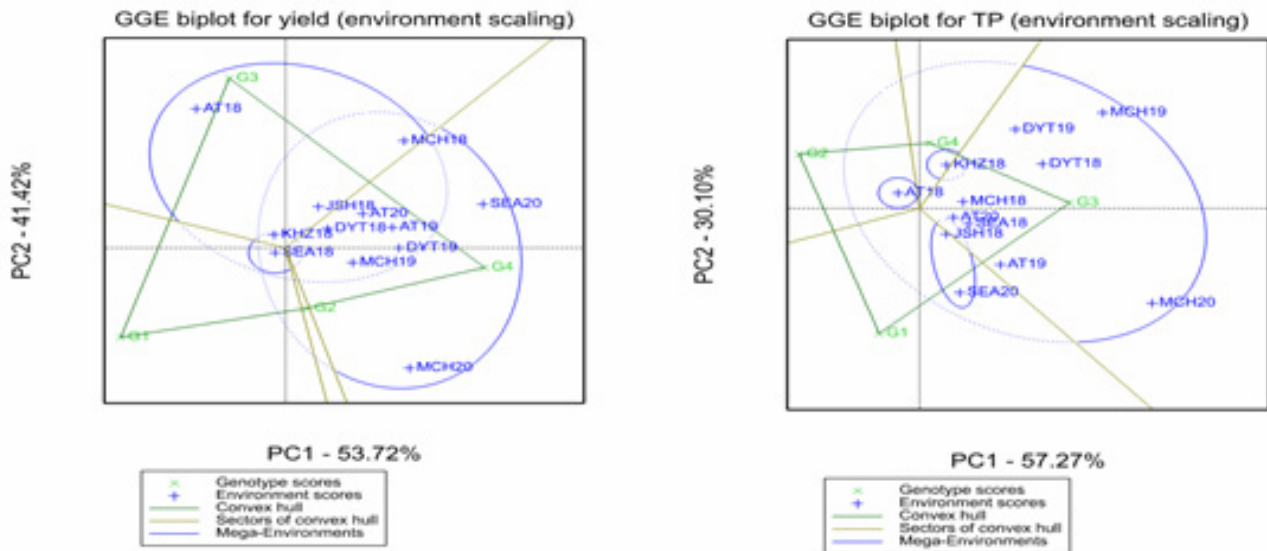


Figure. GGE analysis per decade of release for grain yield and protein content

Рисунок. Анализ факторов «генотип» и «генотип × среда» для урожайности и содержания белка по годам создания сортов/линий

bility and high performance (3.2 t ha⁻¹; $P_i = 0.135$) over environments. The new cvs. 'Lina', 'BT175', and 'BTA21' exhibited the lowest values of P_i , ranging from 0.097 to 0.331, and were among the highest-yielding cultivars varying from 3.3 to 4.4 t ha⁻¹. For GPC, the group 2002–2012 was the best performing (14.71% DW) and stable ($P_i = 0.096$), followed by 2013–2022 (14.54% DW; $P_i = 0.229$). Cvs. 'Marchouch', 'Kharroba', and 'Massira' showed the lowest values of P_i , ranging from 0.842 to 1.337, and GPC values from 15.08 to 15.28% DW (see Table 3).

When evaluating performances across different types of environments, the group 2013–2022 was the most stable and the highest-performing under low-yielding environments in terms of GY ($P_i = 0.007$; GY = 1.72 t ha⁻¹); while it ranked second in terms of quality ($P_i = 0.10$; GPC = 16.09% DW) after the group 2002–2012. Cvs. 'BT175', 'Snina' and 'Malika' presented stable ($0 > P_i > 0.13$) and high yields, ranging from 1.73 to 2.07 t ha⁻¹. These cultivars also expressed a good level of GPC, ranging from 15.37 to 16.08% DW, in comparison with 'Kharroba', 'BT155' and 'Marchouch' (16.57 > GPC > 17.06% DW). Under intermediate yielding environments, the groups 2002–2012, followed by 2013–2022, manifested the highest yields (3.45 and 3.54 t ha⁻¹, respectively) and the lowest P_i values (0.02 and 0.27, respectively). These groups expressed also the best quality performances: 12.99% DW ($P_i = 0.12$), and 12.44 ($P_i = 0.03$). The lines Lina, BT175 and Kharroba were the

3. Genetic gain of grain yield

A combined analysis across environments showed a decade-wise GG for GY of 21.4 kg yr⁻¹, corresponding to 0.75%/year, with about 28% of yield increase through four decades of breeding efforts. A vast majority (8) of the environments had significant GG for GY, with genetic gains varying from 16.7 kg ha⁻¹ yr⁻¹ at MCH19 (1.33% yr⁻¹) to more than 71 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (1.39% yr⁻¹) at MCH18 (Table 4).

When evaluating within types of environments, the low-yielding ones showed the most significant and highest genetic gain of 22.84 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (1.73% yr⁻¹) compared to intermediate yielding (21.88 kg ha⁻¹ yr⁻¹; 0.69% yr⁻¹) and high yielding environments (21.2 kg ha⁻¹ yr⁻¹; 0.46% yr⁻¹) (see Table 4). The genetic gain for high-yielding environments was nonsignificant ($P = 0.208$).

When comparing the individual genetic gain from a group to another, the results of regression analysis showed an obvious advantage of the group 1991–2001 compared to the group 1980–1990 with a positive significant slope of $b = 1.05$ and a nonsignificant constant $a = 0.16$ corresponding to an average yield increase of 11%, varying from 29 up to 93 kg ha⁻¹. The progress is less apparent from 1991–2001 to 2002–2012, with a highly significant slope ($b = 0.96$) and a positive nonsignificant constant ($a = 0.17$), and an average gain of 2.4%. The slope of regression from 2002–2012 to 2013–2022 was much less important but highly significant ($b = 0.76$), while the constant was nonsignificant ($a = 0.92$), with an average gain of 7.2%.

Table 4. Absolute and relative genetic gain for GY, GPC, and GYP

Таблица 4. Абсолютные и относительные показатели генетического эффекта для урожайности зерна, содержания белка в зерне и сбора белка с единицы площади

Environments	Absolute genetic gain						Relative genetic gain (% yr ⁻¹)	
	GY (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)		GPC content (% yr ⁻¹)		GYP (kg ha ⁻¹ % DW)		GY	GPC
	Fpr	GG	Fpr	GG	Fpr	GG		
AT18	0.349	22.5	0.829	-0.005	0.552	140	0.69	-0.039
DYT18	0.717	21.1	0.338	0.043	0.474	487	0.51	0.23
JSH18	0.016	21.6	0.648	-0.014	0.037	217	1.26	-0.096
KHZ18	0.757	3.6	0.302	0.031	0.333	117	0.17	0.22
MCH18	0.003	71.0	0.699	0.00+	0.003	788	1.39	0.06
SEA18	0.347	-5.42	0.533	-0.013	0.369	-85	-0.16	-0.09
AT19	< 001	32.5	0.742	-0.004	< 0.001	397.5	2.07	-0.035
DYT19	< 001	32.4	0.009	0.032	< 0.001	586.2	3.81	0.18
MCH19	0.001	16.7	< 001	0.069	< 0.001	391.2	1.33	0.38
AT20	0.012	27.1	0.386	0.01	0.005	375	0.80	0.08
MCH20	0.036	21.8	0.648	-0.010	0.088	211	0.47	-0.08
SEA20	0.001	54.4	0.644	0.009	0.003	276	1.59	0.05
Low-yielding environments	< 0.001	22.84	0.330	0.326	< 0.001	377	1.73	0.21
Intermediate yielding environments	0.005	21.88	0.266	-0.177	0.001	277.5	0.69	-0.14
High-yielding environments	0.208	21.20	0.281	-0.367	0.44	147	0.46	-0.26
Combined data	0.001	21.40	0.950	-0.0007	0.003	276.4	0.75	-0.002

4. Genetic gain of grain protein content and grain yield protein

The evolution for GPC remained stable and nonsignificant (0.0007% DW yr⁻¹; $P = 0.950$) from 1980–1990 to 2013–2022, regardless of the environment type. Only 2 out of 12 environments (MCH19 and DYT19) manifested significant GG with 0.07% DW yr⁻¹ and 0.032% yr⁻¹, respectively (see Table 4).

The results showed a highly positive significant negative trend of GYP (276 kg ha⁻¹ % DW yr⁻¹) over time per decade. Considering each type of environments, there was a highly significant progress especially under low-yielding environments ($P < 0.001$) and to a lesser extent under intermediate yielding environments; while high-yielding environments showed a nonsignificant progress over time ($P > 0.05$) (see Table 4).

5. Relationship between protein content, grain yield, and derivatives

Overall, a highly significant negative correlation linked GY and GPC ($r = -0.36$; $P < 0.001$). The regression analysis of GPC on GY showed a negative slope ($b = -0.587$) with a coefficient of determination of 0.12. Regarding the types of environ-

ments, there was a significant negative correlation between GPC and GY under high-yielding ($r = -0.384$; $P < 0.001$), intermediate ($r = -0.325$; $P < 0.001$); and low-yielding environments ($r = -0.351$; $P < 0.001$).

The correlation analysis showed a highly significant relationship between GY and decades of release ($r = 0.14$; $P < 0.001$). Within the types of environments, this correlation was significant for intermediate ($r = 0.281$; $P < 0.001$) and low-yielding environments ($r = 0.407$; $P < 0.001$); while it was nonsignificant for high-yielding environments ($r = 0.151$; $P = 0.11$). The correlation analysis showed a nonsignificant positive association between GPC and the four decades of release ($r = 0.013$; $P = 0.779$). The correlation between GPC and decades was weakly significant under intermediate ($r = -0.142$; $P = 0.045$) and low-yielding environments ($r = -0.165$; $P = 0.034$); while it was nonsignificant for high yielding environments ($r = -0.147$; $P = 0.119$).

The correlation between GY and GYP was the most important ($r = 0.948$; $P < 0.001$); with Pearson values ranging from 0.88 ($P < 0.001$) for high-yielding environments, 0.89 ($P < 0.001$) for low-yielding environments, to 0.92 ($P < 0.001$) for intermediate yielding environments.

Discussion

Grain yield (GY) and grain protein content (GPC) are critical traits in wheat breeding programs, determining the economic value of this crop worldwide and the nutritional value of derived products. The aim of this research was to evaluate the genetic gain of GY and GPC in 20 bread wheat cultivars released during four decades of breeding in Morocco from 1980 to 2022 in order to improve the efficiency of breeding strategies.

1. Genotype, environment, and genotype × environment effects

The analysis of variance showed highly significant differences between environments (E) and genotypes (G), with a highly significant G × E interaction for grain yield (GY) and grain protein content (GPC). The environmental component explained the highest portion of the total source of variation (> 80%). This result reflects the diversity of contrasted multilocational agroclimatic conditions in terms of biotic and abiotic stress intensity and occurrence, and their influence on the performance and ranking of genotypes (Guzmán et al., 2016; Bassi, Sanchez-Garcia, 2017; Giancaspro et al., 2019; Woyann et al., 2019). In Morocco, rainfall is the main environmental driver of genotypic performances (Jlibene, 2011), as supported by the correlation between yield and rainfall data. Genotypic effect was also significant for GY and GPC in most of environments, showing that cultivars react differently to water restrictions. Multilocational data and stability analysis demonstrated the superiority of the lines released during the period of 2013–2022, especially Lina and BT175, which combined high yield, better yield stability, and adequate protein content across all types of environments. Therefore, modern cultivars had both improved yield potential and tolerance to moisture stress, resulting in an overall higher and stable grain yield and more responsiveness to environmental changes. On the other hand, the cultivars released during the 2002–2012 decade demonstrated the highest GPC values with the best stability across environments. Most of the new cultivars recently released or under registration process from 2020 to 2022 incorporated genes from wild species like *Aegilops squarrosa*, resulting in longer spikes and higher 1000 kernel weight. Wheat progenitors constitute a wide gene pool for relevant climate-responsive traits (Leigh et al., 2022).

2. Genetic gains for grain yield

The wheat yield exhibited a continuous positive increase: from 2.57 t ha⁻¹ in 1980–1990 to 3.28 t ha⁻¹ in 2013–2022. This means that the new released cultivars are a key for improving yields, especially that more than half of the test environments used for the analysis faced severe to moderate drought (Hu et al., 2022). The significant average annual genetic gain (GG) in GY since 1980 was found to be 21.4 kg yr⁻¹ (0.75%/year), establishing the efficient contribution of breeding activities carried out in the last four decades towards improving the wheat yields in Morocco. M. Jlibene (2011) reported a lower mean genetic gain of 17 kg yr⁻¹ using a set of Moroccan cultivars released from 1973 to 2006 and evaluated in 19 environments, varying from 13 kg yr⁻¹ in rainfed unfavorable areas to 22 kg yr⁻¹ in rainfed favorable environments. The GG obtained was within the range reported in Spain (0.88% yr⁻¹ from 1931 to 2000) (Sanchez-Garcia et al., 2013), and France (0.66% yr⁻¹ from 1962 to 1988) (Brancoourt-Hulmel et al., 2003). Other studies reported higher values of GG, ranging from 1.1% yr⁻¹ in the United States Central Plains from 1903 to 2014 (Rife et al., 2019) to 1.17% yr⁻¹ in

Argentina from 1940 to 1999 (Lo Valvo et al., 2018) and 1.29% yr⁻¹ in China during the period of 1950–2015 (Hu et al., 2022). J. N. Cobb et al. (2019) reported that most public wheat breeding programs realized less than 1% of GG over the last 30 years.

GY is a result of yield potential of cultivars and their response to a combination of several environmental stresses (Bassi, Sanchez-Garcia, 2017). Great differences between environments were noted in genetic gain rates. The highest GG was recorded for the driest Moroccan environments, reflecting the superiority of climate-resilient cultivars released recently, incorporating many efficient resistance genes against the main biotic and abiotic stresses. Furthermore, the annual genetic gain was significantly more important under low-yielding and intermediate environments (15.9% and 17.3% yr⁻¹, respectively); while it was nonsignificant for high-yielding environments (6.8% yr⁻¹). In Morocco, the drought frequency has risen to 5 or 6 events every 10 years since the beginning of the 21st century. Since the Mediterranean area has been identified as a hot spot of climate change, the most important wheat-producing regions are suffering continuously from increasing intensities of drought and heat. Therefore, low-yielding and intermediate environments, where this crop is mainly cultivated under a rainfed system, account for more than 85% of the whole wheat production in Morocco during the two last decades (Verner et al., 2018). Recently, the national bread wheat breeding program at the National Institute of Agricultural Research (INRA) has focused on enhancing yield stability through incorporating drought tolerance, and resistance to *Septoria tritici*, yellow rust, and the Hessian fly as major selection traits to overcome the current environmental challenges even at the expense of yield potential.

However, the progress from a decade to another highlighted the limited rate of gain from 2001–2012 to 2013–2022, indicating a trend toward a plateau or potential stagnation of genetic gain, resulting from the negative impact of climate change on wheat yields and the narrowed genetic diversity with the development of breeding (Woyann et al., 2019; Hu et al., 2022). This stagnation has been reported by several earlier studies (Lo Valvo et al., 2018; Woyann et al., 2019), and makes it more urgent to develop a more efficient breeding strategy.

3. Genetic gains for grain protein content

Regarding quality, the data set showed a nonsignificant negative linear regression for GPC and, therefore, a nonsignificant progress in Morocco from 1980 to 2022. The newly bred wheat cultivars have maintained stable protein concentration in the last 40 years. However, the 2002–2012 and 2013–2022 decades exhibited respectively the highest values (> 14% DW). According to the classification of wheat quality, all cultivars exhibited a medium (11 > GPC > 13.5% DW) or high (GPC > 13.5% DW) grade of protein content depending on the environment. This finding was in line with other studies which noted a slight deterioration or nonsignificant progress of quality traits (Laidig et al., 2017; Hu et al., 2022).

Wheat grain quality has received much less attention and is often overlooked in the efforts to improve yield (Hu et al., 2022). This stagnant progress may result from the significant increase in grain yield, which enhances starch accumulation in the wheat grain that accounts for approximately 70% of grain dry weight, and therefore dilutes other grain components, including protein (Hu et al., 2022). In fact, even if quality has been considered as an important selection trait in bread wheat breeding, affecting the nutritional quality and

the end use value and baking properties of wheat flour, breeders struggled to combine high-yielding cultivars with a high grade of quality. Furthermore, premium prices are not applied for high-quality wheat, like in some developed countries, i.e., the U.S. and Canada, resulting in farmers' reluctance to lose a margin of their yield in favor of better quality (Tadesse et al., 2019).

4. Grain yield and grain quality relationships

The environmental component had different effects on the two studied traits. Severe drought had heavy negative impact on GY during dry seasons, contrary to GPC which reached its highest values under dry conditions, as stated by many researchers (Özturk, Aydin 2004; Bennani et al., 2018). Although the underlying reasons for this negative relationship is still ambiguous, N. G. Munier-Jolain and C. Salon (2005), and M. Bogard et al. (2010) explained this behavior through fertilization, nitrogen uptake, and the interrelationship between carbon and nitrogen metabolism at the canopy level. Contrary to wet conditions, yield response to available nitrogen is low under dry conditions, while high-protein grain is achieved easily with little or no nitrogen fertilizer. However, the importance of climatic factors, especially drought stress, may lessen nitrogen uptake on GPC and result in alteration of the bread wheat quality in response to the reduction in N accumulated (Bogard et al., 2010 ; Guzmán et al., 2016).

The correlation analysis confirmed the negative relationship between GY and GPC in low-yielding, intermediate and high-yielding environments, making difficult the simultaneous improvement of grain yields while maintaining a good level of protein content (Bogard et al., 2010; Laidig et al., 2017; Hu et al., 2022). This finding is in line with many research studies (Oury, Godin, 2007; Iqbal et al., 2016; Geyer et al., 2022) and is explained by the multiple genes controlling these complex traits and the interactions that each gene has with the environmental component (Bassi, Sanchez-Garcia, 2017; Giancaspro et al., 2019). However, this relationship is not always true and depends on the environment reflecting the importance of genotype × environment interactions for GY and GPC that hide the GY/GPC relationship (Oury, Godin, 2007; Bogard et al., 2010).

In order to improve GY and GPC simultaneously, various methods were reported, including statistical parameters combining yield and protein. Grain-yield protein (GYP) was applied to better evaluate the GY/GPC relationship and to identify superior cultivars with the best balance between GY and GPC without concurrent reduction for any trait (Monaghan et al., 2001; Geyer et al., 2022). Our findings revealed significant genetic and environmental effects of this index, as stated by other studies (Monaghan et al., 2001; Oury, Godin, 2007). GPD showed a highly significant correlation with GY and GPC and the highest positive values for the genotypes released during the two last decades. These findings were in line with other studies (Koekemoer et al., 1999; Rapp et al., 2018).

5. Improvement of the breeding strategy to increase genetic gains

Taking into account the key findings of our study, several suggestions might help to improve the current breeding strategy for sustainable genetic improvement.

1. The substantial effect of climatic variables on the estimated GG and the stability results should drive the new breeding strategy to focus on specific adaptation through selecting elite stable lines for each megaenvironment (product profiles) in order to mitigate G × E interaction effects.

2. A significant improvement and progress have been achieved in Moroccan bread wheat productivity till now, while GPC remained relatively stable over time. Simultaneous improvement of both traits becomes pressing within the increasing of dry seasons in recent years to enhance consumers' income and living health standards (Giancaspro et al., 2019). J. Monaghan et al. (2001) and F. X. Oury and C. Godin (2007) suggest to undertake selection programs based mainly on GY, while at the same time adopting appropriate cropping practices for enhancing GPC, like zero tilling, water supply, and targeted N fertilization management, or selecting for increased efficiency in nitrogen partitioning in improved germplasm.

3. Improving the nutritional value of new cultivars may be realized through the use of wild germplasm which holds a high quality grade in comparison with common bread wheat cultivars. Advanced genetic tools such as speed breeding and genomics in line with high throughput phenotyping provide a more precise combination of beneficial traits and accelerate breeding gains in the field (Tadesse et al., 2019).

4. Strengthening networking at the national and international levels (CIMMYT and ICARDA) would help to have access to new technologies and a wide range of germplasm with higher yield potential and stability, and end-use qualities to reach farmers' and manufacturers' needs for a sustainable national wheat production.

5. Determining periodically the rate of genetic gain in key traits within breeding programs helps to adopt new processes and breeding techniques for better efficiency. Other yield components and quality traits should be assessed for their progress to better guide the selection of secondary traits and achieve more efficient simultaneous improvement.

Conclusion

The present study was aimed to measure the impact of more than 4 decades of the INRA bread wheat breeding program from 1980 to 2022. Huge environmental effects had a pressing impact on genetic gains. Great achievements have been made in grain yield improvement during the last four decades in Morocco, while there was no significant progress in protein content. The national breeding strategy should combine simultaneously better quality and enhanced genetic gains for yield in the new released cultivars through using advanced technologies, wild genetic resources and landraces, and incorporating adequate management practices like zero-till planting and targeted N fertilization management, combined with the product profile approach.

References / Литература

- Bassi F.M., Sanchez-Garcia M. Adaptation and stability analysis of ICARDA durum wheat elites across 18 countries. *Crop Science*. 2017;57(5):2419-2430. DOI: 10.2135/cropsci2016.11.0916
- Bennani S., Taghouti M., Birouk A. Response of spring bread wheat quality and yield parameters to different drought scenarios under Moroccan conditions. In: *Book of Proceedings. IX International Agricultural Symposium "Agrosym 2018"; Jahorina; October 04–07, 2018*. Sarajevo; 2018. p.940-945. Available from: http://agrosym.ues.rs.ba/article/showpdf/BOOK_OF_PROCEEDINGS_2018_FINAL.pdf [accessed Dec. 08, 2022].
- Bogard M., Allard V., Brancourt-Hulmel M., Heumez E., Machel J.M., Jeuffroy M.H. et al. Deviation from the grain protein concentration–grain yield negative relationship

- is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat. *Journal of Experimental Botany*. 2010;61(15):4303-4312. DOI: 10.1093/jxb/erq238
- Brancourt-Hulmel M., Doussinault G., Lecomte C., Bérard P., Le Buanec B., Trottet M. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Science*. 2003;43(1):37-45. DOI: 10.2135/cropsci2003.3700
- Cobb J.N., Juma R.U., Biswas P.S., Arbelaez J.D., Rutkoski J., Atlin G. et al. Enhancing the rate of genetic gain in public-sector plant breeding programs: lessons from the breeder's equation. *Theoretical and Applied Genetics*. 2019;132(3):627-645. DOI: 10.1007/s00122-019-03317-0
- Geyer M., Mohler V., Hartl L. Genetics of the inverse relationship between grain yield and grain protein content in common wheat. *Plants*. 2022;11(16):2146. DOI: 10.3390/plants1162146
- Giancaspro A, Giove S.L., Zacheo S.A., Blanco A., Gadaleta A. Genetic variation for protein content and yield-related traits in a durum population derived from an inter-specific cross between hexaploid and tetraploid wheat cultivars. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1509. DOI: 10.3389/fpls.2019.01509
- Guzmán C., Mondal S., Govindan V., Autrique J.E., Posadas-Romano G., Cervantes F. et al. Use of rapid tests to predict quality traits of CIMMYT bread wheat genotypes grown under different environments. *LWT – Food Science and Technology*. 2016;69:327-333. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.01.068
- Hu N., Du C., Zhang W., Liu Y., Zhang Y., Zhao Z. et al. Did wheat breeding simultaneously improve grain yield and quality of wheat cultivars releasing over the past 20 years in China. *Agronomy*. 2022;12(9):2109. DOI: 10.3390/agronomy12092109
- Iqbal M., Moakhar N.P., Strenzke K., Haile T., Pozniak C., Hucl P. et al. Genetic improvement in grain yield and other traits of wheat grown in Western Canada. *Crop Science*. 2016;56(2):613-624. DOI: 10.2135/cropsci2015.06.0348
- Jlibene M. Options génétiques d'adaptation du blé tendre au changement climatique: variétés à résistance multiple: sécheresse, cécidomyie, septoriose, rouilles. Rabat: INRA; 2011.
- Koekemoer F.P., Labuschagne M.T., Van Deventer C.S. A selection strategy for combining high grain yield and high protein content in South African wheat cultivars. *Cereal Research Communications*. 1999;27(1-2):107-114. Available from: <https://www.jstor.org/stable/23786273> [accessed Nov. 17, 2022].
- Laidig F., Piepho H., Rentel D., Drobek T., Meyer U., Huesken A. Breeding progress, environmental variation and correlation of winter wheat yield and quality traits in German official variety trials and on-farm during 1983–2014. *Theoretical and Applied Genetics*. 2017;130(1):223-245. DOI: 10.1007/s00122-016-2810-3
- Leigh F.J., Wright T.I.C., Horsnell R.A., Dyer S., Bentley A.R. Progenitor species hold untapped diversity for potential climate-responsive traits for use in wheat breeding and crop improvement. *Heredity*. 2022;128:291-303. DOI: 10.1038/s41437-022-00527-z
- Lin C.S., Binns M.R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. *Canadian Journal of Plant Science*. 1998;68(1):193-198. DOI: 10.4141/cjps88-018
- Lo Valvo P.J., Miralles D.J., Serrago R.A. Genetic progress in Argentine bread wheat varieties released between 1918 and 2011: Changes in physiological and numerical yield components. *Field Crop Research*. 2018;221:314-321. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.08.014
- Monaghan J., Snape J., Chojecki A.J.S., Kettlewell P.S. The use of grain protein deviation for identifying wheat cultivars with high grain protein concentration and yield. *Euphytica*. 2001;122(2):309-317. DOI: 10.1023/A:1012961703208
- Munier-Jolain N.G., Salon C. Are the carbon costs of seed production related to the quantitative and qualitative performance? An appraisal for legumes and other crops. *Plant, Cell and Environment*. 2005;28(11):1388-1395. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2005.01371.x
- Oury F.X., Godin C. Yield and grain protein concentration in bread wheat: How to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes? *Euphytica*. 2007;157(1):45-57. DOI: 10.1007/s10681-007-9395-5
- Özturk A., Aydin F. Effect of water stress at various growth stages on some quality characteristics of winter wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2004;190(2):93-99. DOI: 10.1046/j.1439-037X.2003.00080.x
- Rapp M., Lein V., Lacoudre F., Lafferty J., Müller E., Vida G. et al. Simultaneous improvement of grain yield and protein content in durum wheat by different phenotypic indices and genomic selection. *Theoretical and Applied Genetics*. 2018;131(6):1315-1329. DOI: 10.1007/s00122-018-3080-z
- Rife T.W., Graybosch R.A., Poland J.A. A field-based analysis of genetic improvement for grain yield in winter wheat cultivars developed in the US Central Plains from 1992 to 2014. *Crop Science*. 2019;59(3):905-910. DOI: 10.2135/cropsci2018.01.0073
- Sanchez-Garcia M., Royo C., Aparicio N., Martín-Sánchez J.A., Alvaro F. Genetic improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. *The Journal of Agricultural Science*. 2013;151(1):105-118. DOI: 10.1017/S0021859612000330
- Tadesse W., Sanchez-Garcia M., Assefa S.G., Amri A., Bishaw Z., Ogbonnaya F.C. et al. Genetic gains in wheat breeding and its role in feeding the world. *Crop Breeding, Genetics and Genomics*. 2019;1:e190005. DOI: 10.20900/cbagg20190005
- Verner D., Tréguer D., Redwood J., Christensen J., McDonnell R., Elbert C. et al. Climate variability, drought, and drought management in Morocco's agricultural sector. Washington DC: World Bank Group; 2018. Available from: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/353801538414553978/pdf/130404-WP-P159851-Morocco-WEB.pdf> [accessed Dec. 08, 2022].
- Woyann L.G., Zdziarski A.D., Zanella R., Rosa A.C., Lima de Castro R., Caierão E. et al. Genetic gain over 30 years of spring wheat breeding in Brazil. *Crop Science*. 2019;59(5):2036-2045. DOI: 10.2135/cropsci2019.02.0136
- Yan W., Hunt L.A., Sheng Q., Szlavnick Z. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on GGE biplot. *Crop Science*. 2000;40(3):596-605. DOI: 10.2135/cropsci2000.403597x

Information about the authors

Sahar Bennani, PhD (Agr. Plant. Sci.), National Institute of Agricultural Research, Avenue Ennasr, BP 415 Rabat Principale, Rabat 10090, Morocco, sahar.bennani@inra.ma, <https://orcid.org/0000-0001-9046-9651>

Mona Taghouti, PhD (Agr. Plant. Sci.), National Institute of Agricultural Research, Avenue Ennasr, BP 415 Rabat Principale, Rabat 10090, Morocco, mouna.taghouti@inra.ma, <https://orcid.org/0000-0001-6721-2778>

Fatima Gaboun, PhD (Bioinf. and Biostat.), National Institute of Agricultural Research, Avenue Ennasr, BP 415 Rabat Principale, Rabat 10090, Morocco, fatima.gaboun@inra.ma, <https://orcid.org/0000-0003-2018-8031>

Информация об авторах

Сахар Беннани, доктор философии по сельскохозяйственному растениеводству, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, 10090 Марокко, Рабат, Рабат Принсипаль, авеню Эннаср, п/я 415, sahar.bennani@inra.ma, <https://orcid.org/0000-0001-9046-9651>

Мона Тагути, доктор философии по сельскохозяйственному растениеводству, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, 10090 Марокко, Рабат, Рабат Принсипаль, авеню Эннаср, п/я 415, mouna.taghouti@inra.ma, <https://orcid.org/0000-0001-6721-2778>

Фатима Габун, доктор философии по биоинформатике и биостатистике, Национальный институт сельскохозяйственных исследований, 10090 Марокко, Рабат, Рабат Принсипаль, авеню Эннаср, п/я 415, fatima.gaboun@inra.ma, <https://orcid.org/0000-0003-2018-8031>

Contribution of the authors: All authors contributed to the revision of this work critically for important intellectual content and editing. Bennani S. – data collection and interpretation; data analysis; writing the original draft of the manuscript. Taghouti M. – contribution to data interpretation. Gaboun F. – data analysis; contribution to data interpretation.

Вклад авторов: Все авторы внесли вклад в критическую проверку настоящей работы с целью повышения значимости интеллектуального содержания и редактирования. Беннани С. – сбор и интерпретация данных; анализ данных; написание первоначального варианта рукописи. Тагути М. – участие в интерпретации данных. Габун Ф. – анализ данных; участие в интерпретации данных.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 23.12.2022; approved after reviewing on 10.05.2023; accepted for publication on 04.09.2023. Статья поступила в редакцию 23.12.2022; одобрена после рецензирования 10.05.2023; принята к публикации 04.09.2023.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.15:631.526 (571.63)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-32-40



Оценка урожайности и качества зерна различных по происхождению гибридов кукурузы в условиях Приморского края

Е. С. Бутовец, И. Н. Даниленко, Н. А. Красковская

Федеральный научный центр агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Сергеевна Бутовец, otdelsoy@mail.ru

Актуальность. Работа посвящена оценке и отбору гибридов кукурузы различного происхождения по хозяйственно значимым показателям, накоплению белка и масла в зерне для выращивания на территории Приморского края и использования в селекционной практике.

Материалы и методы. В ФНЦ агробιοтехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки в 2017–2020 гг. изучено 22 гибрида кукурузы зернового использования различного эколого-географического происхождения. Проведена оценка по хозяйственно ценным признакам и биохимическим показателям, определены корреляционные связи между параметрами, рассчитана интегральная оценка гибридов кукурузы. Ранжирование гибридов выполнено относительно заданного идеала.

Результаты. Наивысшую интегральную оценку по комплексу хозяйственных признаков в условиях Приморского края получили гибриды кукурузы Р 7709, Р 8688 и Р 8523 (компания Pioneer), Си Ротанго (компания Syngenta). Большой процент накопления белка в зерне кукурузы отмечен при оптимальном сочетании тепла и влаги (ГТК 1,1); масла – при повышенном уровне влагообеспеченности почвы (ГТК 3,1). Максимальное содержание белка зафиксировано у гибрида Си Ротанго, масла – НУР, Ладожский 181 МВ, Р 7054. Выявлены прямые сильные корреляции урожайности с массой 1000 зерен и одного початка, выхода зерна с высотой прикрепления нижнего початка. Обратную слабую корреляцию наблюдали между биохимическими показателями с урожайностью, ФАО и выходом зерна.

Ключевые слова: гибрид, интегральная оценка, белок, масло, корреляционные связи

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану НИР по теме № 0812-2014-0016 «Создать гибрид кукурузы (ФАО 150-250) для возделывания в условиях Приморского края». Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Бутовец Е.С., Даниленко И.Н., Красковская Н.А. Оценка урожайности и качества зерна различных по происхождению гибридов кукурузы в условиях Приморского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):32-40. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-32-40

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-32-40

Evaluation of grain yield and quality in maize hybrids of various origin under the conditions of Primorsky Territory

Ekaterina S. Butovets, Irina N. Danilenko, Natalya A. Kraskovskaya

*Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk, Russia***Corresponding author:** Ekaterina S. Butovets, otdelsoy@mail.ru

Background. This study was dedicated to the evaluation and selection of maize hybrids of different origin for important agronomic traits and for protein and oil accumulation in grain under the conditions of Primorsky Territory, as well as for their possible use as source material for breeding.

Materials and methods. Twenty-two grain maize hybrids of various geographic origin were studied at the Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika in 2017–2020. Useful agronomic characters and biochemical indications were assessed, correlations between parameters were established, and an integrated evaluation of maize hybrids was made. The hybrids were ranked relative to a predetermined ideal model.

Results. Based on the results of the integrated assessment, maize hybrids P 7709, P 8688 and P 8523 (Pioneer Corporation) and Si Rotango (Syngenta) had the highest scores for a set of important agronomic traits under the conditions of Primorsky Territory. Higher protein content levels were detected in maize grain when the combination of temperature and moisture was optimal (Selyaninov's hydrothermal coefficient = 1.1). The highest oil content was observed at an enhanced level of soil moisture (HTC = 3.1). The Si Rotango hybrid had the maximum protein content. The NUR, Ladozhsky 181 MV and P 7054 hybrids showed the maximum in oil content. Strong direct correlations were discovered between the yield and the weight of 1000 kernels and one ear, and between grain yield and the height of the lower ear position. Weak reverse correlations were observed between biochemical parameters and yield, and between a FAO maturity group and grain yield.

Keywords: hybrid, integrated assessment, protein, oil, correlations

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state task according to the thematic research plan on Topic No. 0812-2014-0016 "To develop a hybrid of maize (FAO 150-250) for cultivation in Primorsky Territory". The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Butovets E.S., Danilenko I.N., Kraskovskaya N.A. Evaluation of grain yield and quality in maize hybrids of various origin under the conditions of Primorsky Territory. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):32-40. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-32-40

Введение

Кукуруза – одна из наиболее распространенных культур в мире (Buldykova, Sheudzhen, 2014; Torikov et al., 2019; Akhiyarov et al., 2020). Она обладает универсальностью применения и широко используется в пищевой (производство крупы, муки, кукурузных хлопьев, хлеба, блинов, попкорна, крахмала, патоки, пищевого масла, детского питания), сельскохозяйственной (заготовка силоса и зеленая подкормка животным), спиртовой (производство биоэтанола), медицинской и косметической промышленности (Volchanskaya et al., 2016; Shazzo et al., 2011; Kuzmenkova, Krikunova, 2012; Shtanchaev et al., 2007).

В современном сельскохозяйственном производстве Приморского края в группе зерновых культур первое место по урожайности занимает кукуруза, которую выращивают как на зерно, так и на силос. Сельхозпроизводители Приморского края собрали в 2020 г. 297 тыс. тонн зерна кукурузы, что на 2,4% больше, чем годом ранее. В дальнейшем прогнозируется увеличить валовой сбор зерна кукурузы до 1 млн тонн. В связи с этим нужно отметить экономическую целесообразность возделывания кукурузы на зерно в Приморье. Для достижения поставленных задач актуален подбор гибридов кукурузы с высокой урожайностью зерна и низкой уборочной влажностью, устойчивых к стрессовым факторам среды, которые лимитируют формирование потенциальной продуктивности (Ward et al., 2016; Panfilov, 2018).

Цель исследований – оценить и выделить гибриды кукурузы различного эколого-географического происхождения по комплексу хозяйственно значимых признаков, содержанию белка и масла в зерне для возделывания на территории Приморского края и использования в селекционной практике в качестве источников ценных показателей.

Материалы и методы

Научная работа выполнялась в 2017–2020 гг. в лаборатории селекции и первичного семеноводства кукурузы Федерального научного центра агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки.

Метеорологические условия 2017 г. (по данным агрометеостанции «Тимирязевский») способствовали реализации генетического потенциала гибридов кукурузы, формированию полноценного зерна восковой спелости. В 2018 г. преобладали периоды избыточного увлажнения: сумма осадков в мае составила 110,9 мм (средне-многолетняя – 51,0), июле – 138,8 мм (средне-многолетняя – 90,0), августе – 347,7 мм (средне-многолетняя – 134,0). Из-за избыточного переувлажнения наблюдалось значительное колебание высоты прикрепления початка, что вызывало потери части урожая при уборке. Благоприятный температурный режим сентября и октября способствовал равномерному наливу и созреванию зерна кукурузы. В 2019 г. сумма осадков в мае составила 77,0 мм (средне-многолетнее – 51,0), августе – 226,5 мм (средне-многолетнее – 134,0). Низкий температурный фон июня и июля, спровоцировал медленное развитие линейного роста главного побега, в результате которого сформировались низкорослые растения и невысокая продуктивность. Погодные условия 2020 г. характеризовались повышенным температурным режимом и периодами избыточного увлажнения в сравнении со средне-многолетней нормой. Так, в июне сумма осадков составила 193,5 мм (средне-многолетнее – 81,0), третьей декаде

августа – 75,6 мм (средне-многолетнее – 45,0), сентябре – 129,2 мм (средне-многолетнее – 104,0). В остальные летние периоды (июль, первая и вторая декада августа) значения количества осадков текущего года незначительно были выше/ниже (варьирование от 15,6 до 48,4 мм) многолетних учетов (варьирование от 29,0 до 46,0 мм). Благоприятное сочетание влаги и тепла способствовало активному росту и развитию кукурузы, что позитивно отозвалось на урожайности культуры.

Почва опытного участка лугово-бурая отбеленная, по механическому составу – тяжелый суглинок, что является оптимальным условием для выращивания кукурузы (Kostenkov et al., 2006).

В качестве объектов изучения взяты гибриды кукурузы зернового использования, различные по происхождению и группе спелости. Стандартом являлась средне-спелая гибридная популяция ‘Славянка’, допущенная к использованию по Дальневосточной зоне.

Возделывание кукурузы проводилось по общепринятой агротехнике в Приморском крае: ширина междурядий – 70 см, норма высева семян – 70 тыс. растений/га (Chaika, 2001). Повторность опыта экологического испытания трехкратная, рендомизированное расположение делянок, площадь делянки – 28 м². Согласно методике, осуществляли закладку полевого опыта (Dospikhov, 2012). Посев и уборка кукурузы производились вручную.

В течение вегетации кукурузы в опыте осуществляли учет общей оценки состояния образца, выравнивания по высоте, полеганию, густоте стояния. Фенологические наблюдения, полевую оценку растений, учеты по ценным хозяйственным признакам проводили согласно методическим рекомендациям (Shmaraev, Matveeva, 1985; Guidelines for maize..., 1982). Число ФАО гибридов определяли по методике А. Э. Панфилова (Panfilov, 2004).

Уборочную влажность зерна образцов кукурузы определяли на анализаторе влажности «Фармпойнт» (Дания). Содержание в зерне кукурузы белка и масла определялось лабораторией агрохимических анализов научного центра на приборе Inframatic 9200 (Perten Instruments AB, Швеция).

Методами дисперсионного и парного корреляционного анализов с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel проводили статистическую обработку результатов (Dospikhov, 2012).

По методике рассчитана интегральная (многокритериальная) оценка гибридов кукурузы испытания (Martyupov, 1987). При задании идеала руководствовались следующими параметрами: по урожайности и количественным признакам желательными являлись наивысшие значения; по влажности зерна соблюдали ограничение снизу (не больше 25%); рассчитаны весовые коэффициенты и стандартное отклонение. Как правило, идеал и весовые коэффициенты задаются исследователем в зависимости от желаемых параметров отбора образца. Ранжирование гибридов происходит относительно идеала (интегральная оценка – это отклонение от идеала). Тестируемый образец с минимальной оценкой является лучшим.

Результаты

Испытание 22 гибридов кукурузы различного происхождения проводилось в экологическом питомнике по семи признакам (табл. 1).

По урожайности пять гибридов кукурузы превысили стандарт ‘Славянка’ (4,4 т/га) более чем на 100% –

Таблица 1. Характеристика и интегральная оценка гибридов кукурузы различного происхождения, 2017–2020 гг.**Table 1.** Description and integrated assessment of maize hybrids differing in their origin, 2017–2020

Гибрид	Урожайность, т/га	Влажность зерна, %	Масса 1000 зерен, г	Масса одного початка, г	Высота растений, см	Высота прикрепления нижнего початка, см	Выход зерна, %	Интегральная оценка
ФНЦ агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки (Россия, Приморский край)								
Славянка, стандарт	4,4	28,3	240,0	143,5	243,6	77,9	85,2	1,8
ВНИИ кукурузы (Россия, Ставропольский край)								
Байкал	5,8	25,6	237,2	135,6	214,2	62,6	83,9	-1,8
НУР	3,1	22,4	218,6	90,7	204,2	62,0	84,6	2,9
ДВНИИСХ (Россия, Хабаровский край)								
Бирсу	3,8	25,9	246,4	114,5	200,8	63,0	82,2	3,5
НПО «Семеноводство Кубани» (Россия, Краснодарский край)								
Ладожский 175 МВ	6,5	29,7	270,6	154,3	211,5	62,6	85,9	-0,9
Ладожский 250	7,4	30,4	241,0	155,2	205,3	63,8	85,7	0,4
Ладожский 181 МВ	5,2	34,6	252,1	151,5	211,5	65,6	85,6	2,9
ООО НПО «Кос-Маис» (Россия, Краснодарский край)								
КС 178 СВ	6,0	28,3	251,7	162,2	257,7	100,2	87,5	-3,9
Компания Pioneer (США)								
P 7709	7,0	24,5	271,6	147,7	214,2	71,2	86,3	-4,7
P 8688	8,3	27,7	284,9	167,5	248,1	84,6	87,0	-4,6
P 8523	8,1	27,3	265,1	166,9	237,7	90,2	87,7	-4,5
P 8816	8,2	28,6	265,6	161,1	249,3	89,1	88,9	-3,9
P 7054	7,0	26,0	259,4	141,3	175,1	66,7	86,8	-2,6
P 9074	9,4	31,2	276,3	191,1	254,6	81,7	85,3	-2,3
P 9175	8,6	34,3	319,6	201,1	258,5	80,4	87,3	-2,2
P 8400	8,5	30,9	274,5	166,2	225,4	77,2	88,1	-1,8
P 8451	8,0	32,7	207,9	163,6	255,2	86,4	87,4	0,8
P 9241	8,9	35,1	269,2	190,1	260,2	64,3	86,0	0,9

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

Гибрид	Урожайность, т/га	Влажность зерна, %	Масса 1000 зерен, г	Масса одного початка, г	Высота растений, см	Высота прикрепления нижнего початка, см	Выход зерна, %	Интегральная оценка
Компания Syngenta (Китай)								
Си Ротанго	7,8	26,4	267,7	154,6	242,3	78,8	87,2	-4,4
НК Гитаго	7,9	29,3	279,7	163,3	246,7	83,3	86,9	-3,2
Си Новатоп	9,0	28,7	278,9	147,2	208,3	71,7	86,2	-2,0
НК Фалькон	8,8	29,2	217,0	163,4	244,0	77,0	87,0	-1,3
Делитоп	8,9	33,5	280,5	161,8	251,0	83,9	87,9	-0,6
НСР _{0,05}	2,5	5,1	41,0	44,3	33,1	15,2	2,6	
Стандарт. откл.	1,8	3,4	25,3	23,3	23,9	10,8	1,5	
Весовые коэф.	2,275	-2,275	0,7	0,7	0,35	0,35	0,35	
(Модель) Идеал сорта	7,0	25	200	130	180	60	82	

НК Фалькон, Делитоп, Си Новатоп, Р 9074 и Р 9241. Относительно низкой уборочной влажностью зерна характеризовались два образца – НУР и Р 7709 (до 25%). Показатель массы 1000 зерен варьировал от 217 до 319,6 г. Наибольшие значения по массе 1000 зерен и одного початка, высоте растений отмечено у гибрида Р 9175.

Выявление перспективного образца обособленно по отдельному признаку исключает возможность учета одновременной совокупности всех показателей. Поэтому для всесторонней полной оценки гибридов кукурузы по комплексу хозяйственных признаков использовали многокритериальный метод (Martynov, 1987).

Лучшую интегральную оценку по комплексу признаков в испытании имеют 16 образцов кукурузы (от -4,7 до -0,6, то есть показатели выше идеала). Самые лучшие интегральные оценки были у гибридов – Р 7709, Р 8688 и Р 8523 (компания Pioneer), Си Ротанго (компания Syngenta).

Гибрид Р 9241, превосходящий стандарт 'Славянка' по урожайности на 4,5 т/га и «модель» – на 1,9 т/га, занял в ранге 19-е место, так как один из ценных показателей для кукурузы «влажность зерна при уборке» превысил параметр идеала в 1,4 раза.

Согласно ранжированию, в результате применения многокритериального анализа гибриды Ладожский 181 МВ, НУР, 'Бирсу' будут исключены из тестирования в экологическом питомнике, потому как их интегральная оценка (более 2,9) ниже стандарта 'Славянка' (1,8). Данные гибриды в дальнейшем будут включены в селекционный процесс как источники хозяйственно значимых признаков – раннеспелости (ФАО составляет от 150 до 180) и низкой уборочной влажности зерна (НУР).

Накопление и формирование биохимического состава зерна кукурузы происходит в результате сложных процессов метаболизма в растениях, сформированных под действием факторов внешней среды и реализации потенциала генотипа культуры (Kravchenko et al., 2016). Для выявления воздействия климатического фактора на массовую долю белка и масла в зерне использовали гидротермический коэффициент (ГТК), характеризующий среднее состояние термовлагообеспеченности территории в период формирования семени (III декада июля, I и II – августа) (рисунок).

В фазе формирования питательных веществ в зерне кукурузы присутствовали периоды избыточного увлажнения (ГТК 2,9 и 3,1), оказавшие различное влияние на биохимический состав гибридов. Наибольший процент белка был накоплен в 2020 г. при ГТК 1,1; масла – в 2019 г. при самом высоком ГТК за период исследований (3,1). По результатам корреляционного анализа выявлены сильные связи: прямая корреляция ГТК с содержанием масла в зерне ($r = 0,98$) и обратная – с содержанием белка ($r = -0,71$). Можно предположить, что для образования более высокого процента белковости, кукурузе необходимо оптимальное сочетание тепла и влаги в данную фазу развития (ГТК от 1 до 2 – наиболее благоприятное для развития культуры) с отсутствием периодов переувлажнения.

Гибриды кукурузы с наибольшим накоплением белка в зерне (более 10,0%) отмечены в каждой группе происхождения (оригинаторов семян), в том числе и стандарте (табл. 2). Максимальное значение признака присутствовало у гибрида компании Syngenta – Си Ротанго. Более высокой масличностью характеризовались гибриды

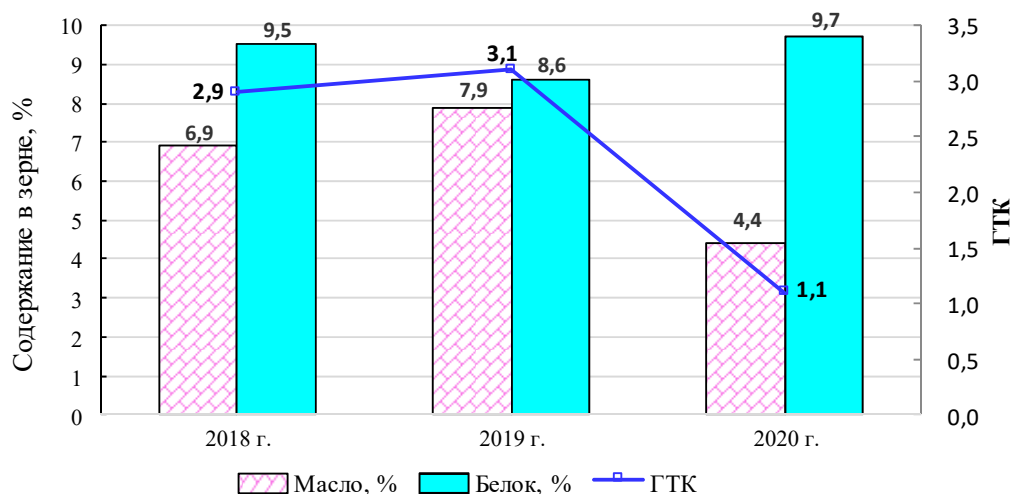


Рисунок. Влияние ГТК на формирование белка и масла в зерне гибридов кукурузы, 2018–2020 гг., Приморский край

Figure. The effect of HTC on the formation of grain protein and oil in maize hybrids, 2018–2020, Primorsky Territory

Таблица 2. Биохимический состав гибридов кукурузы, 2018–2020 гг., Приморский край

Table 2. Biochemical composition of maize hybrids, 2018–2020, Primorsky Territory

Гибрид	Содержание в зерне, %	
	масла	белка
Славянка, стандарт	6,6 ± 1,90	10,0 ± 0,66
Байкал	6,9 ± 1,96	10,1 ± 0,81
НУР	7,0 ± 2,22	9,2 ± 2,40
Бирсу	5,0 ± 1,51	10,1 ± 1,10
Ладожский 175 МВ	6,2 ± 1,71	9,0 ± 0,97
Ладожский 250 МВ	5,9 ± 1,46	8,5 ± 0,54
Ладожский 181 МВ	7,3 ± 2,01	10,3 ± 1,10
КС 178 СВ	6,7 ± 2,02	9,4 ± 0,96
Р 7709	6,2 ± 1,40	9,7 ± 0,58
Р 8688	5,4 ± 1,33	8,3 ± 0,57
Р 8523	5,8 ± 1,71	8,9 ± 0,61
Р 8816	5,8 ± 1,67	8,4 ± 0,45
Р 7054	7,0 ± 1,74	9,0 ± 0,76
Р 9074	5,7 ± 1,00	10,3 ± 2,00
Р 9175	6,9 ± 2,38	10,0 ± 0,63
Р 8400	6,0 ± 1,49	8,8 ± 0,54
Р 8451	5,7 ± 1,93	8,6 ± 0,78
Р 9241	6,1 ± 2,31	9,2 ± 0,89
Си Ротанго	6,4 ± 1,58	10,4 ± 1,07
НК Гитаго	6,9 ± 2,14	8,6 ± 1,13
Си Новатоп	6,8 ± 2,28	8,0 ± 0,62
НК Фалькон	6,7 ± 1,89	10,0 ± 1,05
Делитоп	6,6 ± 2,10	8,6 ± 0,28
НСР _{0,05}	0,93	0,97

ставропольской (НУР), краснодарской (Ладожский 181 МВ) и американской (Р 7054) селекции. Следует отметить, что сочетание в одном генотипе повышенного содержания белка и масла в зерне имеет Ладожский 181 МВ, который может представлять ценность как сырье для универсального использования при переработке.

Одним из важных показателей культуры является урожайность, которая зависит от генетических особенностей и условий выращивания. По результатам корреляционного анализа выявлены прямые сильные достоверные связи урожайности с массой одного початка и 1000 зерен ($r = 0,69-0,81$), высоты прикрепления нижнего початка с выходом зерна ($r = 0,69$) (табл. 3). Также установлены прямые средние связи между морфологическими признаками и элементами структуры урожая ($r > 0,33$).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции (r) между хозяйственно ценными признаками гибридов кукурузы экологического испытания, 2018–2020 гг., Приморский край

Table 3. Correlation coefficients (r) among important agronomic traits in maize hybrids under multi-environment trials, 2018–2020, Primorsky Territory

Признак	Урожайность, т/га	ФАО	Выход зерна, %
Урожайность, т/га	–	0,59*	0,69*
Влажность зерна, %	0,60*	0,62*	0,38
Масса 1000 зерен, г	0,78**	0,46	0,52
Масса одного початка, г	0,81**	0,63*	0,60*
Высота растений, см	0,56	0,56	0,46
Высота прикрепления нижнего початка, см	0,59*	0,40	0,69*
Содержание в семенах белка, %	–0,32	–0,13	–0,20
Содержание в семенах масла, %	–0,02	–0,21	0,00

Примечание: * – коэффициент корреляции достоверен на одном уровне значимости $p \leq 0,05$;

** – коэффициент корреляции достоверен на двух уровнях значимости ($p \leq 0,05$ и $p \leq 0,001$)

Note: * – the correlation coefficient is statistically significant at the same significance level of $p \leq 0.05$;

** – the correlation coefficient is statistically significant at two significance levels ($p \leq 0.05$ and $p \leq 0.001$)

Обратную слабую связь наблюдали у биохимических показателей с урожайностью, ФАО и выходом зерна ($r < 0,32$), что указывает на сложность сочетания высоких показателей ценных признаков в одном генотипе кукурузы.

Заключение

В результате испытания гибридов кукурузы различного происхождения в условиях Приморского края высшую интегральную оценку по комплексу признаков имеют образцы Р 7709, Р 8688 и Р 8523 (компания Pioneer), Си Ротанго (компания Syngenta). Наибольший процент накопления белка в зерне происходит при оптимальном сочетании тепла и влаги (ГТК 1,1); масла – при повышенном уровне влагообеспеченности почвы (ГТК 3,1). Максимальное содержание белка отмечено у гибрида Си Ротанго, масла – НУР, Ладожский 181 МВ, Р 7054. По результатам корреляционного анализа выявлены прямые сильные достоверные связи урожайности с массой

одного початка и 1000 зерен ($r = 0,69-0,81$), высоты прикрепления нижнего початка с выходом зерна ($r = 0,69$). Обратную слабую связь наблюдали у биохимических показателей с урожайностью, ФАО и выходом зерна.

References / Литература

Akhiyarov B.G., Sotchenko B.N., Abdulvaleev R.R., Valitov A.V., Akhiyarova L.M. Formation of crop hybrid crops in the conditions of the Republic of Bashkortostan. *Perm Agrarian Journal*. 2020;1(29):28-37. [in Russian] (Ахияров Б.Г., Сотченко Б.Н., Абдулвалеев Р.Р., Валитов А.В., Ахиярова Л.М. Формирование урожая гибридов кукурузы в условиях Республики Башкортостан. *Пермский аграрный вестник*. 2020;1(29):28-37). DOI: 10.24411/2307-2873-2020-10011

Buldykova I.A., Sheudzhen A.H. Influence of microfertilizers on productivity and quality of corn. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;(98):632-644. [in Russian] (Булдыкова И.А., Шеуджен А.Х. Влияние микроудобрений на урожайность и качество зерна кукурузы. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2014;(98):632-644).

Chaika A.K. (ed.). The agro-industrial production management system in Primorsky Territory (Sistema vedeniya agropromyshlennogo proizvodstva Primorskogo kraja). Novosibirsk; 2001. [in Russian] (Система ведения агропромышленного производства Приморского края / под ред. А.К. Чайки. Новосибирск; 2001).

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: Kniga po trebovaniyu; 2012. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого

- опыта с основами статистической обработки результатов исследований. Москва: Книга по требованию; 2012).
- Guidelines for maize breeding (Metodicheskiye ukazaniya po selektsii kukuruzy). Moscow; 1982. [in Russian] (Методические указания по селекции кукурузы. Москва; 1982).
- Kostenkov N.M., Oznobikhin V.I. Soils and soil resources in the southern Far East and their assessment. *Eurasian Soil Science*. 2006;39(5):461-469. DOI: 10.1134/S1064229306050012
- Kravchenko N.S., Ignatieva N.G., Ionova E.V. The effect of hydrothermal conditions on the quality of winter soft wheat grain. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2016;3(7):71-79. [in Russian] (Кравченко Н.С., Игнатъева Н.Г., Ионова Е.В. Влияние гидротермических условий на качество зерна озимой мягкой пшеницы. *Таврический вестник аграрной науки*. 2016;3(7):71-79).
- Kuzmenkova N.M., Krikunova L.N. Influence of hydrothermal processing mode on rheological characteristics of maize grain. *Izvestiya VUZov. Food Technology*. 2012;5-6(329-330):78-81. [in Russian] (Кузьменкова Н.М., Крикунова Л.Н. Влияние режима гидротермической обработки на реологические характеристики зерна кукурузы. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2012;5-6(329-330):78-81).
- Martynov S.P. Method of multi-criteria breeding of plants. *Agricultural Biology*. 1987;22(6):122-124. [in Russian] (Мартынов С.П. Метод многокритериального выбора на заключительном этапе селекции растений. *Сельскохозяйственная биология*. 1987;22(6):122-124).
- Panfilov A.E. Moisture of maize grain as a function of the genotype, time and hydrothermal conditions (Vlazhnost zerna kukuruzy kak funktsiya genotipa, vremeni i gidrotermicheskikh usloviy). In: *Problems of the Agricultural Sector of the Southern Ural Region and Their Solutions. Proceedings of the Scientific Conference; January 28–29, 2004; Chelyabinsk, Russia (Materialy nauchnoy konferentsii "Problemy agrarnogo sektora Yuzhnogo Urala i puti ikh resheniya"; 28–29 yanvarya 2004 g.; Chelyabinsk, Rossiya)*. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Agrarian Engineering University; 2004. p.35-49. [in Russian] (Панфилов А.Э. Влажность зерна кукурузы как функция генотипа, времени и гидротермических условий. В кн.: *Материалы научной конференции «Проблемы аграрного сектора Южного Урала и пути их решения»; 28-29 января 2004 г.; Челябинск, Россия*. Челябинск: Челябинский государственный аграрно-технический университет; 2004. С.35-49).
- Panfilov A.E., Sotchenko V.S., Gorbacheva A.G., Vetoshkina I.A., Kazakova N.I. Dynamics of moisture loss of corn grain of ultra-early corn hybrids in contrast conditions of growth. *Kukuruza i sorgo = Maize and Sorghum*. 2018;(3):3-9. [in Russian] (Панфилов А.Э., Сотченко В.С., Горбачева А.Г., Ветошкина И.А., Казакова Н.И. Динамика потери влаги кукурузы ультраранних гибридов кукурузы в контрастных условиях произрастания. *Кукуруза и sorgo*. 2018;(3):3-9).
- Shazzo A.A., Butina E.A., Gerasimenko E.O. Existing and prospective trends of complex corn seed processing. *New Technologies*. 2011;(2):54-58. [in Russian] (Шаззо А.А., Бутина Е.А., Герасименко Е.О. Существующие и перспективные направления комплексной переработки зерна кукурузы. *Новые технологии*. 2011;(2):54-58).
- Shmaraev G.E., Matveeva G.V. Study and maintenance of the maize collection accessions. Guidelines (Izucheniye i podderzhanie obraztsov kollektzii kukuruzy. Metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Шмараев Г.Е., Матвеева Г.В. Изучение и поддержание образцов коллекции кукурузы. Методические указания. Ленинград: ВИР; 1985).
- Shtanchaev A.Sh., Nasriddinov A.S., Teshaeв Kh.I., Muhidinov Z.K., Khalikov D.Kh. Turbidimetric titration of corn zein. *Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan*. 2007;50(9-10):748-752. [in Russian] (Штанчаев А.Ш., Насриддинов А.С., Тешаев Х.И., Мухидинов З.К., Халиков Д.Х. Турбидиметрическое титрование зерна кукурузной муки. *Доклады Национальной академии наук Таджикистана*. 2007;50(9-10):748-752).
- Torikov V.E., Dronov A.V., Torikov V.V., Osipov A.A., Lantsev V.V. Value of corn, sorghum crops and their productivity depending on cultivation methods. *VESTNIK of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2019;5(75):15-22. [in Russian] (Ториков В.Е., Дронов А.В., Ториков В.В., Осипов А.А., Ланцев В.В. Ценность кукурузы, сорговых культур и их урожайность в зависимости от приемов выращивания. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019;5(75):15-22).
- Volchanskaya A.A., Konareva V.R., Alenikova Yu.B. Chemical composition of different maize hybrids (Khimicheskiy sostav razlichnykh gibridov kukuruzy). *Molodoy ucheny = Young Scientist*. 2016;13(117):914-916. [in Russian] (Волчанская А.А., Конарева В.Р., Аленикова Ю.Б. Химический состав различных гибридов кукурузы. *Молодой ученый*. 2016;13(117):914-916).
- Ward J.K., Henry W.B., Nock M.W. Variability in harvest moisture and dry-down in multi-hybrid planting systems. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2016;59(5):1111-1115. DOI: 10.13031/trans.59.11572

Информация об авторах

Екатерина Сергеевна Бутовец, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. зав. лабораторией, Федеральный научный центр агроботехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, otdelsoy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2879-3570>

Ирина Николаевна Даниленко, младший научный сотрудник, Федеральный научный центр агроботехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, ira.danilenko.8787@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9462-3473>

Наталья Александровна Красковская, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр агроботехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, fe.smc_rf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1639-3916>

Information about the authors

Ekaterina S. Butovets, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Laboratory, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settle., Ussuriysk 692539, Russia, otdelsoy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2879-3570>

Irina N. Danilenko, Associate Researcher, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settle., Ussuriysk 692539, Russia, ira.danilenko.8787@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9462-3473>

Natalya A. Kraskovskaya, Cand. Sci. (Agriculture), 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, fe.smc_rf@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1639-3916>

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 27.04.2023; одобрена после рецензирования 16.08.2023; принята к публикации 04.09.2023.
The article was submitted on 27.04.2023; approved after reviewing on 16.08.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 633.111.1;631.527.52; 631.524.84; 631.524.85

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-41-50



Изучение эффекта гетерозиса и прогноз перспективности гибридных популяций яровой пшеницы в селекции на продуктивность и засухоустойчивость

Л. В. Волкова, О. С. Амунова

Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Киров, Россия

Автор, ответственный за переписку: Людмила Владиславовна Волкова, volkovkirov@mail.ru

Актуальность. В комбинационной селекции большой практический интерес представляет информация об уровне гетерозиса у гибридов яровой пшеницы по признакам продуктивности и устойчивости к засухе, а также возможность сохранения высоких значений признаков в более поздних поколениях.

Материалы и методы. В Федеральном аграрном научном центре Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров) изучено 16 гибридных популяций $F_1 \dots F_4$ и восемь родительских сортов яровой мягкой пшеницы по признакам продуктивности (полевой опыт) и засухоустойчивости (лабораторный опыт). Тип наследования признаков определен с помощью показателя «степень фенотипического доминирования» (h_p). Статистическая обработка результатов проведена с помощью корреляционного и дисперсионного анализов.

Результаты. Гибриды, проявившие гетерозис в F_1 по числу зерен с колоса, числу зародышевых корней в стрессовых условиях и сухой массе проростков, имели преимущество по этим показателям в поколениях $F_3 \dots F_4$. Тип наследования массы 1000 зерен не определял уровень признака у гибридов старших генераций. Значимая отрицательная корреляция между числом зародышевых корней, сформированных при засухе, и урожаем зерна свидетельствует о трудности сочетания устойчивости и продуктивности в одном генотипе. Масса проростка в стрессовых условиях была положительно связана с полевой продуктивностью гибридов. Выделено семь перспективных комбинаций, сочетающих продуктивность и засухоустойчивость, большинство из которых проявили гетерозис одновременно по пяти признакам.

Заключение. Анализ гибридов ранних поколений по степени фенотипического доминирования количества зерен в колосе, числа зародышевых корней и сухой массе проростка может быть достаточно информативным для использования в селекционных программах.

Ключевые слова: гибридная комбинация, степень доминирования, число зерен с колоса, масса 1000 зерен, число зародышевых корней, масса проростка

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (тема № 2025-0007).

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела эдафической устойчивости растений ФАНЦ Северо-Востока за содействие в проведении лабораторного изучения засухоустойчивости генотипов яровой мягкой пшеницы.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Волкова Л.В., Амунова О.С. Изучение эффекта гетерозиса и прогноз перспективности гибридных популяций яровой пшеницы в селекции на продуктивность и засухоустойчивость. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):41-50. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-41-50

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-41-50

Studying the effect of heterosis and predicting the prospects of hybrid spring wheat populations in breeding for productivity and drought resistance

Lyudmila V. Volkova, Oksana S. Amunova

*Federal Agricultural Research Centre of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia***Corresponding author:** Lyudmila V. Volkova, volkovkirov@mail.ru

Background. In combination breeding, information about the degree of superiority of hybrids in productivity and drought resistance over their parents in early generations, as well as the possibility of preserving their advantages in subsequent generations, are of great practical interest.

Materials and methods. In 2018–2021, 16 hybrid populations of spring bread wheat of the 1st through 4th generations, obtained from intraspecific crosses among parent cultivars, were studied at the Federal Agricultural Research Center of the North-East. The hybrids and their parents were tested in the field for productivity and in the laboratory for drought resistance. Inheritance types were determined by the degree of phenotypic dominance of plant characters. Statistical processing of the results was carried out using correlation and variance analyses.

Results. Hybrids that demonstrated heterosis in the number of grains per ear had an advantage on this basis in subsequent generations. The inheritance type of the 1000 grain weight did not determine the level of this character in older generation hybrids. There was a change in the type of inheritance for the number of radicles during the transition from normal to stressful conditions. Hybrids that showed heterosis in seedling weight in the control and the experiment were distinguished by higher rates in subsequent generations. A significant negative correlation was found between grain yield and the number of radicles formed with a lack of moisture, and a positive correlation between grain yield and the weight of seedlings. Seven promising hybrid combinations fusing productivity with drought resistance were identified.

Conclusion. The analysis of hybrids from early generations according to the degree of phenotypic dominance of the number of grains per ear and number of radicles in the experiment, and the weight of seedlings in the control and the experiment can be quite informative for use in breeding programs.

Keywords: hybrid combination, degree of dominance, number of grains per ear, 1000 grain weight, number of radicles, seedling weight

Acknowledgements: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state task assigned to the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky (theme No. 2025-0007).

The authors express their gratitude to the staff of the Department of Edaphic Plant Resistance for their assistance in conducting the laboratory study of drought resistance in spring bread wheat genotypes.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Volkova L.V., Amunova O.S. Studying the effect of heterosis and predicting the prospects of hybrid spring wheat populations in breeding for productivity and drought resistance. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):41-50. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-41-50

Введение

Пшеница является основной продовольственной культурой, которая занимает центральное место в торговле зерновыми и первое место по потреблению в мире (Zimnyakov et al., 2020). Этой культуре нет равных по ареалу возделывания и способности адаптироваться к различным почвенно-климатическим условиям, и повышение способности растений переносить недостаточную влагообеспеченность имеет огромное значение для сельскохозяйственного производства.

В целях увеличения урожайности и засухоустойчивости растений разработаны современные стратегии и методы (генная инженерия, молекулярное картирование, анализ QTL), но их использование имеет некоторые ограничения из-за взаимодействия «генотип – среда», разнообразия приспособительных реакций растений к водному стрессу, недостаточной информации о генетическом контроле количественных признаков и т. д. (Nezhadahmadi et al., 2013). Методы традиционной селекции, основанные на феноменологических подходах, несмотря на трудоемкость и многозатратность, до сих пор остаются востребованными, поскольку позволяют решать задачу улучшения сложных полигенных признаков. Однако эффективность селекции, основанной на внутривидовой гибридизации, может быть ограничена низким генетическим разнообразием используемого материала, случайным комбинированием генов и непредсказуемостью результатов скрещивания, необходимостью отделения желательных признаков от нежелательных в течение многих лет. Поэтому очень важно владеть точными и быстрыми методами оценки селекционной ценности вновь созданных гибридных популяций в ранних поколениях.

Гетерозис – мощный инструмент повышения урожайности некоторых культур (кукуруза, рис, сорго, хлопок и др.), однако его генетическая основа до конца не изучена. Гетерозис определяется как превосходящая производительность гибрида первого поколения по сравнению со средним родительским показателем (Lin et al., 2020). Селекционеры пшеницы в основном не могут напрямую воспользоваться преимуществами этой технологии из-за сложного контроля опыления и производства семян, а также невозможности доведения урожайности до коммерческого уровня. Накоплены многочисленные данные о том, что высокий уровень гетерозиса в первом гибридном поколении повышает эффективность отборов в более поздних поколениях (Knysh, Norik, 1978; Gowda et al., 2012; Kosenko, Krivobochechek, 2017; Kalhoro et al., 2015; Shamsabadi et al., 2019). Показана важность его оценки и в условиях водного стресса (Subhani et al., 2000; Panhwar et al., 2022). Однако и по этому вопросу существуют некоторые разночтения (Lepikhov, 2017). Сведения о степени превосходства гибридов над родителями, а также их способности к сохранению преимущества в последующих поколениях представляют большой практический интерес в комбинационной селекции.

Лабораторный скрининг проростков, в первую очередь корневой системы, в строго контролируемых условиях является быстрым, воспроизводимым и надежным способом отбора засухоустойчивых генотипов, поскольку может коррелировать с признаками на более зрелых стадиях (Watt et al., 2013; Koshkin, 2017). Полевые исследования, в свою очередь, помогают решить задачу идентификации гибридных комбинаций, сочетающих устойчивость к засухе с высокой продуктивностью.

Цель исследования – на основе изучения гибридного материала яровой мягкой пшеницы определить прогностическую ценность показателя «степень фенотипического доминирования» (hp) в селекции на продуктивность и потенциальную устойчивость к засухе, выявить сходимость лабораторных и полевых оценок.

Материалы и методы

Настоящее исследование проводили в ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого» (ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров). Изучали 16 гибридных популяций яровой мягкой пшеницы первого – четвертого поколений, полученных методом топкроссных скрещиваний от восьми родителей: 'Симбирцит', 'Эритроспермум 2945', 'Воронежская 8' (Россия) и 'Карабалыкская 91' (Казахстан) – материнские формы; 'Jahuara F-77' (Мексика), 'NOS Noriko' (Германия), 'Kitt' (США) и 'Klein Vencedor' (Аргентина) – отцовские формы. Гибридизацию проводили в 2017 г., в 2018–2021 гг. родительские сорта и гибриды $F_1...F_4$ выращивали на делянках площадью 0,5 м² с нормой высева 300 всхожих зерен/1 м², применяя общепринятую технологию возделывания. Уборку осуществляли вручную с подсчетом количества зерен с колоса, массы 1000 зерен и массы зерна с делянки. Оценку уровня засухоустойчивости родительских сортов и гибридных популяций каждого поколения проводили лабораторным способом в фазу проростков (2019–2021 гг.) в соответствии с методическими указаниями ВИР (Kozhushko, Volkova, 1982). Семена (выборка – 90 шт.) проращивали в чашках Петри в термостате при температуре 21–23°C на двух фонах: контроль (дистиллированная вода) и опыт (раствор сахаразы концентрацией 74,45 г/л, что соответствует осмотическому давлению 9 атм.) в трехкратной повторности. На седьмые сутки определяли морфометрические параметры развития проростка: число зародышевых корней и массу сухого вещества. Степень фенотипического доминирования (hp) изучаемых признаков определяли по формуле К. Mather и J. L. Jinks (1985):

$$hp = 2(F-P_{cp})/P_l - P_x,$$

где F – среднее значение абсолютных величин гибрида;

P_{cp} – среднее значение абсолютных величин родителей;

P_l и P_x – среднее значение лучшего и худшего родителей.

Значения $hp < -1$ соответствовали гибридной депрессии (отрицательное сверхдоминирование); $-1 < hp < 1$ – промежуточному наследованию, вызванному аддитивными эффектами генов; $hp > 1$ – гетерозису (положительное сверхдоминирование) признаков. Оценку различий между генотипами проводили на основании дисперсионного анализа.

Результаты и обсуждение

Поскольку в комбинационной селекции наиболее трудной задачей является сочетание сложных полигенных признаков (продуктивность и устойчивость), то при подборе пар использовали сорта с большим генетическим разнообразием в попытке объединить в потомстве положительные свойства и сгладить слабые стороны исходных форм. Считается, что чем выше разница в частоте

генов, обуславливающих дифференциацию между селектуемыми признаками у родителей, тем больше шансов получить перспективные гибриды (Sharma, 2013).

В четырехлетнем полевом опыте материнские формы 'Симбирцит' и 'Воронежская 8' достоверно превышали все отцовские сорта по средним значениям числа зерен с колоса. По массе зерна с деланки сорта 'Эритроспермум 2945' и 'Воронежская 8' показали значимые различия с 'Kitt' и 'Jahuara F-77'. Отцовская форма 'Kitt' характеризовалась самой низкой массой 1000 зерен, достоверно уступая по этому показателю трем материнским сортам, сорт 'NOS Noroko' – двум материнским сортам. Дифференциация между парами родителей также была хорошо выражена по числу зародышевых корней в фазе проростков: 'NOS Noroko' отличался максимальным уровнем признака в контроле, достоверно превысив сорта 'Симбирцит' и 'Воронежская 8'. В опыте значимые различия проявились у одной пары сортов – 'Воронежская 8' и 'Klein Vencedor'. По массе сухого вещества проростков достоверно различались 'Симбирцит' и 'Klein Vencedor', 'Симбирцит' и 'Jahuara F-77' (контроль), 'Воронежская 8' и 'Klein Vencedor' (опыт). Можно констатировать, что максимальная дифференциация по признакам продуктивности проявились у родительских компонентов 'Симбирцит' и 'Kitt', по лабораторным оценкам на засуху – 'Воронежская 8' и 'Klein Vencedor' (табл. 1).

Гетерозис нельзя объяснить влиянием какой-либо одной генетической причиной или каким-либо одним типом взаимодействия генов. Это суммарный фенотипический эффект сходного действия разнородных генетических процессов (Khotyleva et al., 2016). Одним из

наиболее простых и популярных математических методов определения эффекта гетерозиса является определение степени фенотипического доминирования признаков (h_p). Значения $h_p > 1$ по числу зерен с колоса и массы 1000 зерен можно рассматривать как проявление репродуктивного гетерозиса (Boldyreva, Britvin, 2017).

В полевом исследовании число зерен с колоса у большинства гибридов первого поколения (68% комбинаций) наследовалось по типу сверхдоминирования, в 25% комбинаций проявилось промежуточное наследование. Лишь в одной комбинации (Симбирцит × Klein Vencedor) среднее число зерен было значительно ниже, чем у худшего из родителей ($h_p = -66,0$). По массе 1000 зерен процентное соотношение числа гибридных комбинаций с гетерозисом и депрессией было одинаковым (38%), промежуточное наследование наблюдали в 25% случаев (табл. 2).

Число зерен зависит от генетического потенциала продуктивности колоса (длина колоса, число колосков и цветков), масса зерновки – от активности ассимиляционного аппарата и продолжительности формирования зерновки. Эти признаки контролируются разными генетическими системами в определенные фазы онтогенеза и могут быть дополнены удачным комбинированием генов родителей. Выделены пять гибридных комбинаций, проявивших гетерозис сразу по двум признакам продуктивности колоса: Симбирцит × NOS Noroko, Карабалыкская 91 × Jahuara F-77, Эритроспермум 2945 × Jahuara F-77, Эритроспермум 2945 × NOS Noroko и Эритроспермум 2945 × Kitt.

Таблица 1. Средние значения признаков у родительских форм в полевом (2018–2021 гг.) и лабораторном (2019–2021 гг.) опытах, г. Киров

Table 1. Mean values of characters in parental forms in the field (2018–2021) and laboratory (2019–2021) experiments, Kirov

Исходная форма / Original form	Масса зерна с деланки, г / Grain weight per plot, g	Число зерен с колоса, шт. / Number of grains per ear, pcs.	Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	Число зародышевых корней, шт. / Number of radicles, pcs.		Масса сухого вещества проростка, мг / Dry weight of a seedling, mg	
				Контроль / Control	Опыт / Experiment	Контроль / Control	Опыт / Experiment
♀ Симбирцит	144,6	31,0	43,8	4,33	3,36	8,71	3,06
♀ Карабалыкская 91	132,8	25,4	37,8	4,65	3,67	10,50	3,11
♀ Эритроспермум 2945	193,0	26,5	45,7	4,69	3,45	10,59	3,18
♀ Воронежская 8	149,2	31,2	43,1	4,56	3,26	10,39	2,64
♂ Jahuara F-77	83,4	20,0	44,3	4,61	3,91	11,00	3,51
♂ NOS Noroko	146,4	24,0	39,6	4,96	3,61	9,94	3,24
♂ Kitt	76,5	23,3	36,9	4,36	3,51	10,39	2,93
♂ Klein Vencedor	135,6	23,6	42,1	4,36	4,10	11,63	3,89
Среднее в опыте (n = 8) / Mean in the experiment	132,7	25,6	41,7	4,56	3,61	10,39	3,19
F _{факт} НСР ₀₅	3,17* 62,5	4,08* 5,5	7,38* 3,7	3,40* 0,35	2,99* 0,84	2,96* 1,95	3,01* 1,18

Таблица 2. Распределение гибридов по типу наследования количественных признаков в полевых и лабораторных исследованиях (2018–2019 гг., г. Киров)**Table 2. Distribution of hybrids by the types of inheritance of quantitative characters in the field and laboratory studies (2018–2019, Kirov)**

Признак / Character	Тип наследования / Type of inheritance	Значение h_p / The value of h_p	
		Контроль / Control	Опыт / Experiment
Полевой опыт (F_1 по растению, 2018 г.) / Field experiment (F_1 by plant, 2018)			
Число зерен с колоса / Number of grains per ear	Г – гетерозис / heterosis	1,08...27,30 (69)	
	П – промежуточное / intermediate	0,02...0,98 (25)	
	Д – депрессия / depression	–66,0 (6)	
Масса 1000 зерен / 1000 grain weight	Г – гетерозис / heterosis	1,04...2,70 (38)	
	П – промежуточное / intermediate	–0,71...1,00 (25)	
	Д – депрессия / depression	–1,14...–20,8 (38)	
Лабораторный анализ (F_2 по зерну, 2019 г.) / Laboratory analysis (F_2 by grain, 2019)			
Число зародышевых корней / Number of radicles	Г – гетерозис / heterosis	1,51...47,00 (38)	1,69...23,33 (44)
	П – промежуточное / intermediate	–0,59...0,76 (56)	–0,84...0,67 (44)
	Д – депрессия / depression	–1,30 (6)	–4,00...–9,83 (12)
Масса сухого вещества проростка / Dry weight of a seedling	Г – гетерозис / heterosis	1,42...105,0 (88)	1,10...13,27 (56)
	П – промежуточное / intermediate	–0,73...0,57 (12)	–0,51...0,54 (38)
	Д – депрессия / depression	(0)	–1,89 (6)

Примечание: в скобках указана доля гибридных комбинаций с определенным типом наследования, %

Note: parenthesized is the proportion of hybrid combinations with a certain type of inheritance, %

Лабораторный метод оценки устойчивости к водному стрессу (адаптивная селекция) имеет большие перспективы в связи с относительной простотой и возможностью оперировать с большим количеством генотипов. Скрининг проростков на засухоустойчивость у растений F_1 осложняется как недостаточным количеством, так и слабой жизнеспособностью семян (из-под изоляторов), необходимых для проведения полноценных экспериментов, поэтому диагностике подвергали семенной материал, взятый с материнских растений первого поколения (соответственно F_2 по зерну). При сравнении типов наследования числа зародышевых корней в нормальных и стрессовых условиях наблюдали различия как в количестве, так и в качественном составе комбинаций с положительным сверхдоминированием (см. табл. 2). При этом только одна из них – Воронежская 8 × Kitt – сохраняла гетерозис при изменении условий. Гибриды Симбирцит × Jahuara F-77 в контроле наследовали признак по типу отрицательного сверхдоминирования, в условиях водного дефицита – по типу положительного сверхдоминирования, то есть проявили адаптивный гетерозис. В остальных комбинациях при изменении условий наблюдали переход от сверхдоминирования до промежуточного наследования и наоборот.

Преимущество гибридов над исходными формами по накоплению биомассы проростками обусловлено высокой митотической активностью ростовых процессов (соматический гетерозис). Самый высокий уровень соматического гетерозиса наблюдали в контроле (см. табл. 2), при этом доля комбинаций, превосходящих лучшего родителя, достигала 88%. Максимальное значение (h_p =

105,0) было у гибридов Эритроспермум 2945 × NOS Норко. Гибридных комбинаций с депрессией по массе проростков в контроле не обнаружено. В условиях стресса большинство комбинаций (56%) сохраняли эффект гетерозиса, у остальных проявилось промежуточное наследование. Исключение составили гибриды Карабалыкская 91 × Klein Vencedor, превышающие лучшего родителя по массе проростков в контрольных условиях (h_p = 1,54) и существенно снижающие показатель в условиях опыта (h_p = –1,89).

Таким образом, тип наследования признаков может меняться в зависимости от внешних условий, что подтверждают другие исследователи (Yusov et al., 2012; Khotyleva et al., 2016), подчеркивая важность учета взаимодействия «генотип – среда». В нашем случае влияние лимитирующего фактора (водный дефицит) в большей мере отразилось на характере наследования числа зародышевых корней, тогда как по массе проростков наблюдали однонаправленность эффектов генов, то есть высокогетерозисные гибриды в контроле, как правило, проявляли гетерозис и в опыте.

В селекции самоопылителей основным рабочим материалом являются гомозиготные линии более поздних генераций, когда эффект гетерозиса затихает. Отборы из тех гибридных популяций, которые были выделены по уровню h_p , могут быть эффективны только в том случае, если они сохраняют свои преимущества в последующих поколениях. В связи с этим изучение возможности прогноза селекционной ценности комбинаций, исходя из типов наследования признаков в F_1 , представляют большой практический интерес. На рисунке показана измен-

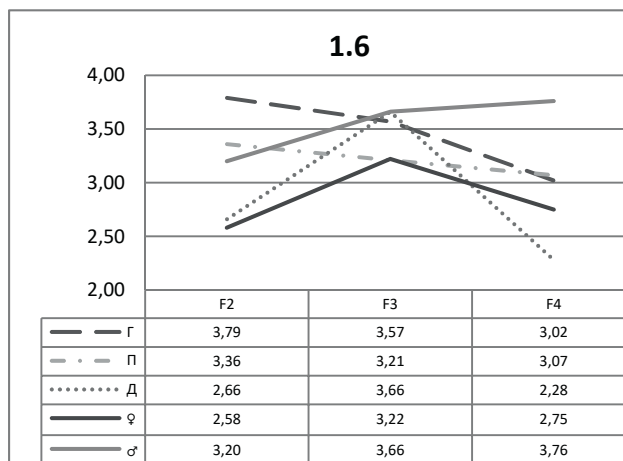
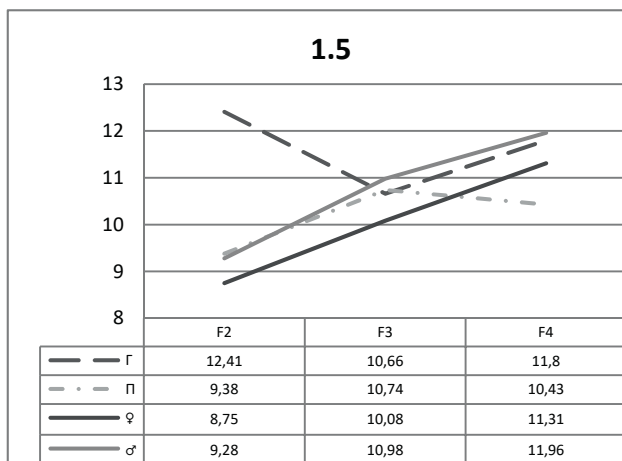
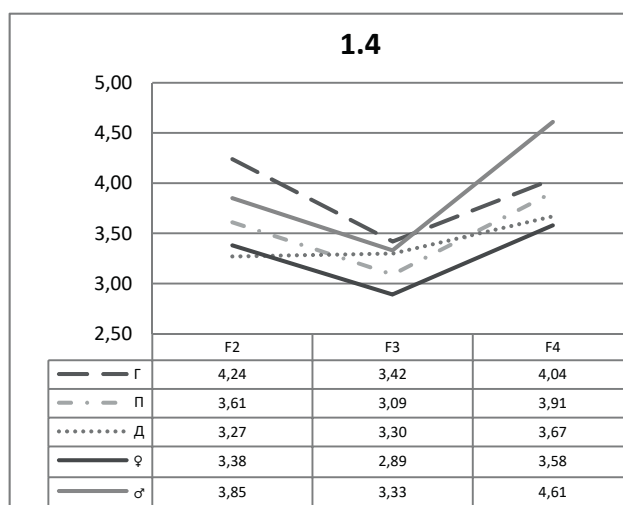
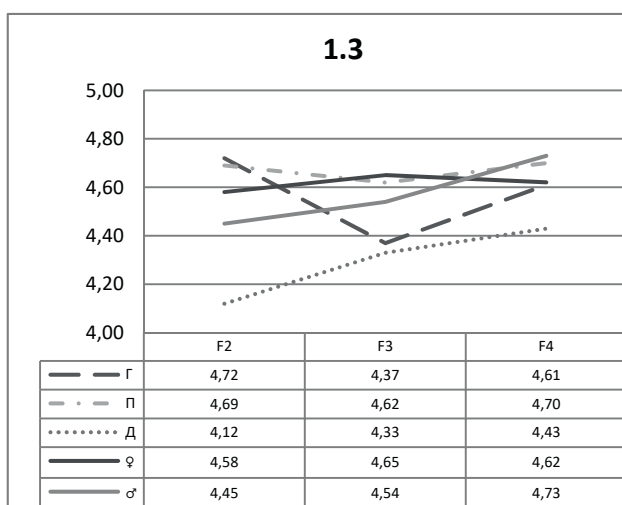
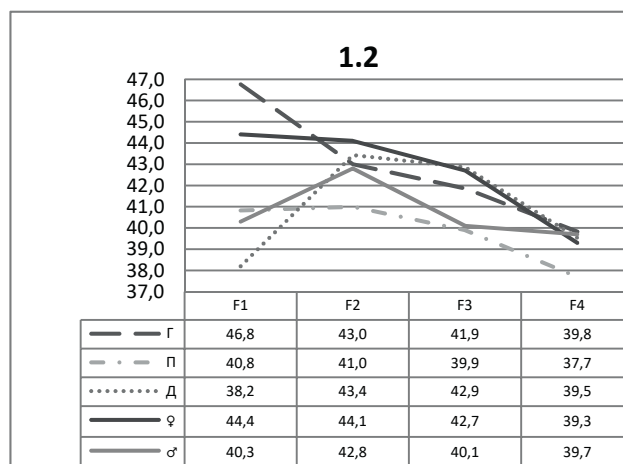
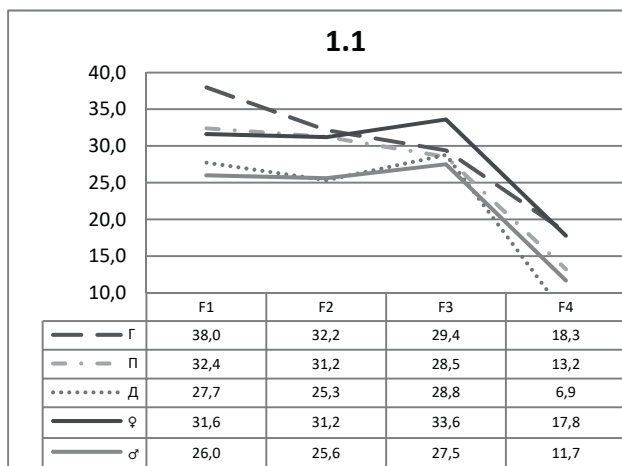


Рисунок. Динамика изменчивости признаков в гибридных поколениях F₁...F₄ при разном типе наследования:

1.1 – число зерен с колоса, шт.; **1.2** – масса 1000 зерен, г; **1.3** – число зародышевых корней в контроле, шт.;

1.4 – число зародышевых корней в опыте, шт.; **1.5** – сухая масса проростков в контроле, мг;

1.6 – сухая масса проростков в опыте, мг (условные обозначения: Г – гетерозис ($hp > 1,0$); П – промежуточное наследование ($1,0 < hp < 1,0$); Д – депрессия ($hp < -1,0$); ♀ – материнские формы; ♂ – отцовские формы

Figure. Variability dynamics of characters in F₁...F₄ hybrid generations with different types of inheritance:

1.1 – number of grains per ear, pcs.; **1.2** – 1000 grain weight, g; **1.3** – number of radicles in the control, pcs.;

1.4 – number of radicles in the experiment, pcs.; **1.5** – dry weight of seedlings in the control, mg; **1.6** – dry weight of seedlings in the experiment, mg (legend: Г – heterosis ($hp > 1.0$); П – intermediate inheritance ($1.0 < hp < 1.0$);

Д – depression ($hp < -1.0$); ♀ – maternal forms; ♂ – paternal forms

чивость среднего уровня изучаемых признаков в ряде поколений в группах гибридов с разной степенью фенотипического доминирования в сравнении с групповыми средними значениями у материнских и отцовских сортов.

Условия вегетации при репродукции растений $F_1...F_3$ (2018–2020 гг.) характеризовались достаточным уровнем увлажненности (ГТК = 2,1–2,5). Рост и развитие поколения F_4 проходили при повышенных среднесуточных температурах и дефиците влаги, особенно в период от посевов до выхода в трубку (ГТК = 0,9–1,4), что отразилось на количественных показателях озерненности колоса. В группе гибридных комбинаций с гетерозисом по числу зерен с колоса, превышающих лучших родителей в среднем на 20%, к третьему поколению происходило закономерное снижение признака, а в четвертом поколении эти гибриды формировали число зерен на уровне материнских форм. В группе генотипов с промежуточным наследованием числа зерен с колоса значения признака были ниже, чем у предыдущей группы, в среднем на 3,1–27,9%, достигая максимального разрыва в стрессовом 2021 г. Гибриды с проявлением депрессии признака в первом поколении отличались минимальным средним значением озерненности колоса в четвертом поколении. Корреляция между показателем hr в F_1 и признаком «число зерен с колоса» в последующие годы варьировала в пределах $r = 0,04–0,33$, усиливаясь в засушливый год. Укрепление взаимосвязей между уровнем гетерозиса и продуктивностью в условиях засушливого стресса отмечено и другими исследователями (Noorka et al., 2013). Связь между hr в F_1 и средним за четыре года уровнем признака принимала средние положительные значения ($r = 0,41$). Таким образом, параметр «степень фенотипического доминирования» числа зерен с колоса в данном случае оказался достаточно информативным для анализа перспективности комбинаций.

Гибридные комбинации, у которых масса 1000 зерен наследовалась по типу сверхдоминирования, в $F_2...F_3$ занимали промежуточное положение между исходными формами, в F_4 сформировали признак на уровне лучшего родителя. Гибриды с промежуточным наследованием характеризовались самыми низкими во все годы значениями массы 1000 зерен. Комбинации с депрессией в дальнейшем не отличались, а в отдельные годы превышали группу гибридов с гетерозисом. Корреляция между hr и абсолютными значениями признака была слабой как в отдельные годы ($r = 0,05–0,20$), так и с четырехлетним средним значением ($r = 0,14$). Можно констатировать, что информация о типе наследования массы 1000 зерен в нашем исследовании не позволила спрогнозировать уровень признака старших генераций гибридов.

По результатам оценки в фазе проростков у гибридных комбинаций со сверхдоминированием числа зародышевых корней в контроле в следующем поколении происходило значительное снижение среднего уровня признака, в четвертом поколении число корней соответствовало значениям материнских форм. Гибриды с промежуточным типом наследования числа корней в контроле сохраняли стабильно высокий уровень признака в ряде поколений, приближаясь к лучшему родителю и превышая в F_3 и F_4 среднее значение первой группы. Комбинации с депрессией числа корней в контроле формировали более низкие значения во все годы изучения.

Под воздействием засухи гибриды с разным типом наследования числа зародышевых корней при достиже-

нии гомозиготного состояния занимали среднее положение между материнскими и отцовскими формами, однако гибриды с гетерозисом имели некоторое преимущество. Корреляция между hr и числом корней в $F_2...F_4$ в нормальных условиях принимала отрицательные значения ($r = -0,03...-0,42$); в стрессовых условиях варьировала от слабых до достоверно положительных значений ($r = 0,08–0,62^*$). Связь между hr и средним генотипическим значением в контроле составила $r = -0,26$, в опыте – $r = 0,45$.

Гибридные комбинации с гетерозисом по массе проростков в контроле по среднему уровню признака в F_4 превосходили комбинации с промежуточным типом наследования на 12%, а в опыте не имели различий с данной группой. Комбинации, характеризующиеся депрессией признака в опыте, к четвертому поколению уступали группе гибридов с гетерозисом и промежуточным наследованием на 26%. Корреляция между показателем hr и массой проростков следующих генераций в контроле варьировала в пределах $r = 0,23–0,32$, в опыте – $r = 0,26–0,43$. Связь между hr и средним генотипическим значением массы проростков в контроле составила $r = 0,40$, в опыте – $r = 0,44$.

В целом можно отметить, что с возрастанием доли гомозигот в гибридных популяциях уменьшается размах изменчивости признаков как в контроле, так и в опыте; гибриды с гетерозисом в первом поколении имеют тенденцию к снижению среднего уровня признака к четвертому поколению, а гибриды с депрессией – к повышению. Тем не менее оценка генотипов по степени фенотипического доминирования признаков «число зерен с колоса», «число зародышевых корней» в опыте, «масса сухого вещества проростков» в контроле и опыте позволила выделить перспективные комбинации.

Эффективность лабораторных методов зависит от того, насколько данные, полученные в контролируемых условиях, в частности развитие корневой системы и общая биомасса в фазу проростков, связаны с полевыми значениями признаков продуктивности на зрелых стадиях развития растений (табл. 3).

Парные корреляции, рассчитанные по массиву трехлетних данных полевых и лабораторных исследований, показывают слабую отрицательную связь числа зародышевых корней в контроле и признаков продуктивности. Корреляция между числом зародышевых корней, сформированных при дефиците влаги, и массой зерна с делянки усиливается до достоверных отрицательных значений как у сортов, так и у гибридов, что свидетельствует о трудности сочетания устойчивости к засухе и продуктивности в одном генотипе. При переходе от нормальных условий прорастивания семян к стрессовым было отмечено переопределение связей между сухой массой проростков и признаками продуктивности. Исходные формы с высокой массой проростков в контроле в полевых условиях характеризовались пониженной озерненностью колоса и урожайностью. У гибридов наблюдалась достоверную положительную корреляцию между массой проростков в условиях стресса и массой зерна с делянки. Параметры проростков и масса 1000 зерен были незначимо связаны между собой.

Конечной целью селекции является получение генотипов с сочетанием высокой полевой продуктивности и потенциальной устойчивости к засухе. Практическим выходом настоящих исследований можно считать семь гибридных комбинаций, перспективных для включения в селекционный процесс (табл. 4).

Таблица 3. Корреляционная связь (r) между лабораторными и полевыми оценками, 2019–2021 гг. (F₂...F₄)
Table 3. Correlations (r) between the laboratory and field assessments, 2019–2021 (F₂...F₄)

Признак / Character	Число зародышевых корней / Number of radicles		Масса сухого вещества проростка / Dry weight of a seedling	
	Контроль / Control	Опыт / Experiment	Контроль / Control	Опыт / Experiment
Число зерен с колоса / Number of grains per ear	-0,22 -0,05	-0,64* -0,28	-0,54* -0,16	-0,16 0,18
Масса 1000 зерен / 1000 grain weight	-0,01 -0,19	-0,04 -0,24	-0,24 -0,16	0,14 0,25
Масса зерна с делянки / Grain weight per plot	0,03 -0,23	-0,45* -0,30*	-0,42* -0,26	-0,04 0,39*

Примечание: верхняя строка – родители (n = 24); нижняя строка – гибриды (n = 48); * – значимо при p ≤ 0,05
 Note: top rows show parents (n = 24); bottom rows show hybrids (n = 48); * – significant at p ≤ 0.05

Таблица 4. Характеристика гибридных комбинаций с сочетанием продуктивности и устойчивости к засухе (средние значения за 2019–2021 гг.)

Table 4. Characteristics of hybrid combinations fusing productivity with drought resistance (mean values for 2019–2021)

Гибридная комбинация / Hybrid combination	Масса зерна с делянки, г / Grain weight per plot, g	Число зерен с колоса, шт. / Number of grains per ear, pcs.	Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	Число зародышевых корней, шт. / Number of radicles, pcs.		Масса сухого вещества проростка, мг / Dry weight of a seedling, mg	
				Контроль / Control	Опыт / Experiment	Контроль / Control	Опыт / Experiment
Симбирцит × Kitt	162,9	27,6 П	41,0 П	4,45 Г	3,48 П	11,38 Г	3,68 Г
Воронежская 8 × Klein Vencedor	160,0	28,7 П	42,6 Д	4,64 П	3,72 П	11,34 Г	3,56 П
Симбирцит × NOS Norko	153,3	29,5 Г	46,5 Г	4,53 П	3,87 Г	10,92 Г	3,90 Г
Карабалыкская 91 × Jahuara F-77	152,4	28,9 Г	39,9 Г	4,72 П	4,05 Г	11,76 Г	3,68 Г
Воронежская 8 × NOS Norko	147,6	30,3 Г	41,2 П	4,71 П	3,94 Г	11,27 Г	4,00 Г
Эритроспермум 2945 × NOS Norko	139,7	25,9 Г	43,1 Г	4,81 П	4,18 Г	12,30 Г	3,75 Г
Воронежская 8 × Kitt	120,6	35,0 Г	38,9 П	4,74 Г	4,09 Г	11,47 Г	3,44 Г
Среднее в опыте (n = 16) / Mean in the experiment	131,3	28,2	41,4	4,60	3,68	11,44	3,32
F _{факт} НСР ₀₅	1,21 –	1,05 –	4,67* 3,3	2,73* 0,27	1,62 –	1,43 –	3,02* 0,78

Примечание: нижняя строка – тип наследования признаков (буквенные обозначения см. табл. 2)
 Note: bottom rows show the type of inheritance (see Table 2 for letter designations)

В отличие от родительских компонентов, у которых сортовая дифференциация хорошо выражена по всем показателям, генотипические различия у гибридов выявлены только по массе 1000 зерен, числу зародышевых корней в контроле и массе проростков в опыте. В таблице 4 показаны перспективные комбинации, которые могут служить материалом для выделения трансгрессивных генотипов. Максимальную урожайность сформировали гибридные комбинации Симбирцит × Kitt и Воронежская 8 × Klein Vencedor, отмеченные нами ранее как наиболее генетически удаленные. Выделены три комбинации, характеризующиеся оптимально высокими значениями изучаемых признаков, отцовским компонентом в которых служил сорт 'NOS Norko', и три комбинации с участием материнской формы 'Воронежская 8. Важно также отметить, что у пяти выделенных комбинаций одновременно проявилось сверхдоминирование по числу зерен с колоса, числу зародышевых корней в опыте, массе проростка в контроле и опыте, то есть наблюдалось сочетание репродуктивного, соматического и адаптивного гетерозиса.

Выводы

По результатам многолетних полевых и лабораторных экспериментов выделены родительские пары с максимальной дифференциацией признаков продуктивности и параметров проростков. Материнские формы, как правило, имели преимущество по количеству зерен с колоса и урожаю с делянки, отцовские – по числу зародышевых корней и массе проростков. Максимальный гетерозисный эффект проявился по массе проростков в контроле (88% гибридов), наибольшее число комбинаций с депрессией выявлено по массе 1000 зерен (38%). В условиях искусственно созданной засухи у большинства комбинаций отмечено изменение типа наследования числа зародышевых корней и сохранение типа наследования массы проростков. Гибриды, проявившие гетерозис по числу зерен с колоса в первом поколении, имели преимущество в четвертом поколении, формируя значение признака на уровне лучшего родителя. Гибриды с наследованием массы 1000 зерен по типу положительного и отрицательного сверхдоминирования в поздних поколениях не имели различий между собой, но превосходили среднее значение группы генотипов с промежуточным наследованием признака. Гибридные комбинации с гетерозисом по числу зародышевых корней и массе проростка при достижении гомозиготности занимали промежуточное положение между исходными формами, превышая на 4–25% группу генотипов с отрицательным сверхдоминированием. Корреляционный анализ показал значимую отрицательную связь между числом зародышевых корней, сформированных при дефиците влаги, и урожаем зерна с делянки. Высокая масса проростка в стрессовых условиях была положительно связана с полевой продуктивностью гибридов. Выделено семь перспективных для селекции гибридных комбинаций с сочетанием продуктивности и устойчивости к засухе, у пяти из которых наблюдали проявление гетерозиса одновременно по пяти изучаемым признакам. Анализ гибридов ранних поколений по степени фенотипического доминирования количества зерен в колосе, числа зародышевых корней в опыте, массе проростка в контроле и опыте может быть достаточно эффективным для использования в селекционных программах.

References / Литература

- Boldyreva L.L., Britvin V.V. Estimation of heterosis by the basic morpho-biological characteristics and properties of F₁ hybrids of grain sorgho. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2017;3(65):225-229. [in Russian] (Болдырева Л.Л., Бритвин В.В. Оценка гетерозиса по основным морфо-биологическим признакам и свойствам у гибридов F₁ сорго зернового. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017;3(65):225-229).
- Gowda M., Longin C.F.H., Lein V., Reif J.C. Relevance of specific versus general combining ability in winter wheat. *Crop Science*. 2012;52(6):2494-2500. DOI: 10.2135/cropsci2012.04.0245
- Kalhor F.A., Rajpar A.A., Kalhor S.A., Mahar A., Ali A., Otho S.A. et al. Heterosis and combining ability in F₁ population of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L.). *American Journal of Plant Sciences*. 2015;6(7):1011-1026. DOI: 10.4236/ajps.2015.67107
- Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V., Shapturenko M.N. Theoretical aspects of heterosis. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(4):482-492. [in Russian] (Хотылева Л.В., Кильчевский А.В., Шаптуренко М.Н. Теоретические аспекты гетерозиса. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(4):482-492). DOI: 10.18699/VJ16.174
- Knysh A.I., Norik I.M. Heterosis of hybrids of the first generation and its influence on the efficiency of selection in the second and older generations of intervarietal hybrids of winter wheat (Geterozis gibridov pervogo pokoleniya i yego vliyanie na effektivnost otbora vo vtorom i starshikh pokoleniyakh mezhsortovykh gibridov ozimoy pshenitsy). In: *Genetics of Quantitative Characters of Agricultural Plants (Genetika kolichestvennykh priznakov sel'skokhozyaystvennykh rasteniy)*. Moscow: Nauka; 1978. p.202-205. [in Russian] (Кныш А.И., Норик И.М. Гетерозис гибридов первого поколения и его влияние на эффективность отбора во втором и старших поколениях межсортовых гибридов озимой пшеницы. В кн.: *Генетика количественных признаков сельскохозяйственных растений*. Москва: Наука; 1978. С.202-205).
- Kosenko S.V., Krivobochek V.G. Combination ability and genetic control of grain mass from plants of winter soft wheat in dialular crops. *The Agrarian Scientific Journal*. 2017;(10):15-19. [in Russian] (Косенко С.В., Кривобочек В.Г. Комбинационная способность и генетический контроль массы зерна с растения озимой мягкой пшеницы в диалельных скрещиваниях. *Аграрный научный журнал*. 2017;(10):15-19).
- Koshkin E.I. Use of root traits in breeding for crop productivity and stress tolerance. *Agricultural Chemistry*. 2017;(7):86-98. [in Russian] (Кошкин Е.И. Использование признаков корневых систем полевых культур в селекции на урожайность и устойчивость к стрессорам. *Агрхимия*. 2017;(7):86-98). DOI: 10.7868/S0002188117070122
- Kozhushko N.N., Volkova A.M. Determination of relative drought resistance and heat resistance of cereal crop (wheat and barley) accessions using the method of seed germination in sucrose solutions and after warming. Guidelines (Opredeleniye otnositelnoy zasukhoustoychivosti i zharostoykosti obraztsov zernovykh kultur (pshenitsa, yachmen) sposobom prorashchivaniya semyan v rastvorakh sakharozy i posle progrevaniya. Metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1982. [in Russian] (Кожушко Н. Н., Волкова А. М. Определение относи-

- тельной засухоустойчивости и жаростойкости образцов зерновых культур (пшеница, ячмень) способом проращивания семян в растворах сахарозы и после прогревания. Методические указания. Ленинград: ВИР; 1982).
- Lepikhov S.B. Methods of choosing parental pairs for crosses in the breeding of self-pollinating crops for yield. *Proceeding on Applied of Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(4):76-89. [in Russian] [Лепехов С.Б. Методы подбора пар для скрещивания в селекции на урожайность у самоопыляющихся культур. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(4):76-89]. DOI: 10.30901/2227-8834-2017-4-76-89
- Lin T., Zhou C., Chen G., Yu J., Wu W., Ge Y. et al. Heterosis-associated genes confer high yield in super hybrid rice. *Theoretical and Applied Genetics*. 2020;133(12):3287-3297. DOI: 10.1007/s00122-020-03669-y
- Mather K., Jinks J.L. Biometrical genetics. Moscow: Mir; 1985. [in Russian] [Мазер К., Джинкс Дж.Л. Биометрическая генетика. Москва: Мир; 1985].
- Nezhadahmadi A., Prodhan Z.H., Faruq G. Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal*. 2013;2013(1):610721. DOI: 10.1155/2013/610721
- Noorka I.R., Batool A., Rauf S., Teixeira da Silva J.A., Ashraf E. Estimation of heterosis in wheat (*Triticum aestivum* L.) under contrasting water regimes. *International Journal of Plant Breeding*. 2013;7(1):55-60.
- Panhwar N.A., Baloch G.M., Soomro Z.A., Sial M.A., Panhwar S.A., Afzal A. et al. Evaluation of heterosis and its association among morpho-physiological traits of ten wheat genotypes under water stress. *Pure and Applied Biology*. 2022;11(3):709-724. DOI: 10.19045/bspab.2022.110072
- Shamsabadi E.E., Sabouri H., Soughi H., Sajadi S.J. Diallel analysis of some important morpho-phenological traits in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) crosses. *Iranian Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2019;8(1):45-54. DOI: 10.30479/IJGPB.2019.11397.1247
- Sharma R. Does low yield heterosis limit commercial hybrids in wheat? *African Journal of Agricultural Research*. 2013;8(50):6663-6669. DOI: 10.5897/AJAR2013.8108
- Subhani Gh.M., Chowdhry M.A., Gilani S.M.M. Manifestation of heterosis in bread wheat under irrigated and drought stress conditions. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 2000;3(6):971-974. DOI: 10.3923/pjbs.2000.971.974
- Watt M., Moosavi S., Cunningham S.C., Kirkegaard J.A., Rebetzke G.J., Richards R.A. A rapid, controlled-environment seedling root screen for wheat correlates well with rooting depths at vegetative, but not reproductive, stages at two field sites. *Annals of Botany*. 2013;112(2):447-455. DOI: 10.1093/aob/mct122
- Yusov V.S., Evdokimov M.G., Tatina B.M. Variability of combining ability in durum wheat depending on growth conditions. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2012;16(2):451-454. [in Russian] [Юсов В.С., Евдокимов М.Г., Татина Б.М. Изменчивость комбинационной способности твердой пшеницы в зависимости от условий выращивания. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2012;16(2):451-454].
- Zimnyakov V.M., Kurochkin A.A., Bogomazov S.V., Varlamova E.N. Wheat production in Russia. *Niva Povolzhya = Cropland of the Volga Basin*. 2020;1(54):15-21. [in Russian] [Зимняков В.М., Курочкин А.А., Богомазов С.В., Варламова Е.Н. Производство пшеницы в России. *Нива Поволжья*. 2020;1(54):15-21]. DOI: 10.36461/NP.2020.54.1.003

Информация об авторах

Людмила Владиславовна Волкова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, volkovkirov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0837-8425>

Оксана Сергеевна Амунова, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, priemnaya@fanc-sv.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8560-840X>

Information about the authors

Lyudmila V. Volkova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Federal Agricultural Research Centre of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, volkovkirov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0837-8425>

Oksana S. Amunova, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Federal Agricultural Research Centre of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, priemnaya@fanc-sv.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8560-840X>

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 18.05.2022; одобрена после рецензирования 19.04.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 18.05.2022; approved after reviewing on 19.04.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
 УДК 633.15:664.25
 DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-51-60



Потенциал продуктивности гибридов кукурузы селекции Национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко для глубокой переработки зерна

В. Г. Гольдштейн¹, А. И. Супрунов², П. М. Богдан³, В. В. Шерстобитов⁴, В. И. Хорева⁵, Л. П. Носовская¹, Л. В. Адикаева¹, Э. Б. Хатефов⁵

¹ Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья, Московская обл., Россия

² Национальный центр зерна им. П.П. Лукьяненко, Краснодар, Россия

³ Федеральный исследовательский центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, Уссурийск, Россия

⁴ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Майкопская опытная станция – филиал ВИР, Майкоп, Россия

⁵ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Эдуард Балилович Хатефов, haed1967@rambler.ru

Актуальность. Технология глубокой переработки зерна основана на применении процессов, обеспечивающих разделение сырья на различные компоненты и последовательную переработку этих компонентов в продукцию высокой потребительской стоимости. Годовой объем продукции глубокой переработки зерна составляет более 100 миллионов тонн. Крахмал, как наиболее ценный компонент перерабатываемого зерна, находит применение в пищевой промышленности, фармацевтике и в значительном количестве в технических целях.

Материал и методика. Материалом для полевых и лабораторных исследований являлись 17 производственных гибридов кукурузы селекции Научного центра зерна им. П.П. Лукьяненко. Содержание в зерновках крахмала и побочной продукции определяли фактическим извлечением нативного крахмала по методу, разработанному во Всероссийском научно-исследовательском институте крахмалопродуктов; селекционные испытания гибридов кукурузы проводили в степной зоне Кабардино-Балкарии в 2020/2021 г.

Результаты. Выделено 13 гибридов с массовой долей крахмала в пределах 70,0–73,2% СВ: КР210МВ, КР270МВ, КР377АМВ, КР385МВ, КР415МВ, РОСС198МВ, КР433МВ, КР514МВ, КР575МВ, ЛЮДМИЛА, РОСС190МВ, РОСС195МВ, КР425МВ. Из них урожайностью зерна в пределах 10–14 т/га характеризовались гибриды КР270МВ, КР315МВ, КР377АМВ, КР415МВ, КР514МВ, КР575МВ. В соответствии с полученными результатами в качестве исходного материала для селекции и перспективного сырья для глубокой переработки зерна могут быть рекомендованы гибриды: КР415МВ, КР393МВ, РОСС198МВ, которые позволяют при переработке извлекать крахмал в пределах 90,0–94,4%, и высокоамилозный гибрид КР315МВ с массовой долей амилозы в крахмале до 38,6% СВ крахмала.

Ключевые слова: кукурузный крахмал, амилопектин, амилоза, глютен, зародыш, мезга, экстрактивные вещества

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 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» и государственного задания согласно тематическому плану ВНИИ крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиала ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха по теме НИР: FGGM-2022-0006 «Разработать научно-практические основы технологии производства новых углеводных и белковых компонентов, извлеченных из крахмалосодержащего сырья на основе системного анализа их состава и свойств для глубокой переработки картофеля, зернового и зернобобового сырья».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Гольдштейн В.Г., Супрунов А.И., Богдан П.М., Шерстобитов В.В., Хорева В.И., Носовская Л.П., Адикаева Л.В., Хатефов Э.Б. Потенциал продуктивности гибридов кукурузы селекции национального центра зерна им. П.П. Лукьяненко для глубокой переработки зерна. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):51-60. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-51-60

© Гольдштейн В.Г., Супрунов А.И., Богдан П.М., Шерстобитов В.В., Хорева В.И., Носовская Л.П., Адикаева Л.В., Хатефов Э.Б., 2023

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-51-60

Productivity potential of maize hybrids developed at the P.P. Lukyanenko National Grain Center for deep grain processing

Vladimir G. Goldshtein¹, Anatoly I. Suprunov², Polina M. Bogdan³, Vasiliy V. Sherstobitov⁴, Valentina I. Khoreva⁵, Liliya P. Nosovskaya¹, Larisa V. Adikaeva¹, Eduard B. Khatefov⁵

¹ Russian Potato Research Center, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing, Moscow Province, Russia

² P.P. Lukyanenko National Grain Center, Krasnodar, Russia

³ Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk, Russia

⁴ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Maikop Experiment Station of VIR, Maikop, Russia

⁵ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Eduard B. Khatefov, haed1967@rambler.ru

Background. The technology of deep grain processing is based on the use of operations that ensure separation of raw materials into various components and sequential processing of these components into products of high consumer value. The annual volume of deep grain processing products is over 100 million tons. Starch, as the most valuable component of processed grain, is used in the food industry, pharmacy, and in significant amounts for technical purposes. Studying the potential of domestic maize hybrids to provide raw materials for deep grain processing enterprises is a relevant task.

Materials and methods. The material for field and laboratory studies included 17 commercial maize hybrids developed at the P.P. Lukyanenko National Grain Center. The content of starch, protein and oil in grain was measured with infrared spectroscopy on an Infratec 1241 Grain Analyzer. Actual extraction of native starch was implemented using the “plant-on-the-table” method developed at the All-Russian Research Institute of Starch Products, and breeding trials of maize hybrids were carried out in the steppe zone of Kabardino-Balkaria in 2020/2021.

Results. As a result of the research, 13 hybrids with a mass fraction of starch in the range of 70.0–73.2% DM were identified: KR210MV, KR270MV, KR377AMV, KR385MV, KR415MV, ROSS198MV, KR433MV, KR514MV, KR575MV, LYUDMILA, ROSS190MV, and ROSS195MV. Of these, the grain yield in the range of 10–14 t/ha was shown by the hybrids KR270MV, KR315MV, KR377AMV, KR415MV, KR514MV, and KR575MV. In accordance with the results obtained, a number of hybrids can be recommended as source material for breeding and promising raw material for deep grain processing: KR415MV, KR393MV, and ROSS198MV, yielding 90.0–94.4% DW of starch when processed, and KR315MV, with a mass fraction of amylose in starch up to 38.6% DW.

Keywords: maize starch, amylopectin, amylose, gluten, germ, pulp, extractives

Acknowledgements: the studies were carried out according to the state task and VIR’s thematic plan under Project No. FGEM-2022-0009 “Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production”, and the state task according to the thematic plan of the All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing, branch of the Russian Potato Research Center, Research Theme No. FGGM-2022-0006 “To develop scientific and practical foundations for the production technology of new carbohydrate and protein components extracted from starch-containing raw materials based on a systematic analysis of their composition and properties for deep processing of potatoes, cereal and leguminous raw materials”.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Goldshtein V.G., Suprunov A.I., Bogdan P.M., Sherstobitov V.V., Khoreva V.I., Nosovskaya L.P., Adikaeva L.V., Khatefov E.B. Productivity potential of maize hybrids developed at the P.P. Lukyanenko National Grain Center for deep grain processing. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):51-60. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-51-60

Введение

Кукуруза является основным сырьем, обеспечивающим 85% крахмала, производимого во всем мире (Ranum et al., 2014). Крахмал составляет около 70–75% ее сухого вещества с различным соотношением в нем амилозного и амилопектинового крахмалов (Burrell, 2003; Pollak, Scott, 2005; Kaur et al., 2012).

Отличительной чертой зерен всех злаковых культур является наличие крупного, заполненного крахмалом эндосперма. Эндосперм составляет большую часть сухого вещества зерна кукурузы, где скапливаются все продукты ассимилятов во время репродуктивного роста. Размер зерна является признаком, увеличение которого сопровождается повышением калорийности и упрощением сбора урожая, а поскольку эндосперм составляет основную часть зерна, селекция на более крупные зерна неизбежно увеличивает размер эндосперма (Flint-Garcia, 2017). Селекционеры непрерывно улучшают химический состав зерна кукурузы для его эффективного использования при глубокой переработке зерна на крахмал, а побочных продуктов – для производства корма для животных (Pajić et al., 2010). Технология глубокой переработки зерна при получении крахмала играет важную роль в пищевой и непищевой промышленности. Образование твердых отходов на единицу продукции составляет 0,123 т на каждую тонну зерна кукурузы (Gao et al., 2012). Эффективная переработка и дальнейшее использование побочных продуктов как дополнительных ресурсов различного растительного сырья имеет большое значение для человека (Dedinec et al., 2015; Wang et al., 2016). Ценные питательные вещества и микроэлементы, содержащиеся в побочной продукции, представляют большой интерес для использования в других отраслях экономики. Например, кукурузный глютен и клетчатка (мезга), смешанная со сгущенным кукурузным экстрактом, используются для производства сухого кукурузного корма, а высущенные зародыши кукурузы находят применение в изготовлении кукурузного масла (García-Lara, 2010).

Большинство исследований, проводимых с кукурузным зерном, в основном сосредоточены на изучении его питательных свойств, накоплении в зерне крахмала, белка, масла, а также некоторых незаменимых аминокислот (лизин, триптофан) (Doehlert, Lambert, 1991; Nankar et al., 2017; Scott et al., 2006). В последние годы наблюдается рост селекционных исследований по созданию гибридов кукурузы, дающих зерно с уникальным составом для конкретных видов конечного использования. Особый интерес для селекции и производства представляют гибриды высококрахмалистой кукурузы не только с высоким содержанием крахмала в зерне, но и с различным соотношением в нем амилозы и амилопектина, качественными показателями побочной продукции белка, зародыша, клетчатки, содержанием в белке незаменимых аминокислот, а в жире зародыша – ненасыщенных жирных кислот. Селекционное улучшение гибридной кукурузы по этим признакам может повысить ценность товарного зерна в качестве сырья при применении технологии глубокой его переработки. Этот промышленный процесс включает разные технологические операции, направленные на отделение фракций чистого крахмала от остальных частей эндосперма кукурузного зерна. Такая технология позволила выделить различные продукты, в том числе крахмал (до 68,0%), кукурузную мезгу (клетчатку) (12,0%), зародыши кукурузы (7,5%), кукурузный

экстракт (6,5%), глютен (5,6%) и другие ингредиенты (0,04%) (Rasby et al., 2003).

Научный центр зерна им. П.П. Лукьяненко, согласно данным сайта Министерства науки и образования РФ (<https://www.minobrnauki.gov.ru>), является одним из лидеров Российской Федерации в области селекции высокопродуктивных гибридов с расчетным объемом производства семян более 20,0–25,0 тыс. тонн с посевным потенциалом около 1,0 млн га, что составляет 25% площадей, занятых под кукурузу на зерно в РФ. В 2018 г. пять гибридов селекции центра вошли в первую пятерку по объемам высеянных семян на полях Российской Федерации: РОСС 199 МВ – 5019 т, Краснодарский 194 МВ – 4204 т, Краснодарский 291 АМВ – 3456 т, Краснодарский 385 МВ – 2205 т и РОСС 140 СВ – 2041 т. Гибрид Краснодарский 377 АМВ относится к генотипам с высоким содержанием лизина в зерне. В 2020 г. под руководством НЦЗ им. П.П. Лукьяненко в различных агроклиматических зонах России были заложены участки гибридизации на площади 7753 тыс. га.

Целью исследования является определение потенциальной возможности использования отечественных гибридов кукурузы в качестве сырья при производстве нативного крахмала и побочных продуктов в технологическом процессе глубокой переработки зерна.

Материалы и методы

Селекционные испытания образцов кукурузы проводили в степной зоне Кабардино-Балкарии в 2020/2021 г. Фенологические наблюдения и учет урожая зерна проводили по методике, принятой во Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) (Shmaraev, 1985), агротехнические мероприятия – по методическим указаниям по производству гибридных семян кукурузы (Sotchenko et al., 2019). Материалом для эксперимента послужили 17 образцов гибридов кукурузы селекции НЦЗ им. П.П. Лукьяненко, переданные в коллекцию кукурузы ВИР в 2020 г (табл. 1). Описания биометрических показателей даны согласно широкому унифицированному классификатору вида *Zea mays* L. (Kukerkov, 1977). Были отобраны производственные гибриды селекции НЦЗ им. П.П. Лукьяненко, показавшие высокое (выше 68%) содержание крахмала в сухом (14% влажности) зерне, по данным лаборатории биохимии ВИР. Содержание в зерновках крахмала, белка и масла определяли методом инфракрасной спектроскопии на приборе Infratec 1241 Grain Analyzer (Швеция).

Определение фактического содержания крахмала и побочных продуктов его переработки в зерне представленных образцов проведено следующими методами: определение массовой доли сухих веществ (влажности зерна) (ГОСТ 13586.5-93), определение массовой доли белка (ГОСТ 10846-91), определение массовой доли крахмала (ГОСТ 10845-98). Определение амилозы в крахмале (ГОСТ ISO 6647-1-2015) используют на кукурузе в связи с отсутствием отдельного ГОСТ по определению амилозы в крахмале для кукурузы и других зерновых культур. Переработка зерна на крахмал и побочные продукты осуществлялась на лабораторной установке «завод на столе», разработанной во ВНИИК – филиале Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова в 2018 г. по методу, предложенному Л. П. Носовской и др. (Nosovskaya et al., 2018). Кукурузное зерно замачивали в 0,4-процентном растворе метабисульфита натрия в течение 48 ч при температуре 48–50°C. Затем от зерна

Таблица 1. Содержание белка, крахмала и жира в производственных гибридах кукурузы Научного центра зерна им. П.П. Лукьяненко из коллекции ВИР по результатам ИК-спектроскопии, 2020 г.
Table 1. Protein, starch and oil content in the commercial maize hybrids developed at the P.P. Lukyanenko National Grain Center and held in the VIR collection, based on the results of IR spectrometry, 2020

Гибрид / Hybrid	№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Содержание в зерне, % СВ / Content in grain, % DW		
		Белок / Protein	Крахмал / Starch	Масло / Oil
КР210МВ	Г-3831	11,25 ± 0,6	70,35 ± 0,22	4,05 ± 0,17
КР270МВ	Г-3832	12,60 ± 0,8	68,30 ± 0,31	4,55 ± 0,22
КР295МВ	Г-3833	12,00 ± 0,3	69,50 ± 0,72	4,00 ± 0,08
КР315МВ	Г-3841	11,35 ± 0,3	68,90 ± 0,95	4,50 ± 0,11
КР377АМВ	Г-3842	13,80 ± 0,5	69,10 ± 0,28	3,50 ± 0,18
КР385МВ	Г-3834	12,65 ± 0,1	68,95 ± 0,63	3,95 ± 0,05
КР393МВ	Г-3835	11,10 ± 0,2	71,10 ± 0,32	3,65 ± 0,14
КР415МВ	Г-3836	10,45 ± 0,4	70,75 ± 0,38	4,20 ± 0,12
КР425МВ	Г-3837	11,90 ± 0,5	70,00 ± 0,40	3,60 ± 0,10
КР433МВ	Г-3838	11,80 ± 0,4	70,15 ± 0,35	3,55 ± 0,08
КР514МВ	Г-3839	13,25 ± 0,6	68,30 ± 0,66	4,15 ± 0,07
КР575МВ	Г-3840	14,05 ± 0,7	68,30 ± 0,26	4,05 ± 0,14
Людмила	Г-3843	12,65 ± 0,6	68,70 ± 0,81	4,60 ± 0,11
РОСС135МВ	Г-3845	11,65 ± 0,3	69,45 ± 1,11	4,40 ± 0,17
РОСС 190МВ	Г-3846	10,55 ± 0,3	70,15 ± 0,52	3,90 ± 0,11
РОСС195МВ	Г-3847	11,40 ± 0,5	69,5 5± 0,33	4,35 ± 0,11
РОСС198МВ	Г-3848	9,15 ± 0,4	70,00 ± 0,71	4,55 ± 0,12

отделялась замочная жидкость (кукурузный экстракт), и зерно подвергалось грубому дроблению. Из зерновой массы извлекался кукурузный зародыш, который промывали от свободного крахмала и высушивали. Отделенную от зародыша зерновую массу направляли на тонкий мокрый помол зерна, осуществляемый на блендере Braun. Из измельченной зерновой массы ситованием на сетке с ячейками 70 мкм отделялась клетчатка (мезга), содержащая различную массовую долю крахмала. Клетчатку (мезгу) многократно (9 промывок) промывали на сите до отсутствия крахмала в промывной воде (по йодной пробе), после чего высушивали. Крахмалобелковую суспензию разделяли центрифугированием на кукурузный белок (глютен) и крахмал. При этом из суспензии с белком удаляются мелкие зерна крахмала, который по удельной массе идентичны частицам белка. Белок и крахмал высушивались. Определяли выход продуктов и массовую долю крахмала в побочных продуктах, в том числе СВ в промывной воде. Исследования проводились с учетом требований международной организации по стандартизации ISO (ИСО): массовая доля влаги (GOST 13586), массовая доля белка – на приборе К-424 (GOST 10846-91); массовая доля крахмала (GOST 10845) – с использованием поляриметра Polartronic N. Массовую долю амилозы в крахмале определяли на фотоколориметре КФК-3-01 (GOST ISO 6647-1-2015). Исследования проводили в 5-кратной повторности. Достоверность

различий оценивали по t-критерию Стьюдента, различия считали достоверными при пороге надежностей $b_1 = 0,95$ с уровнем статистической зависимости $p \leq 0,05$. Рассчитывали средние значения (M) и ошибки средних значений ($\pm m$) (<https://analytics.blogspot.com/2012/03/t.html>). Уборочную влажность зерна определяли с помощью влагомера «ФАУНА-М». Значение НСР₀₅ урожайности зерна гибридов определяли на основе данных, полученных с трех разных делянок каждого образца (биологическая проба). При проведении анализа (методом ИК-спектроскопии и по ГОСТ) на содержание белка, крахмала и масла в гибридах кукурузы определяли значения относительного стандартного отклонения в трех повторностях одной навески зерна.

Результаты

Результаты проведенных исследований показали, что среди изученных гибридов выделяются образцы – кандидаты для включения в программу импортозамещения в качестве крахмалсодержащего сырья. Одним из основных показателей перспективности использования гибрида в качестве крахмалоносного сырья является сочетание урожайности зерна и содержания в нем крахмала. Все гибриды селекции НЦЗ им. П.П. Лукьяненко отличаются высокой скоростью влагоотдачи зерна при созревании в условиях степной зоны юга России (табл. 2).

Таблица 2. Значение хозяйственно ценных признаков и массовой доли сухих веществ (СВ, %) и крахмала (% СВ) в зерне гибридов кукурузы**Table 2. Values of useful agronomic traits and the mass fraction of dry matter (DM, %) and starch (% DW) in the grain of maize hybrids**

Гибрид / Hybrid	Урожай зерна в т/га при 14% влажности* / Grain yield in t/ha at 14% moisture*	Уборочная влажность зерна, % / Harvesting grain moisture, %	Массовая доля / Mass fraction	
			Сухих веществ (СВ), % / Dry matter (DM), %	Крахмала, % СВ (ГОСТ10845) / Starch, % DW (GOST 10845)
КР210МВ	9,68	18,4	91,0 ± 0,4	71,6 ± 0,6
КР270МВ	10,76	19,4	91,2 ± 0,3	70,3 ± 0,7
КР295МВ	9,62	18,2	91,0 ± 0,3	68,2 ± 0,5
КР315МВ	10,71	19,6	90,5 ± 0,4	67,1 ± 0,5
КР377АМВ	10,70	20,7	91,5 ± 0,2	70,2 ± 0,3
КР385МВ	8,04	21,7	91,2 ± 0,1	70,0 ± 0,4
КР393МВ	7,79	20,5	90,9 ± 0,2	69,5 ± 0,3
КР415МВ	10,06	19,5	91,1 ± 0,2	71,1 ± 0,4
КР425МВ	8,13	19,5	90,8 ± 0,1	70,8 ± 0,2
КР433МВ	8,95	21,0	91,0 ± 0,3	72,1 ± 0,4
КР514МВ	14,02	20,8	91,3 ± 0,1	73,6 ± 0,3
КР575МВ	12,38	21,2	90,7 ± 0,4	73,2 ± 0,4
ЛЮДМИЛА	8,46	18,4	89,4 ± 0,3	71,8 ± 0,6
РОСС135МВ	5,46	18,3	90,9 ± 0,2	67,8 ± 0,4
РОСС190МВ	8,30	18,4	91,0 ± 0,5	71,9 ± 0,6
РОСС195МВ	6,20	15,9	91,1 ± 0,3	71,6 ± 0,5
РОСС198МВ	5,94	16,9	90,6 ± 0,3	71,1 ± 0,1

Примечание: * НСР_{0,5} = 0,22 т/гаNote: * LSD_{0,5} = 0.22 t/ha

Варьирование этого признака в исследованной выборке находится в пределах от 15,9% (РОСС195МВ) до 21,7% (КР575МВ). Среди исследованных 17 образцов выделено 13 гибридов с массовой долей крахмала более 70%: РОСС190МВ, РОСС198МВ, РОСС195МВ, КР270МВ, КР315МВ, ЛЮДМИЛА, КР575МВ, КР415МВ, КР393МВ, КР433МВ, КР210МВ, КР425МВ, КР385МВ, имеющих высокий потенциал в качестве сырья для технологий глубокой переработки зерна. Из них значением урожайности зерна выше 10 т/га характеризуются гибриды КР270МВ, КР377АМВ, КР377АМВ, КР415МВ, КР514МВ, КР575МВ.

Процесс извлечения крахмала методом глубокой переработки зерна кукурузы сопровождается выделением побочной продукции в виде многих полезных для других отраслей продуктов, таких как кукурузный экстракт, мезга, глютен, зародыш и процессовая вода. Получение этой дополнительной товарной продукции несомненно влияет на себестоимость и рентабельность основной продукции – нативного крахмала. Исследование выхода побочных продуктов, получаемых при глубокой переработке зерна 17 гибридов кукурузы, показало, что их по-

казатели по некоторым образцам имеют важное производственное значение (табл. 3).

Высокий выход экстракта в пределах 7–7,6% показали гибриды КР210МВ, КР295МВ, КР315МВ, КР415МВ, ЛЮДМИЛА, РОСС190МВ. Вырабатываемая при глубокой переработке зерна кукурузы мезга используется как компонент кукурузного корма. Ее высокое, в пределах 15,4–15,7%, содержание обнаружено в четырех образцах (КР315МВ, КР385МВ, КР514МВ, КР575МВ). Выход мезги в пределах 11,4–12,6% СВ зерна выявлен у гибридов: РОСС198МВ, КР270МВ, КР393МВ, КР415МВ, КР210МВ (см. табл. 3), а массовая доля крахмала в мезге (выше 20% СВ) у всех гибридов, за исключением КР415МВ и КР270МВ (табл. 4).

Глютен кукурузы включает в себя сложную смесь зеинов с другими белковыми компонентами, связанными с крахмалом и клетчаткой. Он представляет собой белковую фракцию, существенно отличающуюся от глютена пшеницы и родственных ей злаков. В отличие от качественного пшеничного глютена, кукурузный глютен имеет очень плохие реологические свойства. Его исполь-

Таблица 3. Результаты переработки кукурузного зерна методом «завод на столе» и качественные показатели крахмала и побочных продуктов переработки**Table 3. Maize grain processing results obtained by the “plant-on-the-table” method and the quality indicators of starch and byproducts of processing**

Гибрид / Hybrid	Выход побочных продуктов, % СВ зерна / Yield of byproducts, % DW of grain					
	Экстракт / Extract	Мезга / Pulp	Глютен / Gluten	Крахмал / Starch	Зародыш / Germ	Вода для замачивания зерна / Water for grain soaking
КР210МВ	7,0 ± 0,1	12,6 ± 0,3	12,8 ± 0,5	62,2 ± 0,7	7,9 ± 0,3	5,4 ± 0,1
КР270МВ	5,2 ± 0,1	12,6 ± 0,5	13,9 ± 0,4	60,3 ± 0,8	9,9 ± 0,1	8,0 ± 0,1
КР295МВ	7,3 ± 0,1	14,3 ± 0,5	14,0 ± 0,4	58,4 ± 0,9	8,4 ± 0,1	6,0 ± 0,1
КР315МВ	7,3 ± 0,1	15,7 ± 0,5	14,1 ± 0,7	58,2 ± 0,7	8,2 ± 0,2	4,7 ± 0,1
КР377АМВ	6,6 ± 0,1	14,1 ± 0,5	13,9 ± 0,3	59,0 ± 0,7	9,0 ± 0,1	6,7 ± 0,1
КР385МВ	5,7 ± 0,1	15,6 ± 0,3	13,3 ± 0,4	60,7 ± 0,9	8,3 ± 0,4	4,7 ± 0,1
КР393МВ	5,6 ± 0,1	12,0 ± 0,5	11,6 ± 0,4	65,1 ± 0,7	7,2 ± 0,3	5,7 ± 0,1
КР415МВ	7,3 ± 0,1	11,4 ± 0,6	10,6 ± 0,3	64,9 ± 0,8	7,0 ± 0,3	5,8 ± 0,1
КР425МВ	6,3 ± 0,1	14,9 ± 0,5	12,0 ± 0,3	61,9 ± 0,5	8,4 ± 0,2	4,9 ± 0,1
КР433МВ	5,1 ± 0,1	13,2 ± 0,3	14,0 ± 0,5	63,9 ± 0,8	7,1 ± 0,4	3,8 ± 0,1
КР514МВ	6,5 ± 0,1	15,4 ± 0,6	14,9 ± 0,6	57,5 ± 0,8	8,4 ± 0,4	5,7 ± 0,1
КР575МВ	5,7 ± 0,1	15,6 ± 0,7	13,6 ± 0,3	58,8 ± 0,6	7,2 ± 0,1	6,3 ± 0,1
ЛЮДМИЛА	7,6 ± 0,1	14,6 ± 0,4	14,0 ± 0,4	59,7 ± 0,6	8,2 ± 0,3	4,1 ± 0,1
РОС195МВ	5,8 ± 0,1	13,5 ± 0,3	14,6 ± 0,3	60,8 ± 0,3	9,2 ± 0,3	5,3 ± 0,1
РОСС135МВ	5,9 ± 0,1	13,4 ± 0,4	13,7 ± 0,3	60,1 ± 0,4	8,3 ± 0,1	6,9 ± 0,1
РОСС190МВ	7,0 ± 0,1	14,3 ± 0,7	13,2 ± 0,4	61,4 ± 0,4	7,9 ± 0,3	4,1 ± 0,1
РОСС198МВ	5,7 ± 0,1	12,6 ± 0,6	10,1 ± 0,1	67,1 ± 0,9	8,2 ± 0,2	4,5 ± 0,1

зуют в основном в безглютеновом, диетическом питании для людей с синдромом целиакии, а также в качестве добавки в различных комбикормах для животных с целью повышения содержания белка. Выход глютенa в пределах 14,0–14,9% СВ зерна установлен для гибридов: КР295МВ, КР315МВ, КР433МВ, РОС195МВ, ЛЮДМИЛА, КР514МВ (см. табл. 3). Содержание массовой доли крахмала в глютенe выше 20% СВ показали гибриды: РОСС195МВ, КР270МВ, КР315МВ, КР377АМВ, КР514МВ, КР575МВ, ЛЮДМИЛА, РОСС190МВ, КР210МВ (см. табл. 4).

Низкие потери экстрактивных веществ (ниже 6,3% СВ) с водой для замачивания зерна определены при переработке гибридов: КР270МВ, РОСС198МВ, КР393МВ, КР433МВ, КР575МВ, РОС195МВ, РОСС135МВ, КР385МВ. Наиболее высокий выход крахмала, 64,9% СВ и более, получен при переработке зерна гибридов: РОСС198МВ (67,1%), КР415МВ (64,9%).

Выделяемый из кукурузного зерна зародыш служит ценным сырьем для извлечения из него кукурузного масла и жмыха. Извлечение зародыша в пределах 9,0–9,9% СВ получено при переработке образцов зерна: КР270МВ, РОСС195МВ, КР377МВ (см. табл. 3). Гибрид КР270МВ характеризуется максимально высокой (для

изученной выборки) долей зародыша при содержании масла 4,55%. Такая высокая доля зародыша в зерне кукурузы является важным дополнительным источником сырья для выработки из него кукурузного масла. Учитывая более высокую стоимость и качество кукурузного масла в сравнении с маслом из семян подсолнечника и рапса, использование высококачественных гибридов для глубокой переработки зерна перспективно.

Наименьшая массовая доля крахмала в мезге (меньше 20% СВ) получена при переработке образцов: КР270МВ и КР415МВ (см. табл. 4). При выработке крахмала из зерна наименьшие потери (меньше 20% СВ) крахмала с глютенom установлены для зерна гибридов: РОСС198МВ, КР393МВ, КР415МВ, КР425МВ, КР433МВ, РОСС135МВ, КР295МВ, а высокая, в пределах 67,0–67,8% СВ, массовая доля белка в глютенe получена при переработке гибридов: РОСС198МВ, КР415МВ, КР393МВ.

Соотношение доли амилозы и амилопектина в крахмале во многом определяет его качественные признаки и свойства. Крахмалы, извлеченные из зерна гибридов кукурузы, показали, что доля амилозы в крахмале (% СВ) варьировала в пределах от 16,6% (РОСС198МВ) до 38,6% (КР315МВ). Низкие значения доли амилозы (менее 20%

Таблица 4. Качественные показатели некоторых побочных продуктов и крахмала, полученных в результате переработки зерна кукурузы**Table 4. Qualitative indicators of some byproducts and starch obtained as a result of maize grain processing**

Гибрид / Hybrid	Массовая доля крахмала, % СВ зерна / Mass fraction of starch, % DW of grain		Амилоза в крахмале, % СВ крахмала / Amylose in starch, % DW of starch	Белок в глютенe, % СВ глютенa / Protein in gluten, % DW of gluten	Коэффициент извлечения крахмала, % / Starch extraction ratio, %
	Мезга / Pulp	Глютен / Gluten			
КР210МВ	23,5 ± 1,1	24,8 ± 2,3	21,9 ± 0,1	57,0 ± 1,9	87,4
КР270МВ	19,9 ± 1,1	24,3 ± 1,9	23,8 ± 0,3	57,7 ± 2,4	85,8
КР295МВ	25,6 ± 1,5	19,2 ± 1,9	22,4 ± 0,3	63,2 ± 2,8	85,6
КР315МВ	29,3 ± 1,1	22,3 ± 2,0	38,6 ± 0,3	59,7 ± 2,3	83,1
КР377АМВ	25,2 ± 1,2	22,0 ± 1,4	18,9 ± 0,5	60,2 ± 2,2	84,9
КР393МВ	20,2 ± 1,6	15,3 ± 1,1	20,8 ± 0,5	67,8 ± 2,5	92,0
КР415МВ	19,4 ± 1,4	15,0 ± 1,4	23,1 ± 0,3	67,0 ± 2,1	90,0
КР425 МВ	32,0 ± 1,8	17,6 ± 1,8	19,4 ± 0,6	64,3 ± 2,1	84,2
КР433МВ	27,0 ± 1,9	18,4 ± 1,8	17,9 ± 0,2	63,5 ± 2,3	87,4
КР514МВ	28,8 ± 1,9	26,7 ± 1,7	19,8 ± 0,3	55,0 ± 2,6	85,7
КР575МВ	30,2 ± 1,2	21,8 ± 1,7	24,0 ± 0,1	60,2 ± 2,7	83,8
ЛЮДМИЛА	29,2 ± 1,6	23,5 ± 2,3	21,9 ± 0,4	58,5 ± 2,8	83,1
РОСС135МВ	27,4 ± 1,7	19,1 ± 2,0	21,9 ± 0,3	62,7 ± 2,3	88,6
РОСС190МВ	31,4 ± 1,3	21,8 ± 2,1	16,9 ± 0,6	60,2 ± 2,7	85,4
РОСС195МВ	30,5 ± 1,8	26,4 ± 1,3	20,4 ± 0,2	55,6 ± 2,3	84,9
РОСС198МВ	27,2 ± 1,3	14,9 ± 1,7	16,6 ± 0,4	67,3 ± 2,5	94,4

СВ) в крахмале были у гибридов: КР377АМВ, КР425 МВ, КР433МВ, РОСС198МВ, РОСС190МВ, КР514МВ.

Максимальная извлекаемость крахмала при глубокой переработке зерна имеет важное значение для исключения его потерь вместе с побочной продукцией. Высокий выход крахмала при глубокой переработке зерна установлен у гибридов КР415МВ, КР393МВ и РОСС198МВ.

В соответствии с полученными результатами в качестве исходного материала для селекции и возделывания на зерно в качестве сырья для глубокой переработки могут быть рекомендованы гибриды: КР415МВ, КР393МВ, РОСС198МВ, которые позволяют извлекать крахмал в пределах 90,0–94,4%, а высокоамилозный гибрид КР315МВ с массовой долей амилозы до 38,6% СВ крахмала может служить сырьем для получения крахмала с высокой долей амилозы. При переработке зерна гибрида КР415МВ был отмечен высокий выход экстрактивных веществ (кукурузный экстракт), а также низкая массовая доля крахмала в побочных продуктах производства: мезге и глютенe. Наибольшее значение содержания белка в глютенe, 67,3% СВ глютенa при извлекаемости крахмала до 94,4% СВ, получено при переработке зерна ранне-спелого гибрида РОСС198МВ. В этом гибриде обнаружены высокая доля зародыша (8,2% СВ), низкое содержание глютенa (10,1% СВ) и высокая доля мезги (27,2% СВ).

Этот гибрид является наиболее перспективным для возделывания и дальнейшего использования в качестве сырья для глубокой переработки зерна.

Обсуждение результатов

Среди изученных в опыте 17 производственных гибридов селекции НЦЗ им. П.П. Лукьяненко выделено 13 гибридов с массовой долей крахмала в пределах 70,0–73,6%: КР385МВ, КР377АМВ, КР415МВ, КР425МВ, КР270МВ, КР210МВ, КР433МВ, РОСС198МВ, КР575МВ, ЛЮДМИЛА, РОСС190МВ, РОСС195МВ, КР514МВ. Из них урожайностью зерна выше 10 т/га характеризуются гибриды: КР270МВ, КР377АМВ, КР377АМВ, КР415МВ, КР514МВ, КР575МВ. Максимальным извлечением крахмала (90%) при глубокой переработке зерна характеризуется гибрид КР415МВ.

Анализ побочной продукции, получаемой при выработке крахмала методом глубокой переработки зерна, показал, что выходом экстрактивных веществ в пределах 7,0–7,6% СВ массовой доли зерна характеризуются гибриды: РОСС190МВ, КР315МВ, ЛЮДМИЛА, КР415МВ, КР295МВ, КР210МВ. По показателю выход мезги менее 14% СВ зерна выделены гибриды: КР270МВ, КР415МВ, КР393МВ, КР433МВ, КР433МВ, РОСС135МВ, КР210МВ,

РОСС198МВ, РОСС195МВ. Значения выхода глютена в пределах 14,0–14,9% СВ зерна показали гибриды: КР315МВ, ЛЮДМИЛА, КР433МВ, КР295МВ, КР514МВ, РОСС195МВ, а извлечение зародыша в пределах 9,0–9,9% СВ получено при переработке зерна гибридов: КР270МВ, РОСС195МВ, КР377МВ. В соответствии с полученными результатами в качестве исходного материала для селекции и перспективного сырья для глубокой переработки зерна могут быть рекомендованы гибриды: КР415МВ, КР393МВ, РОСС198МВ, у которых извлекаемость крахмала при переработке зерна достигает 90,0–94,4%, а также высокоамилозный гибрид КР315МВ с массовой долей амилозы в крахмале 38,6% СВ крахмала.

Редкий и ценный признак для селекции высококрахмалистой кукурузы, у которой наблюдается сочетание высокого содержания крахмала с высоким содержанием белка, обнаружен у гибридов КР393МВ и КР415МВ. Также сочетание высокого содержания крахмала с высоким содержанием масла в зародыше было обнаружено у гибрида РОСС198МВ. Гибриды КР270МВ, РОСС135МВ и РОСС195МВ характеризуются относительно высоким содержанием крахмала, белка и масла. Родительские линии этих гибридов служат ценным источником признаков, связанных с накоплением в гибридной зерновке наравне с крахмалом других побочных продуктов. Создание на их основе исходного селекционного материала существенно улучшит качественный состав зерна.

Выводы

Исследования урожайности зерна, фактического содержания в зерне крахмала и побочной продукции при глубокой переработке зерна гибридов кукурузы селекции НИЦЗ им. П.П. Лукьяненко показали, что значительная часть сортимента характеризуется высоким потенциалом продуктивности и выхода крахмальной продукции. В результате исследований удалось выделить четыре гибрида селекции НИЦЗ им. П.П. Лукьяненко с высоким потенциалом урожайности и выработки крахмалов, которые могут служить полноценным сырьем при импортозамещении аналогичных гибридов иностранной селекции (State Register..., 2022). Потенциал продуктивности, количества и качества получаемой основной и побочной продукции из товарного зерна отечественных гибридов представляется достаточно высоким, за исключением специальных форм крахмала (амилозный и амилопектиновый), которые пока еще не представлены отечественными гибридами кукурузы в Реестре селекционных достижений РФ (State Register..., 2022). Сочетание интенсивных агротехнологий с генетическим потенциалом и качеством зерна отечественных гибридов кукурузы селекции НИЦЗ им. П.П. Лукьяненко позволяет гарантировать высокий уровень обеспеченности товарным зерном предприятий по глубокой переработке зерна в Российской Федерации.

References / Литература

Burrell M.M. Starch: the need for improved quality or quantity – an overview. *Journal of Experimental Botany*. 2003;54(382):451-456. DOI: 10.1093/jxb/erg049

Classical methods of statistics: Student's *t*-test (Klassicheskiye metody statistiki: t-kriteriyu Studenta): [website]. [in Russian] (Классические методы статистики: t-критерий Стьюдента: [сайт]). URL: <https://analytics.blogspot.com/2012/03/t.html> [дата обращения: 12.05.2022].

Dedinec A., Markovska N., Ristovski I., Veleviski G., Gjorgjievskva V.T., Grncarovska T.O. et al. Economic and environmental evaluation of climate change mitigation measures in the waste sector of developing countries. *Journal of Cleaner Production*. 2015;88:234-241. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.05.048

Doehlert D.C., Lambert R.J. Metabolic characteristics associated with starch, protein, and oil deposition in developing maize kernels. *Crop Science*. 1991;31(1):151-157. DOI: 10.2135/cropsci1991.0011183X003100010035x

Flint-Garcia S.A. Kernel evolution: from teosinte to maize. In: B.A. Larkins (ed.). *Maize Kernel Development*. Wallingford: CABI; 2017. p.1-15. DOI: 10.1079/9781786391216.0001

Gao L., Ren N.Q., Chen Z.B., Wang A., Zhang L.S. Energy consumption and environment emissions analysis of a typical corn deep processing enterprise. *Journal of Harbin Institute of Technology*. 2012;44(2):61-65.

García-Lara S. Cereal grains: properties, processing and nutritional attributes. *Crop Science*. 2010;50(6):2649-2650. DOI: 10.2135/cropsci2010.12.0005br

Gonikova M.R., Khoreva V.I., Goldshtein V.G., Nosovskaya L.P., Adikaeva L.V., Khatefov E.B. Study of economically valuable traits and technological properties in maize from the *Zea mays* L. collection of VIR. *Proceeding on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(4):56-64. [in Russian] (Гоникова М.Р., Хорева В.И., Гольдштейн В.Г., Носовская Л.П., Адикаева Л.В., Хатефов Э.Б. Изучение хозяйственно ценных признаков и технологических свойств коллекции *Zea mays* L. ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(4):56-64). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-4-56-64

GOST 10845-98. Interstate standard. Cereals and cereal milled products. Method for determination of starch. Official edition. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification; Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 10845-98. Межгосударственный стандарт. Зерно и продукты его переработки. Метод определения крахмала. Издание официальное. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Стандартиформ; 2009). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/88/8817.pdf> [дата обращения: 23.03.2023].

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: Стандартиформ; 2009). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023864> [дата обращения: 23.03.2023].

GOST 13586.5-93. Interstate standard. Grain. Method of moisture content determination. Official edition. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification; Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 13586.5-93. Межгосударственный стандарт. Зерно. Метод определения влажности. Издание официальное. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Стандартиформ; 2009). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294837/4294837685.pdf> [дата обращения: 23.03.2023].

GOST 32902-2014. Interstate standard. Starch and starch products. Terms and definitions. Official edition. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 32902-2014. Межгосударственный стандарт. Крахмал и крахмалопродукты. Термины и определения. Издание официальное. Москва: Стандартиформ; 2019). URL: <https://>

- files.stroyinf.ru/Data2/1/4293767/4293767121.pdf [дата обращения: 22.03.2023].
- GOST ISO 6647-1-2015. Interstate standard. Rice. Determination of amylose content. Part 1. Reference method (ISO 6647-1:2007, IDT). Official edition. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ ISO 6647-1-2015. Межгосударственный стандарт. Рис. Определение содержания амилозы. Часть 1. Контрольный метод (ISO 6647-1:2007, IDT). Издание официальное. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: <https://meganorm.ru/Data/604/60481.pdf> [дата обращения: 22.03.2023].
- GOST R 55489-2013. National standard of the Russian Federation. Corn gluten. Specifications. Official edition. Moscow: Standartinform; 2014. [in Russian] (ГОСТ Р 55489-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Глютен кукурузный. Технические условия. Издание официальное. Москва: Стандартинформ; 2014). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774184.pdf> [дата обращения 05.09.2022].
- Kaur B., Ariffin F., Bhat R., Karim A.A. Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*. 2012;26(2):398-404. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.02.016
- Kukekov V.G. (comp.) Broad unified COMECON list of descriptors and international COMECON list of descriptors for sp. *Zea mays* L. Leningrad: VIR; 1977. [in Russian] (Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ видов *Zea mays* L. / сост. В.Г. Кукеков. Ленинград: ВИР; 1977).
- Ministry of Science and Education of the Russian Federation. News of the Ministry. Valery Falkov arrived on a working visit to Krasnodar (Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossiyskoy Federatsii. Novosti ministerstva. Valeriy Falkov pribyl s rabochim vizitom v Krasnodar). September 1, 2022. [in Russian] (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Новости министерства. Валерий Фальков прибыл с рабочим визитом в Краснодар. 1 сентября 2022 г.) URL: <https://www.minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-ministerstva/25248/> [дата обращения: 01.09.2022].
- Nankar A., Holguin F.O., Scott M.P., Pratt R.C. Grain and nutritional quality traits of Southwestern U.S. blue maize landraces. *Cereal Chemistry*. 2017;94(6):950-955. DOI: 10.1094/CCHEM-04-17-0079-R
- Nosovskaya L.P., Adikaeva L.V., Gol'dshstein V.G. Use of innovative winter rye with a low content of pentosans as a raw material for the production of starch and starch products. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2018;32(7):83-85. [in Russian] (Носовская Л.П., Адикаева Л.В., Гольдштейн В.Г. Изучение использования инновационной низкопентозанной озимой ржи как сырья для производства крахмала и крахмалопродуктов. *Достижения науки и техники АПК*. 2018;32(7):83-85). DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10720
- Pajić Z., Radosavljević M., Filipović M., Todorović G., Srđić J., Pavlov M. Breeding of specialty maize for industrial purposes. *Genetika*. 2010;42(1):57-66. DOI: 10.2298/GENSR1001057P
- Pollak L.M., Scott M.P. Breeding for grain quality traits. *Maydica*. 2005;50(3):247-257.
- Ranum P., Peña-Rosas J.P., Garcia-Casal M.N. Global maize production, utilization, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2014;1312(1):105-112. DOI: 10.1111/nyas.12396
- Rasby R.J., Erickson G.E., Klopfenstein T.J., Adams D.C. Value and use of corn milling by-products in the cow herds. In: *Proceedings, The Range Beef Cow Symposium XVIII*. Mitchell, NE: University of Nebraska 2003. Available from: <https://digitalcommons.unl.edu/rangebeefcowsymp/62> [accessed Sept. 01, 2021].
- Scott M.P., Edwards J.W., Bell C.P., Schussler J.R., Smith J.S. Grain composition and amino acid content in maize cultivars representing 80 years of commercial maize varieties. *Maydica*. 2006;51(2):417-423.
- Shmaraev G.E., Matveeva G.V. Study and maintenance of the maize collection accessions. Guidelines (Izucheniye i podderzhanie obraztsov kollektcii kukuruzy. Metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Шмараев Г.Е., Матвеева Г.В. Изучение и поддержание образцов коллекции кукурузы. Методические указания. Ленинград: ВИР; 1985).
- Sotchenko V.S. Maize breeding, seed production, and cultivation technology (Selektsiya, semenovodstvo, tekhnologiya vozdeliyvaniya kukuruzy). Pyatigorsk; 2009. [in Russian] (Сотченко В.С. Селекция, семеноводство, технология возделывания кукурузы. Пятигорск; 2009).
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotekh; 2022. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2022).
- StatSoft Russia: [website]. [in Russian] (StatSoft Russia: [сайт]). URL: <http://statsoft.ru/products/new-features/STATISTICA10.php> [дата обращения: 10.08.2022].
- Wang B., Dong F., Chen M., Zhu J., Tan J., Fu X. et al. Advances in recycling and utilization of agricultural wastes in China: based on environmental risk, crucial pathways, influencing factors, policy mechanism. *Procedia Environmental Sciences*. 2016;31:12-17. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.02.002

Информация об авторах

Владимир Георгиевич Гольдштейн, кандидат технических наук, заведующий отделом, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, ВНИИ крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха, 140051 Россия, Московская обл., Люберецкий р-н, пос. Красково, ул. Некрасова, 11, 6919486@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2042-0681>

Анатолий Иванович Супрунов, доктор сельскохозяйственных наук, заведующий отделом, Национальный центр зерна им. П.П. Лукьяненко, 350012 Россия, Краснодар, Центральная Усадьба КНИИСХ, suprunov-kniisx@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6400-6837>

Полина Михайловна Богдан, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр агроботехнологий Дальнего Востока им. А.К. Чайки, 692539 Россия, Уссурийск, пос. Тимирязевский, ул. Воложенина, 30, polina_bogdan84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3052-5521>

Василий Васильевич Шерстобитов, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Майкопская опытная станция – филиал ВИР, 385746 Россия, Республика Адыгея, Майкоп, ул. Научная, 1, scherstobitow@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8308-5107>

Валентина Ивановна Хорева, 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, horeva43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2762-2777>

Лилия Петровна Носовская, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, ВНИИ крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха, 140051 Россия, Московская обл., Люберецкий р-н, пос. Красково, ул. Некрасова, 11, vniik@arrisp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0973-0408>

Лариса Владимировна Адикаева, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха, ВНИИ крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиал Федерального исследовательского центра картофеля им. А.Г. Лорха, 140051 Россия, Московская обл., Люберецкий р-н, пос. Красково, ул. Некрасова, 11, csvniik@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3858-9071>

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, haed1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

Information about the authors

Vladimir G. Goldshtein, Cand. Sci. (Engineering), Head of a Department, Russian Potato Research Center, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing, branch of the Russian Potato Research Center, 11 Nekrasova St., Kraskovo Settle., Lyuberetsky District, Moscow Province 140051, Russia, 6919486@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2042-0681>

Anatoly I. Suprunov, Dr. Sci. (Agriculture), Head of a Department, P.P. Lukyanenko National Grain Center, Central Estate of the KNIISKh, Krasnodar 350012, Russia, suprunov-kniisx@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6400-6837>

Polina M. Bogdan, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, 30 Volozhenina St., Timiryazevsky Settle., Ussuriysk 692539, Russia, polina_bogdan84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3052-5521>

Vasiliy V. Sherstobitov, Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Maikop Experiment Station of VIR, 1 Nauchnaya St., Maikop 385746, Russia, scherstobitow@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8308-5107>

Valentina I. Khoreva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, horeva43@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2762-2777>

Liliya P. Nosovskaya, Senior Researcher, Russian Potato Research Center, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing, branch of the Russian Potato Research Center, 11 Nekrasova St., Kraskovo Settle., Lyuberetsky District, Moscow Province 140051, Russia, vniik@arrisp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0973-0408>

Larisa V. Adikaeva, Researcher, Russian Potato Research Center, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-Containing Raw Materials Processing, branch of the Russian Potato Research Center, 11 Nekrasova St., Kraskovo Settle., Lyuberetsky District, Moscow Province 140051, Russia, csvniik@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3858-9071>

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, haed1967@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5713-2328>

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 30.09.2022; одобрена после рецензирования 13.04.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 30.09.2022; approved after reviewing on 13.04.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 634.75:631.52
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-61-69



Отбор сортов земляники по признакам продуктивности и качества ягод на основе нормированных индексов

В. И. Лапшин, В. В. Яковенко

Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Краснодар, Россия

Автор, ответственный за переписку: Вадим Игоревич Лапшин, lavai@list.ru

Актуальность. Совместное использование различных методов преобразования данных и многомерного статистического анализа, учитывающего несколько переменных, повышает эффективность отбора перспективных генотипов земляники по комплексу признаков для промышленного и мелкотоварного производства.

Материалы и методы. Изучались 17 сортов земляники садовой короткого дня в период 2020–2022 гг. Анализ велся по признакам продуктивности (число ягод, масса ягод I порядка, средняя масса ягоды), товарного качества ягод (плотность мякоти ягоды, высота ягоды, диаметр ягоды) и общей массе ягод с растения. В математической обработке данных применялись двухфакторный дисперсионный анализ, метод главных компонент, кластерный анализ по алгоритму Уорда, критерий Вилкоксона.

Результаты. Установлена статистическая достоверность факторов «сорт» и «год» и эффекта их взаимодействия. Наибольшее влияние на изменчивость признаков оказал генотип сорта. Большая часть общей дисперсии по комплексу признаков определена пятью первыми главными компонентами. Кластерный анализ выделил две группы сортов. Исходные данные были преобразованы по наименьшей существенной разности HC_{05} для получения нормированных индексов. С учетом критерия Вилкоксона по индексам проведено ранжирование сортов. При сопоставлении групп, построенных по средним и суммарным значениям нормированных индексов, с результатами кластерного анализа выделено 6 лучших сортов земляники по комплексу признаков.

Заключение. Объединенное применение многомерных методов и нормированных индексов позволило выделить наиболее перспективные для производства сорта земляники по урожаю и качеству ягод: 'Олимпия', 'Нелли', 'Флоренс', 'Кемия', 'Джайв' и 'Альба'.

Ключевые слова: земляника садовая, сортообразцы, хозяйственно ценные признаки, многомерные методы, ранжирование

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану СКФНЦСВВ (0498-2022-0001) «Провести мобилизацию, сохранение, изучение генофонда садовых культур и винограда, исследование его генетической структуры, идентификацию генов хозяйственно ценных признаков с применением ДНК-технологий и создать сорта и подвой нового поколения с высоким потенциалом адаптивности, продуктивности, качества плодов и технологичности».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Лапшин В.И., Яковенко В.В. Отбор сортов земляники по признакам продуктивности и качества ягод на основе нормированных индексов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):61-69. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-61-69

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-61-69

Selection of strawberry cultivars according to their productivity and berry quality using normalized indices

Vadim I. Lapshin, Valentina V. Yakovenko

*North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Krasnodar, Russia***Corresponding author:** Vadim I. Lapshin, lavai@list.ru

Background. Combined use of various data transformation methods and a multivariate statistical analysis that takes into account several variables would increase the efficiency of selecting promising strawberry genotypes according to a set of traits for industrial and small-scale production.

Materials and methods. In 2020–2022, 17 short-day garden strawberry cultivars were studied. The analysis was carried out for productivity (the number of berries, the weight of berries of the 1st order, and the average berry weight), marketable quality of berries (berry pulp density, berry height, and berry diameter), and total weight of berries per plant. Mathematical data processing employed a two-factor analysis of variance, the principal component method, cluster analysis by Ward's algorithm, and Wilcoxon test.

Results. The statistical significance of the cultivar and year factors, and their interaction was measured. The cultivar's genotype had the greatest effect on the variability of characters. Greater part of the total variance in the set of characters was determined by the first five principal components. The cluster analysis identified two groups of cultivars. The initial data were transformed according to the least significant difference (LSD_{05}) to obtain normalized indices. Taking into account the Wilcoxon test, the cultivars were ranked by the indices. When comparing the groups built in line with mean and total values of the normalized indices with the cluster analysis results, 6 best strawberry cultivars were identified for the studied set of characters.

Conclusion. The combined use of multivariate methods and normalized indices made it possible to identify the most promising strawberry cultivars according to their yield and berry quality: 'Olympia', 'Nelli', 'Florence', 'Kemia', 'Jive', and 'Alba'.

Keywords: *Fragaria × ananassa* Duch., cultivars, useful agronomic traits, multivariate methods, ranking

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the state task according to the thematic plan of the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making (0498-2022-0001) "To mobilize, preserve, and study the genetic diversity of horticultural crops and grapes, study its genetic structure, identify genes of useful agronomic traits using DNA technologies, and develop new-generation cultivars and rootstocks with high potential for adaptability, productivity, fruit quality, and processability".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Lapshin V.I., Yakovenko V.V. Selection of strawberry cultivars according to their productivity and berry quality using normalized indices. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):61-69. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-61-69

Введение

Отбор лучших генотипов по комплексу признаков у земляники садовой *Fragaria × ananassa* Duch. ($2n = 8x = 56$) – процесс сложный вследствие октоплоидного набора хромосом, высокой изменчивости признаков и сильного влияния условий окружающей среды на их реализацию (Fadeeva, 1975; Zubov, 2004; Hancock et al., 2008).

Действие условий окружающей среды на проявление количественных признаков реализуется в различной реакции генотипов на условия выращивания. Для описания и анализа вкладов внешней среды в реализацию хозяйственно-биологических признаков используются различные модели математической статистики на основе дисперсионного анализа (Gauch, 1992; Pacheco et al., 2005; Barth et al., 2020).

Основными количественными признаками, которым уделяется внимание в селекционных программах по землянике, являются продуктивность и качество ягод (Chandler et al., 2012; Faedi, Baruzzi, 2016; Sharma S., Sharma N., 2018).

Зачастую отбор по одному или нескольким отдельным признакам у земляники не дает желаемых селекционных результатов из-за отрицательных связей с другими хозяйственно ценными показателями (Vieira, 2017). Поэтому для повышения эффективности отбора перспективных генотипов используются методы многомерного статистического анализа, строящиеся на использовании нескольких переменных.

Точность оценки генотипов по селекционно ценным признакам зависит от специфики учитываемых параметров, чаще всего характеризующихся непрерывной количественной изменчивостью и неодинаковой размерностью. Для корректного использования данных в рамках моделей и методов статистики часто необходима процедура их нормирования, то есть преобразования исходных числовых последовательностей в безразмерный вид и вариационные ряды единого порядка, позволяющие проводить сравнительный анализ данных различного характера (Iglesias, Pecharromán, 2007; Snegireva, 2010; Klyushnikova, Shitova, 2016).

При отборе ценных в производственном отношении сортов, с учетом реакции их генотипов на условия выращивания и степени проявления хозяйственно ценных показателей, традиционно используются математические методы построения групп и рангов изучаемых объектов как в соответствии с их взаимным сходством, так и достоверными различиями. К числу таких объединяющих приемов относится тест Вилкоксона, используемый для оценки различий между рядами парных измерений по значениям определенного количественного показателя. Данный критерий, предназначенный для определения направлений изменчивости признаков и их выраженности в зависимости от условий внешней среды, нашел широкое применение в области анализа разнообразных данных по культуре земляники (Mozūraitis et al., 2020; Kouyama et al., 2022; Schattman et al., 2022).

Учитывая вышеизложенное, *цель нашей работы* заключалась в оценке и отборе интродуцированных сортов земляники по комплексу признаков на основе ряда методов многомерной статистики и нормирующего преобразования исходных данных.

Материалы и методы

Работа проводилась в 2020–2022 гг. на плантации земляники исследовательско-селекционной коллекции

генетических ресурсов садовых культур Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ, г. Краснодар).

Объектами изучения послужили 17 сортов земляники садовой короткого дня, из которых 2 являются сортами местной селекции ('Нелли' и 'Кемия'), 10 – итальянской селекции ('Априка', 'Аура', 'Квики', 'Лейтиция', 'Олимпия', 'Сибилла', 'Тя', 'Клери', 'Альба', 'Сирия'), 3 – селекции Нидерландов ('Вивальди', 'Джайв', 'Магнус'), 1 – английской селекции ('Флоренс') и 1 – селекции США ('Хоней'). Ежегодно изучали по 10 растений каждого сорта.

Сорта выращивались по принятой в Краснодарском крае типовой технологии возделывания земляники (традиционной) (Organization of technological..., 2016).

У образцов учитывались признаки продуктивности – число ягод (шт./растение), масса ягод I порядка (г), средняя масса ягоды (г); товарного качества ягод – плотность мякоти ягоды (г), высота ягоды (мм), диаметр ягоды (мм) и общая масса ягод (г/растение).

Оценка образцов по комплексу признаков проведена в соответствии с общепринятой методикой (Sedov, Ogol'tsova, 1999). Среднюю массу определяли при помощи электронных весов Аcom jW-1C, плотность мякоти ягоды – пенетрометра модели FT 011 (наконечник диаметром 0,50 см²).

Статистическая обработка данных проводилась с применением дисперсионного анализа, метода главных компонент и кластерного анализа (Mandel, 1988; Lakin, 1990), с использованием программного пакета Statistica v.6.0 (StatSoft). Вычисления были выполнены для 5-процентного уровня значимости.

Результаты и обсуждение

Анализ генотипического разнообразия изученных сортов, характеризующий целесообразность отбора перспективных форм по изученным признакам, проводился при помощи двухфакторного дисперсионного анализа.

По результатам анализа дисперсии были установлены статистически значимые влияния обоих факторов и их взаимодействия в условиях 2020–2022 гг. Исключение было выявлено только для фактора «год» по массе ягод I порядка, в соответствии с которым фактическое значение F составило 1,50 при стандартном значении критерия Фишера $F_{ct.}$ 2,99. С учетом стандартного критерия Фишера $F_{ct.}$ 1,64 показатель F для фактора «сорт» составил 18,64–57,82; для фактора «год» при $F_{ct.}$ 2,99 фактические значения критерия находились в интервале 3,29–23,21; взаимодействие обоих факторов при $F_{ct.}$ 1,46 определило полученные значения критерия Фишера 2,0–6,54.

Наиболее значительное воздействие на учетные признаки оказывает генотип сорта: его вклады в общую вариацию составили от 35,01 (средняя масса ягоды) до 54,74% (плотность мякоти ягоды). Наименьшее влияние на реализацию изученных признаков установлено для фактора года исследований – от 0,29 (масса ягод I порядка) до 3,17% (средняя масса ягоды). Обоюдное влияние генотипа и особенностей года превысило вклады по фактору «год» и составило от 5,66 (масса ягод I порядка) до 13,26% (средняя масса ягоды) общей дисперсии.

Количественное проявление признаков структуры урожая и качества ягод, обусловленное индивидуальной нормой реакции сортов земляники, различно и зависит от степени отзывчивости генотипов на почвенно-климатические условия возделывания.

Выявленное в результате двухфакторного дисперсионного анализа наличие изменчивости генотипов образцов по всем учтенным характеристикам обусловило возможность проведения отбора наиболее перспективных форм по целому комплексу признаков.

Неоднородность размерностей и мерных порядков признаков, при которой интервалы средних значений исходных данных по сортам составили от 13,7–19,0 (г) для средней массы ягод до 394,4–1291,9 (г/растение) для общей массы ягод, определила целесообразность преобразования изначальных вариационных рядов по методу главных компонент, позволяющему оптимизировать исходное пространство изменчивости из 7 учтенных параметров до удельных безразмерных факторных вкладов, учитывающих свыше 95% сводного разнообразия по комплексу признаков.

На основе анализа взаимного варьирования экспериментальных количественных данных были оценены вклады многомерных факторов, согласно которым 99,12% общей вариации получили объяснение посредством пяти первых главных компонент.

Для дальнейшего отбора, предусматривавшего изучение 17 сортов земляники по комплексу показателей, в соответствии с вкладами факторов главных компонент, составившими от -2,73 до 2,46, была проделана процедура кластерного анализа по алгоритму Уорда, являющаяся одной из объединяющих агломеративных иерархических методик многомерной математической статистики, формирующей кластерные группы по принципу минимальной внутрикластерной и наибольшей межгрупповой дисперсии. Результаты кластеризации представлены на рисунке 1.

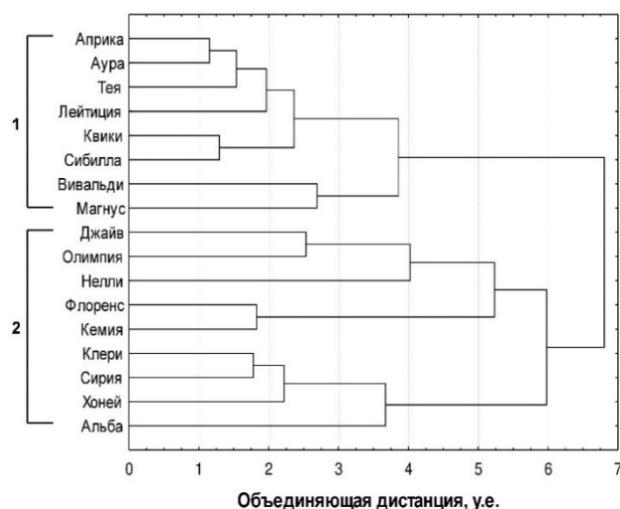


Рис. 1. Дендрограмма кластерного анализа сортов земляники по комплексу признаков
Fig. 1. Dendrogram of the cluster analysis of strawberry cultivars according to a set of characters

При построении графического дендрита с учетом объединяющей дистанции 6,50 у. е. и иерархического евклидового расстояния между группами генотипов было получено 2 кластера, каждый из которых объединил сорта земляники, отличающиеся сходными направлениями изменчивости по комплексу изученных признаков.

Корректность распределения изученных сортов на кластеры была подтверждена при помощи дисперсионного анализа, выполненного по исходным вариационным рядам учтенных признаков. При стандартном значении критерия $F_{ст.}$ 3,84 показатели данной величины по

кластерному фактору для учтенных 7 признаков составили 107,47 (число ягод), 43,26 (масса ягоды I порядка), 16,64 (средняя масса ягоды), 96,86 (высота ягоды), 49,88 (диаметр ягоды), 116,24 (биологический урожай), 115,50 (плотность мякоти ягоды).

В первый кластер вошли сорта 'Априка', 'Аура', 'Тея', 'Лейтиция', 'Квики', 'Сибилла', 'Вивальди' и 'Магнус'. Средние значения учтенных хозяйственно-биологических показателей составили: число ягод – 38 (шт./растение), масса ягоды I порядка – 27,0 (г), средняя масса ягоды – 15,5 (г), высота ягоды – 30,4 (мм), диаметр ягоды – 29,1 (мм), общая масса ягод – 592,1 (г/растение), плотность мякоти ягоды – 550 (г). По продуктивности и урожаю ягод среди остальных сортов группы заметно выделяется 'Вивальди', у которого данные показатели составили 60 шт./растение и 931,9 г/растение. Хорошие значения признаков продуктивности отмечены для сортов 'Магнус' (49 ягод на растение и 682,3 г/растение) и 'Лейтиция' (42 и 666,7 соответственно). Самыми крупными ягодами в кластере отличаются сорта итальянской селекции 'Аура' и 'Тея'; при массе ягоды I порядка 30,8 и 30,3 г их значения средней массы ягод составили 17,5 и 16,2 г соответственно; высота ягоды у данных сортов – 34,2 и 33,8 мм, диаметр – 32,4 и 31,8 мм.

Второй кластер включает сорта 'Джайв', 'Олимпия', 'Нелли', 'Флоренс', 'Кемия', 'Клери', 'Сирия', 'Хоней', 'Альба'. Средние величины изученных признаков превосходят первую группу по всем показателям, за исключением плотности мякоти ягоды. Указанные 9 сортов сформировали в среднем 58 ягод на растение, ягоды I порядка – массой 29,3 г, среднюю массу ягоды – 16,4 г, высоту и диаметр ягоды – 34,2 и 31,7 мм, биологический урожай ягод –

944,3 г. Плотность мякоти ягоды во втором кластере составила 440 г. Среди всех изученных 17 сортов земляники самой высокой продуктивностью отличаются сорта 'Хоней', 'Нелли', 'Сирия' и 'Флоренс', число ягод у них составило 83, 77, 75 и 62 шт./растение соответственно. Для них же отмечена самая высокая среди всех генотипов общая масса ягод (г/растение), превосходящая по данным исследований 1 кг: 1142,0; 1291,9; 1095,2 и 1127,8 г/растение. Высокими показателями продуктивности отличается также сорт 'Джайв' – 59 ягод и 913,2 г на растение. Наиболее высокие показатели массы ягод I порядка

и средней массы ягоды – у сортов 'Олимпия', 'Кемия', 'Флоренс' и 'Джайв'. Ягоды самого большого размера отмечены у сортов 'Олимпия' (длина и диаметр составляют 38,6 и 35,9 мм), 'Альба' (36,4 и 31,7 мм) и 'Кемия' (35,9 и 33,9 мм).

Достоверное превосходство сортов второй кластерной группы над первой по объединенному комплексному массиву учетных параметров обусловило целесообразность построения ранговых групп среди изученных сортов с использованием критерия наименьшей существенной разности $НСР_{05}$ и последующего нормирования средних значений признаков каждого отдельного сорта земляники по данному критерию. Значения $НСР_{05}$ при критерии Стьюдента t_{05} 1,96 по каждому признаку приводятся в таблице 1.

Таблица 1. Наименьшая существенная разность ($НСР_{05}$) для изученных признаков сортов земляники
Table 1. Least significant difference ($НСР_{05}$) for the studied characters of strawberry cultivars

Признак	Остаточный средний квадрат $mS_{ост.}$	Ошибка разности средних S_d	$НСР_{05}$
Число ягод (шт./растение)	264,52	13,27	26,0
Масса ягод I ^{го} порядка (г)	7,65	2,24	4,4
Средняя масса ягоды (г)	3,37	1,48	2,9
Высота ягоды (мм)	10,83	2,70	5,3
Диаметр ягоды (мм)	11,12	2,70	5,3
Биологический урожай (г/растение)	88712,66	243,21	476,7
Плотность мякоти ягоды (г)	5016,93	57,65	113,0

Для вычисления нормированного индексного показателя по каждому отдельному признаку использовалась следующая формула:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{НСР_{05}},$$

где I_i – нормированный индекс отбора по отдельному признаку;

x_i – среднее значение признака у отдельного сорта;

\bar{x} – среднее арифметическое значение признака по всем изученным сортам;

$НСР_{05}$ – наименьшая существенная разность по данному признаку.

Нормированные индексы признаков, вычисленные по формуле I_i , приводятся в таблице 2.

Наиболее высокие суммарные и средние значения нормированного индекса отмечаются для сортов 'Олимпия' (4,08 и 0,58), 'Нелли' (3,60 и 0,51), 'Флоренс' (2,26 и 0,32) и 'Кемия' (1,58 и 0,23); самые низкие – для сортов 'Магнус' (-3,84 и -0,55), 'Сибилла' (-3,66 и -0,52), 'Хоней' (-2,11 и -0,30) и 'Вивальди' (-2,05 и -0,29).

Отбор сортов земляники в соответствии с их производственной и коммерческой перспективой по общему объему хозяйственно ценных показателей предусматривал построение групп отбора, объединяющих изученные образцы с учетом наличия или отсутствия достоверных различий при попарном сравнении сортов друг с другом в модели теста Вилкоксона. Тест проводился на значениях полученных нормированных индексов. Пары изученных сортов, по которым были найдены достоверные различия, приводятся в таблице 3.

Главным условием формирования групп отбора выступало отсутствие достоверных парных различий среди сортов, входящих в одну группу.

Достоверность различий в 21 паре изученных образцов по учетным нормированным показателям согласно тесту Вилкоксона определила целесообразность построения диаграммы распределения средних значений индексов сортов земляники, графическое отображение которой представлено на рисунке 2.

Распределение средних значений нормированных индексов на плоскости показывает, что наиболее высокую хозяйственную перспективу имеют сорта 'Олимпия', 'Нелли', 'Флоренс' и 'Кемия'. Средние значения индексов у них превысили показатель 0,20 у. е. и составили 0,58; 0,51; 0,32 и 0,23 соответственно.

Хорошее производственное значение также представляют сорта 'Аура', 'Джайв', 'Альба' и 'Тея' с положительными средними значениями индексов 0,17; 0,17; 0,12 и 0,06.

Относительно невысоким уровнем хозяйственной ценности, соответствующей среднему нормированному индексу ниже нулевого значения, отличаются сорта 'Сирия', 'Лейтиция', 'Клери', 'Априка', 'Квики', 'Вивальди', 'Хоней', 'Сибилла' и 'Магнус'. Их нормированные показатели составили -0,01; -0,06; -0,08; -0,13; -0,28; -0,29; -0,30; -0,52 и -0,55.

Ряд сортов с отрицательными средними значениями нормированных индексов показали высокие положительные величины данного параметра по отдельным учетным признакам: по числу ягод и общей массе ягод – 'Хоней' (1,31 и 0,76), 'Сирия' (1,0 и 0,66), 'Вивальди' (0,42 и 0,32); по высоте ягоды – 'Клери' (0,45); по плотности мякоти ягоды – 'Априка' (0,71), 'Квики' (0,62), 'Лейтиция' (1,24), 'Сибилла' (0,88), 'Тея' (0,35).

Сочетание у одних и тех же изученных образцов земляники как положительных, так и отрицательных значений нормированных индексов отбора обусловило необходимость построения рангов сортов в соответствии с суммарными индексными значениями. Сорта и их ранги располагались в порядке убывания от большего к меньшему нормированному показателю. Результаты ранжирования представлены в таблице 4.

Во всех построенных рангах между сортами, вошедшими в них, достоверных парных различий по тесту Вилкоксона не наблюдалось, за исключением только одной пары: 'Вивальди' / 'Магнус' (см. табл. 3).

Таблица 2. Нормированные индексы изученных признаков сортов земляники**Table 2. Normalized indices of the studied characters of strawberry cultivars**

Сорт	Индексы признаков							Суммарный индекс сорта	Средний индекс сорта
	1	2	3	4	5	6	7		
Априка	-0,54	-0,20	-0,07	-0,28	-0,08	-0,47	0,71	-0,93	-0,13
Аура	-0,81	0,59	0,52	0,34	0,36	-0,60	0,80	1,20	0,17
Вивальди	0,42	-0,91	-0,14	-0,94	-0,62	0,32	-0,18	-2,05	-0,29
Джайв	0,38	0,34	-0,24	-0,04	0,21	0,28	0,27	1,20	0,17
Квики	-0,81	-0,11	-0,17	-0,30	-0,47	-0,71	0,62	-1,95	-0,28
Лейтиция	-0,27	-0,34	-0,14	-0,43	-0,23	-0,23	1,24	-0,40	-0,06
Магнус	0,00	-0,91	-0,76	-0,96	-0,66	-0,20	-0,35	-3,84	-0,55
Нелли	1,08	0,09	0,17	0,09	0,21	1,08	0,88	3,60	0,51
Олимпия	-0,54	1,36	0,72	1,17	1,02	-0,27	0,62	4,08	0,58
Сибилла	-0,81	-0,77	-0,76	-0,75	-0,64	-0,81	0,88	-3,66	-0,52
Тея	-0,54	0,48	0,07	0,26	0,25	-0,44	0,35	0,43	0,06
Клери	0,08	0,07	-0,31	0,45	-0,04	-0,04	-0,80	-0,59	-0,08
Альба	-0,19	0,14	0,48	0,75	0,23	-0,03	-0,53	0,85	0,12
Хоней	1,31	-1,11	-0,79	-0,42	-0,36	0,76	-1,50	-2,11	-0,30
Флоренс	0,50	0,61	0,72	0,36	0,58	0,73	-1,24	2,26	0,32
Кемия	-0,35	0,80	1,03	0,66	0,64	-0,05	-1,15	1,58	0,23
Сирия	1,00	-0,11	-0,52	-0,02	-0,47	0,66	-0,62	-0,08	-0,01

Примечание: 1 – число ягод (шт./растение); 2 – масса ягод I порядка (г); 3 – средняя масса ягоды (г); 4 – высота ягоды (мм); 5 – диаметр ягоды (мм); 6 – общая масса ягод (г/растение); 7 – плотность мякоти ягоды (г)

Note: 1 – number of berries (pcs. per plant); 2 – weight of the first-order berries (g); 3 – average berry weight (g); 4 – berry height (mm); 5 – berry diameter (mm); 6 – total berry weight (g per plant); 7 – berry pulp density (g)

Таблица 3. Достоверные парные различия между сортами земляники по нормированным индексам, согласно тесту Вилкоксона**Table 3. Significant paired differences among strawberry cultivars on the basis of normalized indices according to the Wilcoxon matched-pairs test**

Пары сортов	N	T	p-level
Априка / Нелли	7	0	0,018
Аура / Квики	7	0	0,028
Вивальди / Магнус	7	0	0,028
Вивальди / Нелли	7	0	0,018
Джайв / Магнус	7	0	0,018
Квики / Нелли	7	0	0,018
Лейтиция / Сибилла	7	0	0,018
Нелли / Магнус	7	0	0,018
Нелли / Сибилла	7	0	0,028
Нелли / Сирия	7	0	0,018

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Пары сортов	N	T	p-level
Олимпия / Квики	7	0	0,028
Олимпия / Тея	7	0	0,028
Априка / Олимпия	7	1	0,046
Априка / Сибилла	7	1	0,028
Аура / Олимпия	7	1	0,028
Аура / Сибилла	7	1	0,046
Нелли / Хоней	7	1	0,028
Олимпия / Сибилла	7	1	0,028
Джайв / Сибилла	7	2	0,043
Лейтиция / Нелли	7	2	0,043
Магнус / Флоренс	7	2	0,043

Примечание: N – число наблюдений по каждому сорту; T – критерий суммы рангов Вилкоксона; p-level – уровень значимости различий

Note: N – number of values for each cultivar; T – Wilcoxon rank-sum test; p-level – the significance level of differences



Рис. 2. Диаграмма распределения нормированных индексов сортов земляники

Fig. 2. Diagram showing distribution of normalized indices for strawberry cultivars

Таблица 4. Ранжирование сортов земляники по суммарным нормированным индексам

Table 4. Ranking of strawberry cultivars according to the summed normalized indices

Ранг	Сорта	Интервал индексов
1	Олимпия, Нелли, Флоренс, Кемия	4,08...1,58
2	Аура, Джайв, Альба, Тея	1,20...0,43
3	Сирия, Лейтиция, Клери, Априка	-0,08...-0,93
4	Квики, Вивальди, Хоней, Сибилла, Магнус	-1,95...-3,84

Значительный промышленный и рыночный интерес имеют сорта, составившие первый ранг – ‘Олимпия’, ‘Нелли’, ‘Флоренс’, ‘Кемия’.

Сорта второго ранга – ‘Аура’, ‘Джайв’, ‘Альба’ и ‘Тей’ – также могут представлять ценность для промышленного и частного садоводства.

Превышающие нулевое значение суммарные нормированные индексы сортов 1-го и 2-го рангов соответствуют комплексному сочетанию высоких показателей изученных хозяйственно ценных признаков.

Сорта земляники, вошедшие в последние 3-й и 4-й ранги, отличаются суммарными индексными значениями ниже нулевого по комплексу хозяйственно-биологических характеристик промышленного уровня, хотя и могут иметь высокие значения отдельных признаков продуктивности и качества ягод.

Совместное использование кластерного анализа по методу Уорда, нормирующего преобразования исходных данных в соответствии с показателем наименьшей существенной разности НСР₀₅ теста Вилкоксона на значениях нормированных индексов и графического распределения сортов по указанным индексам позволило провести отбор сортов земляники, отличающихся лучшими для производства сочетаниями учтенных признаков.

Большая часть сортов (6 из 8), отобранных в соответствии с положительными суммарными нормированными индексами (см. табл. 4), вошла в состав второй группы, построенной в результате кластерного анализа (см. рис. 1), что свидетельствует в пользу целесообразности сочетания процедур многомерной математической статистики и методов ранжирования с учетом преобразования исходных данных для отбора лучших образцов по комплексу признаков.

Сопоставляя состав второго кластера (см. рис. 1) с диаграммой распределения (см. рис. 2) и результатами ранжирования сортов по суммарным значениям нормированных индексов (см. табл. 4), в качестве лучших из 17 изученных выделены сорта земляники ‘Олимпия’, ‘Нелли’, ‘Флоренс’, ‘Кемия’, ‘Джайв’ и ‘Альба’.

Заключение

Сочетание иерархической кластеризации и теста Вилкоксона на данных нормированных индексов позволило выделить наиболее перспективные в рыночном и производственном отношении сорта земляники, сочетающие в себе комплекс хозяйственно ценных признаков продуктивности и качества ягод: ‘Олимпия’, ‘Нелли’, ‘Флоренс’, ‘Кемия’, ‘Джайв’ и ‘Альба’.

References / Литература

Barth E., de Resende J.T.V, Moreira A.F.P., Marigule K.H., Zeist A.R., Silva M.B. et al. Selection of experimental hybrids of strawberry using multivariate analysis. *Agronomy*. 2020;10(4):598. DOI: 10.3390/agronomy10040598

Chandler C.K., Folta K., Dale A., Whitaker V.M., Herrington M. Strawberry. In: M.L. Badenes, D.H. Byrne (eds). *Fruitbreeding*. New York, NY: Springer; 2012. p.305-325.

Fadeeva T.S. Strawberry genetics (Genetika zemlyaniki). Leningrad: Leningrad State University; 1975. [in Russian] (Фадеева Т.С. Генетика земляники. Ленинград: Ленинградский государственный университет; 1975).

Faedi W., Baruzzi G. References. Strawberry breeding. In: A. Husaini, D. Nari (eds). *Strawberry: Growth, Development and Diseases*. Wallingford: CABI; 2016. p.26-37.

Gauch H.G. Jr. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Science; 1992.

Hancock J.F., Sjulín T.M., Lobos G.A. Strawberries. In: J.F. Hancock (ed.). *Temperate Fruit Crop Breeding: Germplasm to Genomics*. Dordrecht: Springer; 2008. p.393-438.

Iglesias J.E., Pecharrómán C. Scaling the h-index for different scientific ISI fields. *Scientometrics*. 2007;73(3):303-320. DOI: 10.1007/s11192-007-1805-x

Klyushnikova E.V., Shitova E.M. Methodological approaches to calculation of integral index, ranking methods. *Electronic Journal "InnoCentre"*. 2016;1(10):4-18. [in Russian] (Клюшников Е.В., Шитова Е.М. Методические подходы к расчету интегрального показателя, методы ранжирования. *Электронный научно-практический журнал «ИнноЦентр»*. 2016;1(10):4-18). URL: [http://innoj.tversu.ru/Vipusk1\(10\)2016/2%20-%20Клюшников.pdf](http://innoj.tversu.ru/Vipusk1(10)2016/2%20-%20Клюшников.pdf) [дата обращения: 09.02.2022].

Koyama R., Isibashi M., Fukuda I., Okino A., Osawa R., Uno Y. Pre- and post-harvest conditions affect polyphenol content in strawberry (*Fragaria × ananassa*). *Plants*. 2022;11(17):2220. DOI: 10.3390/plants11172220

Lakin G.F. Biometrics (Biometriya). Moscow; 1990. [in Russian] (Лакин Г.Ф. Биометрия. Москва; 1990).

Mandel I.D. Cluster analysis (Klasterny analiz). Moscow; 1988. [in Russian] (Мандель И.Д. Кластерный анализ. Москва; 1988).

Mozūraitis R., Hall D., Trandum N., Ralle B., Tunström K., Sigsgaard L. et al. Composition of strawberry floral volatiles and their effects on behavior of strawberry blossom weevil, *Anthonomus rubi*. *Journal of Chemical Ecology*. 2020;46(11-12):1069-1081. DOI: 10.1007/s10886-020-01221-2

Organization of technological processes in industrial fruit growing (North Caucasian region of the Russian Federation). Guidelines (Organizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v promyshlennom plodovodstve [Severo-Kavkazskiy region Rossiyskoy Federatsii]. Metodicheskiye rekomendatsii). Krasnodar: North Caucasian Research Institute of Horticulture and Viticulture; 2016. [in Russian] (Организация технологических процессов в промышленном плодоводстве (Северо-Кавказский регион Российской Федерации). Методические рекомендации. Краснодар: СКЗНИИСИВ; 2016).

Pacheco R.M., Duarte J.B., Vencovsky R., Pinheiro J.B., Oliveira A.B. Use of supplementary genotypes in AMMI analysis. *Theoretical and Applied Genetics*. 2005;110(5):812-818. DOI: 10.1007/s00122-004-1822-6

Schattman R.E., Smart A., Birkel S., Jean H., Barai K., Zhang Y.J. Strawberry growth under current and future rainfall scenarios. *Water*. 2022;14(3):313. DOI: 10.3390/w14030313

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).

Sharma S.P., Sharma N. Evaluation of strawberry cultivars for growth and yield characteristics in plain region of Chattisgarh, India. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018;7(2):2835-2840. DOI: 10.20546/ijcmas.2018.702.345

Snegireva M.S. Fractality of the species structure of parasitic communities of small mammals, reptiles, and insects (Fraktalnost vidovoy struktury parazitarnykh soobshchestv melkikh mlekopitayushchikh, reptilii y nasekomykh)

- [dissertation]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University; 2010. [in Russian] (Снегирева М.С. Фрактальность видовой структуры паразитарных сообществ мелких млекопитающих, рептилий и насекомых: дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет; 2010).
- Vieira S.D., de Souza D.C., Martins I.A., Ribeiro G.H.M.R., Resende L.V., Ferraz A.K.L. et al. Selection of experimental strawberry (*Fragaria × ananassa*) hybrids based on selection indices. *Genetics and Molecular Research*. 2017;16(1):gmr16019052. DOI: 10.4238/gmr16019052
- Zubov A.A. Theoretical foundations of strawberry breeding (Teoreticheskiye osnovy selektsii zemlyaniki). Michurinsk; 2004. [in Russian] (Зубов А.А. Теоретические основы селекции земляники. Мичуринск; 2004).

Информация об авторах

Вадим Игоревич Лапшин, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, lavai@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9343-1082>

Валентина Владимировна Яковенко, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, yakovenko_valent@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4075-2130>

Information about the authors

Vadim I. Lapshin, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, lavai@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9343-1082>

Valentina V. Yakovenko, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, yakovenko_valent@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4075-2130>

Вклад авторов: Лапшин В.И. – 60%. Яковенко В.В. – 40%.

Contribution of the authors: Lapshin V.I. – 60%. Yakovenko V.V. – 40%.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 14.02.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 14.02.2023; approved after reviewing on 19.06.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.11:631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-70-78



Показатели экологической изменчивости у сортов яровой мягкой пшеницы в условиях Тюменской области

В. В. Новохатин¹, Е. В. Зуев², Т. В. Шеломенцева¹, Т. А. Леонова¹

¹ Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья, Тюменская область, Россия

² Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Евгений Валерьевич Зуев, ezuev@vir.nw.ru

Актуальность. В НИИСХ Северного Зауралья основным направлением селекции яровой мягкой пшеницы остается выделение нового исходного материала и создание сортов с улучшенными хозяйственными признаками, повышенной устойчивостью к биотическим и абиотическим факторам среды. Также селекционеры уделяют большое внимание экологической пластичности создаваемых сортов, которые минимально снижают урожайность при неблагоприятных условиях.

Материал и методы. Изучение 362 образцов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР проводили на опытном поле НИИСХ Северного Зауралья в 2011–2016 гг. в контрастных климатических условиях. По комплексу хозяйственно ценных признаков выделено 30 среднеранних и среднеспелых генотипов. Экспериментальные данные обработаны методами математической статистики. Рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции, индексы условий среды (Ii), показатель пластичности (bi), размах урожайности (d, %), гомеостатичность (H-st), гомеостаз (Hom), коэффициент отзывчивости (Kp).

Результаты. Установлено, что сорта с высокой потенциальной урожайностью, пластичностью и сильной реакцией на изменение условий среды: 'Алтайская 110' (к-65128), 'Башкирская 28' (к-64852), 'АС Pollet' (к-64975), 'Челяба 75' (к-64871), 'Aletch' (к-65011), 'Струна Мироновская' (к-65016) рекомендуются для селекции интенсивных сортов. Образцы с небольшими величинами пластичности и менее выраженными показателями экологической изменчивости, выносливые к ухудшению условий среды: 'Тарская 10' (к-64996), 'ФПЧ-Ррpd-0s' (к-65123), 'Новосибирская 44' (к-64867) возможно использовать для создания климатоустойчивых сортов.

Заключение. Для предварительной оценки сортов по изменчивости урожайности следует использовать показатели: U_{max} , d , V , K_p , положительно сопряженные между собой и дающие довольно значимую информацию. Взаимодополняемые показатели: bi , S^2di ; и $H-st$, Hom , сопряженные между собой положительно, имеющие разнонаправленное действие, эффективны при комплексной оценке сортов по экологической изменчивости.

Ключевые слова: пшеница, урожайность, экологическая изменчивость, сопряженность

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 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» и по теме НИИСХ Северного Зауралья «Управление селекционным процессом создания новых генотипов культурных растений с высокоценными признаками продуктивности и качества, устойчивости к био- и абиострессорам; методы и способы реализации генетического потенциала новых генотипов сельскохозяйственных, лекарственных и ароматических культур», рег. № НИОКТР 121041600036-6.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Новохатин В.В., Зуев Е.В., Шеломенцева Т.В., Леонова Т.А. Показатели экологической изменчивости у сортов яровой мягкой пшеницы в условиях Тюменской области. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2023;184(3):70-78. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-70-78

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-70-78

Indicators of environmental variability in spring bread wheat cultivars under the conditions of Tyumen ProvinceVladimir V. Novokhatin¹, Evgeny V. Zuev², Tatyana V. Shelomentseva¹, Tatyana A. Leonova¹¹ 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, Russia² N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia**Corresponding author:** Evgeny V. Zuev, ezuev@vir.nw.ru

Background. Among wheat breeding trends, the Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region prioritizes selection of new source material and development of cultivars with improved agronomic traits and higher resistance to biotic and abiotic environmental stressors. The breeders also pay attention to environmental plasticity of the cultivars.

Materials and methods. A field study of 362 spring bread wheat accessions from VIR was performed in the fields of the Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region in 2011–2016 under contrasting climate conditions. Thirty genotypes were identified for a set of useful agronomic traits. The data were processed using mathematical statistics methods. Rank correlation coefficients, plasticity indices (bi), yield ranges (d, %), homeostaticity (H-st), homeostasis (Hom), and responsiveness coefficients (Kp) were calculated.

Results. It was established that cultivars with potentially high yield, plasticity, and strong response to changing environmental conditions: 'Altaiskaya 110' (k-65128), 'Bashkirskaya 28' (k-64852), 'AC Pollet' (k-64975), 'Chelyaba 75' (k-64871), 'Aletch' (k-65011), and 'Struna Mironovskaya' (k-65016), may be recommended for breeding intensive cultivars. Accessions with low levels of plasticity and less pronounced environmental variability indices, but tolerant to deteriorated environmental conditions: 'Tarskaya 10' (k-64996), 'FPCh-Ppd-0s' (k-65123), and 'Novosibirskaya 44' (k-64867), can be used to produce climate-resistant cultivars.

Conclusion. The Ymax, d, V and Kp indicators should be applied for preliminary assessment of cultivars for yield variability, as they are positively correlated to each other and provide quite significant information. Such complementary indicators as bi and S²di, H-st and Hom, positively associated with each other and having a multidirectional effect, are effective for comprehensive assessment of cultivars for environmental variability.

Keywords: wheat, yield, environmental variability, contingency

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the State Tasks according to the theme plans of VIR, Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production", and the topic assigned to the Research Institute of Agriculture for the Northern Trans-Ural Region "Management of the breeding process in the development of new crop genotypes with highly valuable traits of productivity and quality, and resistance to bio- and abiostressors; methods and means of implementing the genetic potential of new genotypes of agricultural, medicinal and aromatic crops", reg. No. NIOKTR 121041600036-6.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Novokhatin V.V., Zuev E.V., Shelomentseva T.V., Leonova T.A. Indicators of environmental variability in spring bread wheat cultivars under the conditions of Tyumen Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023; 184(3):70-78. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-70-78

Введение

Контрастные агроклиматические условия Северного Зауралья сочетают в себе ежегодно проявляющуюся раннелетнюю засуху (сибирский тип) с обильными июльскими осадками и часто повторяющейся прохладной, увлажненной погодой в период налива и созревания зерна, приводящей к затягиванию вегетации и предуборочному прорастанию его в колосе. Наряду с этим, часто проявляются кратковременные засухи и во второй половине вегетации. В связи с этим создаваемые сорта должны сочетать в себе выносливость и устойчивость к абиотическим факторам среды (Novokhatin, 2015). При этом успех селекции полностью зависит от исходного материала и научно-обоснованного подбора родительских пар (Novokhatin et al., 2022). Это позволяет создавать исходный материал с проявлением трансгрессивных форм хорошей адаптивности. При испытании сортов в разных агроклиматических условиях на величину урожая влияют факторы среды. Причем факторы, находящиеся как в минимуме, так и в максимуме, имеют лимитирующее значение для растений (Acci, 1959). Смена спектров экспрессирующихся генов при изменении лимитирующих факторов среды приводит к ранговому изменению сортов (Dragavtsev et al., 1984) и понимается как адаптация – один из основных факторов эволюционного процесса (Yakushev et al., 2015). При этом следует учитывать, что адаптивность сорта во многом обусловлена его экологической пластичностью (Zhuchenko, 1988), то есть гомеостатичностью (стабильностью) урожаев по годам. Стабильность позволяет сорту сочетать высокий потенциал урожайности с минимальным ее снижением при неблагоприятных условиях (Golovochenko, 2001) и обычно измеряется дисперсиями разной направленности (Eberhart, Russel, 1966; Dragavtsev et al., 2012). Пластичность и стабильность сопряжены между собой и являются неотъемлемым свойством адаптивности (Zykin et al., 2000). Последняя связана с гомеостазом, поддерживающим постоянство генотипа (Khangildin, 1976).

Целью исследований было выявление отличительных особенностей формирования урожая сортов мягкой яровой пшеницы из коллекции ВИР в различных погодных условиях на основании показателей экологической изменчивости разнонаправленного действия.

Данная публикация является продолжением статьи, опубликованной в журнале «Вестник Российской сельскохозяйственной науки» (Novokhatin et al., 2022).

Материал, методика и условия проведения исследований

В 2011–2016 гг. в контрастных погодных условиях изучено 362 образца яровой мягкой пшеницы различного эколого-географического происхождения из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР). Из изучаемого набора были выделены 30 среднеранних и среднеспелых сортов по продуктивности и комплексу хозяйственно ценных признаков, которые рассмотрены в данной работе.

Исследования проводились на опытном поле НИИ сельского хозяйства Северного Зауралья, на темно-серой почве, по черному удобренному пару, по принятой в зоне агротехнике. Площадь делянки – 3 м², повторность однократная. Стандартом служил сорт 'Лютесценс 70' (к-62201), который размещался через 10 номеров. Посев

проводили в оптимальные сроки порционной сеялкой СКС-6-10 при норме высева – 600 всхожих зерен/м².

Учеты и наблюдения проводили по методике ВИР (Merezhko et al., 1999). Структурный анализ проводился по 20 растениям каждого сорта, взятым из пробных площадей. Годы исследований значительно различались по погодным условиям. Остро засушливым был 2012 год – за вегетацию выпало 93 мм осадков при норме 243 мм (ГТК = 0,44); 2015 г. был средnezасушливым (ГТК = 0,62); остальные – увлажненные (ГТК = 1,18...1,46). Экспериментальные данные обработаны дисперсионным анализом и методами математической статистики (Dospekhov, 2014). Коэффициенты ранговой корреляции рассчитаны по Спирману (Zaitsev, 1984); индексы условий среды (Ii) в разрезе генотипов – показатель пластичности (bi) выражены через коэффициент регрессии, показатель стабильности (S²di) – через показатель дисперсии (Eberhart, Russel, 1966) в изложении Р. А. Уразалиева (Urazaliev, 1985). Рассчитаны также: размах урожайности (d, %) (Zykin et al., 2000), гомеостатичность (H-st) и гомеостаз (Hom) (Khangildin, 1976, 1979). Коэффициент отзывчивости (Kp) определялся отношением максимальной продуктивности, полученной при оптимальных условиях возделывания (max), к минимальной величине (min), полученной в засушливых условиях.

Результаты и обсуждение

По результатам изучения было установлено, что урожайность образцов яровой мягкой пшеницы в годы исследований сильно варьировала по годам. В то же время варьирование средней урожайности было всего 12,4% (табл. 1). Поэтому оценка урожайности сортов по средним показателям не дает объективной характеристики их изменчивости.

Средняя урожайность образцов в опыте была 280 г/м², у стандарта 'Лютесценс 70' – 251 г/м² (Sx = 6,1 г/м²) (см. табл. 1). Меньшая средняя урожайность была у сортов к-65089 (Алжир) – 213 г/м², 'ФПЧ-Ррр-0s' (к-65123) – 223 г/м², 'Новосибирская 44' (к-64867) – 225 г/м² и 'India 288' (к-65116) – 234 г/м². Более выраженный показатель минимального значения урожайности указывает на адаптивность образца к данным условиям среды. В этом отношении следует обратить внимание на сорта: 'Челяба Степная' (к-64872), 'Струна Мироновская' (к-65016), 'Тарская 10' (к-64996), 'Aletch' (к-65011), урожайность которых была соответственно 254 г/м², 205 г/м², 222 г/м², 200 г/м². Образцы 'Сибирская 14' (к-64989), 'Башкирская 28' (64852), 'Серебристая' (к-64994), 'Новосибирская 44', 'India 288', 'Срібнянка' (к-65148), местный (к-65089), 'PS 136' (к-64895), 'Маргарита' (к-64851) с наименьшими значениями минимальной урожайности (88–135 г/м²) мало пригодны для местных условий. Высокой потенциальной урожайностью (508–653 г/м²) характеризуются сорта: 'Алтайская 110' (к-65128), 'Башкирская 28', 'AC Pollet' (к-64975), 'Челяба 75' (к-64871), 'Aletch', 'Струна Мироновская', 'Jasna' (к-64982); у стандартного сорта 'Лютесценс 70' этот показатель составил 320 г/м². Данную особенность высокоурожайных сортов следует учитывать при подборе родительских пар для гибридизации.

Однако более полная оценка сортообразцов дается при анализе их урожайности по экологическим показателям: изменчивости, пластичности и стабильности. Так, интенсивные сорта: 'Башкирская 28', 'Челяба 75', 'AC Pollet', 'Jasna', 'Aletch', 'Струна Мироновская' при довольно выраженной потенциальной урожайности (526–653 г/м²)

Таблица 1. Изменчивость урожайности сортов яровой мягкой пшеницы
(НИИСХ Северного Зауралья, 2011–2016 гг.)

Table 1. Yield variability in spring bread wheat cultivars (RIA of the Northern Trans-Ural Region, 2011–2016)

№ по каталогу ВИР	Название, происхождение	Урожайность, г/м ²			bi	S ² di	d,%	V,%	H-st	Hom	Kp
		Хср.	min	max							
64851	Маргарита, Ульяновская обл.	279	135	375	0,70	82,8	64,0	29,6	3,91	0,94	2,8
64852	Башкирская 28, Башкортостан	261	100	534	1,70	158,7	81,2	60,9	0,99	0,42	5,3
64863	Дуэт Черноземья, Белгородская обл.	295	202	436	1,09	91,9	53,7	31,1	4,05	0,95	2,2
64867	Новосибирская 44, Новосибирская обл.	225	120	307	0,48	62,4	60,5	27,7	4,34	0,81	2,6
64871	Челяба 75, Челябинская обл.	283	183	621	1,80	168,7	70,5	59,7	1,08	0,47	3,4
64872	Челяба Степная, Челябинская обл.	306	254	473	0,91	86,3	46,3	28,2	4,95	1,08	1,9
64878	Соановская 4, Новосибирская обл.	291	142	490	1,54	146,9	71,0	50,5	1,66	0,58	3,4
64891	PS 90, неизвестно	294	156	357	0,63	74,6	56,3	25,4	5,76	1,16	2,3
64893	PS 87, неизвестно	299	180	480	1,20	116,2	62,5	38,9	2,56	0,77	2,7
64895	PS 136, неизвестно	249	135	396	1,24	97,9	65,9	30,3	2,43	0,82	2,9
64975	AC Pollet, Канада	279	140	526	1,96	163,7	72,0	58,6	1,23	0,45	3,8
64976	CDC Merlin, Канада	265	175	383	0,86	78,4	54,3	29,5	4,31	0,90	2,2
64980	AC Corinne, Канада	285	149	460	0,93	125,3	67,6	44,0	2,08	0,65	3,1
64982	Jasna, Польша	337	185	653	1,86	186,6	71,7	55,4	1,30	0,61	3,5
64989	Сибирская 14, Новосибирская обл.	318	88	487	1,69	144,5	81,6	45,5	1,75	0,69	5,5
64994	Серебристая, Омская обл.	269	107	435	0,85	135,9	75,4	50,6	4,36	0,53	4,1
64996	Тарская 10, Омская обл.	279	222	330	0,37	44,0	32,7	15,8	4,69	1,76	1,5
64997	Воевода, Саратовская обл.	259	150	365	0,60	85,7	58,9	32,9	3,66	0,78	2,4
65005	AC Gabriel, Канада	339	153	451	1,29	110,5	66,0	32,6	3,49	1,04	2,9
65011	Aletch, Чехия	324	200	628	1,70	157,8	68,1	48,6	1,55	0,67	3,1
65016	Струна Мироновская, Украина	321	205	653	2,01	170,1	68,6	53,0	1,35	0,61	3,2
65089	местный, Алжир	213	132	357	0,60	78,7	63,0	36,9	2,56	0,58	2,7
65116	India 288, Индия	234	124	303	0,76	73,8	59,1	31,6	4,14	0,74	2,4
65123	ФПЧ-Ppd-0s, Ленинградская обл.	223	175	267	0,38	41,1	34,4	18,4	13,1	1,21	1,5
65128	Алтайская 110, Алтайский край	308	150	508	1,51	120,3	70,5	39,0	2,20	0,79	3,4

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР	Название, происхождение	Урожайность, г/м ²			bi	S ² di	d,%	V,%	H-st	Hom	Kp
		Хср.	min	max							
65132	Памяти Вавенкова, Новосибирская обл.	274	185	378	0,92	67,4	51,6	24,2	5,77	1,13	2,0
65142	Тюменская 28, Тюменская обл.	261	180	300	0,79	51,0	40,0	19,6	11,1	1,33	1,7
65143	Челяба Золотистая, Челябинская обл.	319	150	430	0,82	98,5	65,1	30,9	12,75	1,03	2,9
65148	Срібнянка, Украина	247	130	390	0,65	94,8	66,7	38,3	2,48	0,64	3,0
65151	Торчинська, Украина	322	177	419	0,93	87,6	58,0	27,2	4,87	1,18	2,4
62201	Лютесценс 70 (стандарт)	251	175	320	0,89	64,0	55,7	31,1	3,16	0,81	2,3
	x _{ср.}	280									
	Sx	6,1									
	Sx,%	2,2									
	V,%	12,4									

Примечания: bi – коэффициент регрессии (пластичность); S²di – стабильность; d – размах изменчивости; V, % – варьирование; H-st – гомеостатичность; Hom – гомеостаз; Kp – коэффициент отзывчивости.

Жирным шрифтом выделены сорта, включенные в гибридизацию в НИИСХ Северного Зауралья

Notes: bi – regression coefficient (plasticity); S²di – stability; d – range of variability; V, % – variation; H-st – homeostaticity;

Hom – homeostasis; Kp – responsiveness coefficient.

The cultivars included in hybridization are boldfaced

имеют высокие показатели изменчивости на условия среды (bi = 1,69–2,01). Линии регрессии этих сортов идут по отношению к оси ординат под довольно крутым углом – 59–63° (рисунок) и показывают выраженную реакцию на изменение условий вегетации (Kp = 3,2–5,5). При этом просматривается нестабильность проявления урожая (S²di = 144,5–186,6) и, как следствие, большой их размах урожайности (d = 68,1–81,2%) при высоком коэффициенте вариации (V = 45,5–60,9%) и невысоких показателях гомеостатичности (H-st = 0,99–1,75) и гомеостаза (Hom = 0,42–0,69) (см. табл. 1.) Все это указывает на их ограниченную адаптивность к местным агроклиматическим условиям. Эти сорта следует использовать в селекции, направленной на создание интенсивных сортов для возделывания с благоприятными климатическими условиями и оптимальными технологиями возделывания.

Довольно выраженная пластичность (bi = 1,06–1,51), наклон линий регрессии под 46–56°, отмечена для сортов: 'Дуэт Черноморья' (к-64863), 'PS 87' (к-64893), 'PS 136', 'AC Gabriel' (к-65005), 'Алтайская 110' (см. табл. 1). У этих образцов лучше показатели стабильности урожая (S²di = 91,0–120,3), небольшое варьирование и высокая максимальная урожайность (396–508 г/м²), хорошие показатели гомеостатичности (H-st = 2,20–4,05), гомеостаза (Hom = 0,77–1,04) и коэффициента отзывчивости (Kp = 2,0–3,4). Аналогичные показатели экологической изменчивости характерны для сортов 'Челяба Степная', 'CDC Merlin', 'India 288', 'Памяти Вавенкова' (к-65132), 'Торчинська' (к-65151) (см. табл. 1). Все вышеперечисленные

сорта рекомендованы в качестве исходного материала для селекции на продуктивность и интенсивность.

Сопряженность экологических показателей позволяет выявить наиболее информативные, а также определить идентичность оценок отдельных из них, так как они неоднозначны в своей информативности. Так, сопряженность средних урожаев положительная с максимальным их проявлением (r = 0,663) (табл. 2). Более урожайные сорта имеют меньшее проявление этих показателей. Средняя урожайность положительно коррелирует с показателем пластичности bi (r = 0,588), стабильности S²di (r = 0,301) и варьированием – V, % (r = 0,547). В то же время минимальные значения урожаев достоверно отрицательно сопряжены со стабильностью урожайности S²di (r = –0,609), коэффициентом отзывчивости Kp (r = –0,631) и незначительно положительно с гомеостазом Hom (r = 0,492). Это подтверждает ранее сказанное, что образцы с резко сниженной минимальной урожайностью бесперспективны для селекции. Коэффициенты корреляции максимального проявления урожаев с данными показателями имеют такую же направленность, как и со средней урожайностью, но в данном случае они более значимы и отрицательно коррелируют с гомеостатичностью и гомеостазом (r = –0,605 и r = –0,574). При этом между максимальным проявлением урожайности и ее минимальным значением корреляция отсутствует, что следует учитывать при ведении отборов.

Из-за наличия довольно значительной положительной сопряженности эколого-генетических показателей:

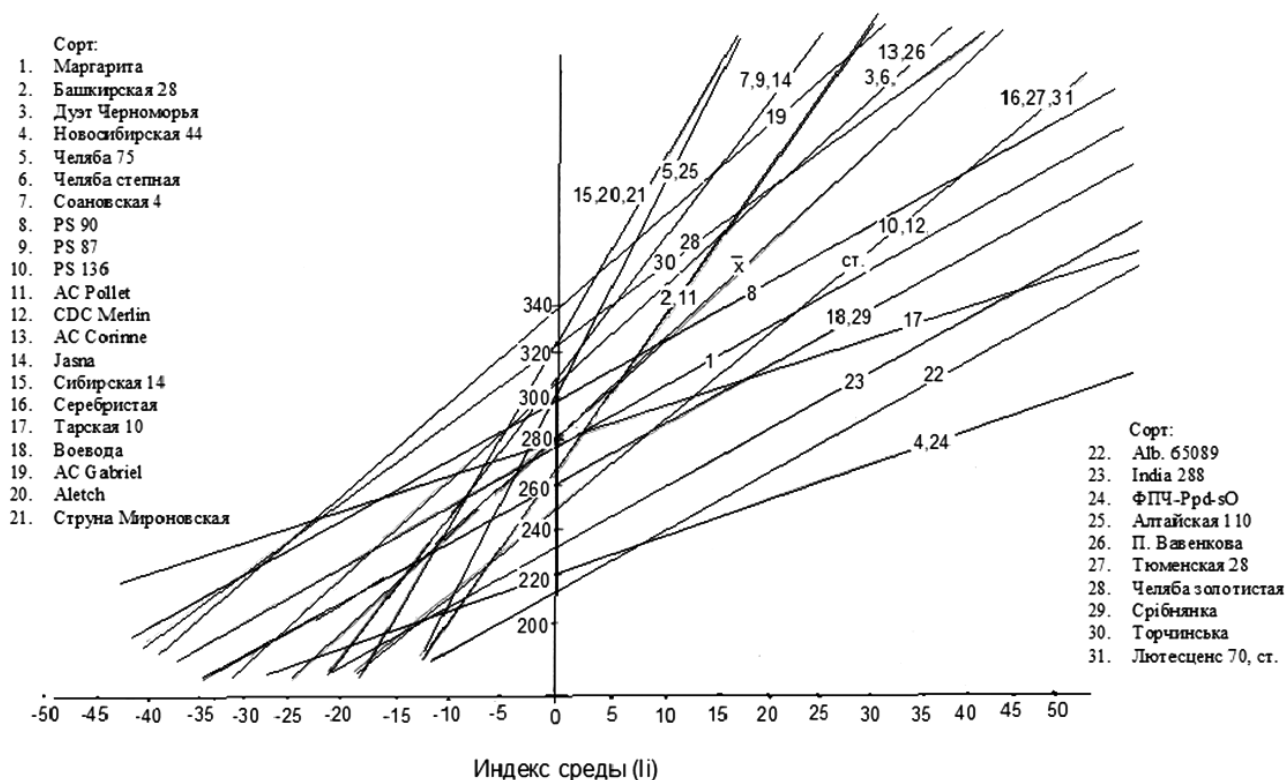


Рисунок. Пластичность урожаев образцов яровой мягкой пшеницы (НИИСХ Северного Зауралья, 2011–2016 гг.)

Figure. Yield plasticity in spring bread wheat accessions (RIA of the Northern Trans-Ural Region, 2011–2016)

Таблица 2. Коэффициенты парной корреляции урожайности и параметры экологической изменчивости (НИИСХ Северного Зауралья, 2011–2016 гг.)

Table 2. Pairwise correlation coefficients of yield and environmental variability parameters (RIA of the Northern Trans-Ural Region, 2011–2016)

Показатели	x_{cp}	min	max	bi	S^2di	d	V,%	H-st	Hom	Kp
x_{cp}		0,333	0,663*	0,588*	0,301	0,287	0,547*	-0,191	0,044	0,264
min	0,333		0,183	-0,013	-0,609*	-0,283	-0,147	0,169	0,492*	-0,631*
max	0,663*	0,183		0,922*	0,637*	0,827*	0,924*	-0,605*	-0,574*	0,578*
bi	0,588*	-0,013	0,922*		0,711*	0,839*	0,930*	-0,646*	-0,623*	0,681*
S^2di	0,301	-0,609*	0,637*	0,711*		0,838*	0,818*	-0,652*	-0,844*	0,908*
d	0,287	-0,283	0,827*	0,839*	0,838*		0,948*	-0,679*	-0,873*	0,808*
V,%	0,547*	-0,147	0,924*	0,930*	0,818*	0,948*		-0,648*	-0,744*	0,782*
H-st	-0,191	0,169	-0,605*	-0,646*	-0,652*	-0,679*	-0,648*		0,643*	-0,554*
Hom	0,044	0,492*	-0,574*	-0,623*	-0,844*	-0,873*	-0,744*	0,644*		-0,723*
Kp	0,264	-0,631*	0,578*	0,681*	0,908*	0,808	0,782*	-0,554*	-0,723*	

Примечание: * – порог достоверности при $r \geq 0,355$. Описание показателей см. табл. 1

Note: * – statistically significant at $r \geq 0.355$. For the description of the indicators, see Table 1

пластичности (bi) со стабильностью – S^2d ($r = 0,711$), гомеостатичности и гомеостаза ($r = 0,643$), которые во многом взаимодополняемые и имеют схожую разнонаправленную сопряженность с другими показателями изменчивости, их следует использовать при комплексной оценке сортов по экологической изменчивости урожайности.

Также установлено, что составляющие размаха изменчивости (d) имеют сходство с показателями: Умах, V, Кр, что подтверждают высокие положительные корреляции – $r = 0,808...0,948$.

Заключение

Изучение выделенных в Северном Зауралье сортов из коллекции ВИР показывает по многим показателям их различную изменчивость проявления урожайев. В скрещивания включены 13 образцов (см. табл. 1) для создания интенсивных, продуктивных и климатоустойчивых сортов яровой мягкой пшеницы.

Показано, что для предварительной оценки сортов по изменчивости урожайности следует использовать показатели: Умах, d, V, Кр, положительно сопряженные между собой, несложные в расчетах и дающие довольно значимую информацию.

Взаимодополняемые показатели: bi, S^2di ; и H-st, Hom, сопряженные между собой положительно, имеющие разнонаправленное действие, эффективны при комплексной оценке сортов по экологической изменчивости.

References / Литература

Acci D. Agricultural ecology. (Selskokhozyaystvennaya ekologiya). Moscow: Foreign Literature; 1959. [in Russian] (Ацци Д. Сельскохозяйственная экология. Москва: Иностранная литература; 1959).

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).

Dragavtsev V.A., Makarova G.A., Kochetov A.A., Mirskaya G.V., Sinyavina N.G. Proximate estimation of genotypic and genetic (additive) variances of plant productivity traits. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2012;16(2):427-436. [in Russian] (Драгавцев В.А., Макарова Г.А., Кочетов А.А., Мирская Г.В., Синявина Н.Г. Новые подходы к экспериментальной оценке генотипической и генетической (аддитивной) дисперсии свойств продуктивности растений. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2012;16(2):427-436).

Dragavtsev V.A., Zilke V.A., Reyter B.G., Vorobyev V.A., Dubrovskaya A.G., Korobeynikov N.I., Novokhatin V.V., Maksimenko V.P., Babakishiev A.G., Plyushchenko V.G., Kalashnik N.A., Zuykov Yu.P., Fedotov A.M. Genetics of productivity traits in spring wheat in Western Siberia (Genetika priznakov produktivnosti yarovoy pshenitsy v Zapadnoy Sibiri). Novosibirsk: Nauka; 1984. [in Russian] (Драгавцев В.А., Цильке В.А., Рейтер Б.Г., Воробьев В.А., Дубровская А.Г., Коробейников Н.И., Новохатин В.В., Максименко В.П., Бабакишиев А.Г., Илющенко В.Г., Калашник Н.А., Зуйков Ю.П., Федотов А.М. Генетика признаков продуктивности яровой пшеницы в Западной Сибири. Новосибирск: Наука; 1984).

Eberhart S.A., Russell W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 1966;6(1):36-40. DOI: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x

Golovochnenko A.P. Features of adaptive breeding of spring bread wheat in the forest-steppe zone of the Middle Volga region (Osobennosti adaptivnoy seleksii yarovoy myagkoy pshenitsy v lesostepnoy zone srednego Povolzhya). Kinel; 2011. [in Russian] (Головоченко А.П. Особенности адаптивной селекции яровой мягкой пшеницы в лесостепной зоне среднего Поволжья. Кинель; 2011).

Khangildin V.V. Homeostasis of grain harvest components and prerequisites for creating a model of a spring wheat variety (Gomeostaz komponentov urozhaya zerna i predposylki k sozdaniyu modeli sorta yarovoy pshenitsy). In: *Genetic Analysis of Quantitative Plant Characteristics (Geneticheskiy analiz kolichestvennykh priznakov rasteniy)*. Ufa: Bashkir Branch of the USSR Academy of Sciences; 1979. p.5-39. [in Russian] (Хангильдин В.В. Гомеостаз компонентов урожая зерна и предпосылки к созданию модели сорта яровой пшеницы. В кн.: *Генетический анализ количественных признаков растений*. Уфа: БФ АН СССР; 1979. С.5-39).

Khangildin V.V. Homeostaticity and grain yield structure in spring wheat cultivars under the conditions of Bashkiria (Gomeostatichnost i struktura urozhaya zerna u sortov yarovoy pshenitsy v usloviyakh Bashkirii). In: V.G. Konarev, R.R. Akhmetov (eds). *Physiological and Biochemical Aspects of Plant Heterosis and Homeostasis (Fiziologicheskiye i biokhimicheskiye aspekty geterozisa i gomeostaza rasteniy)*. Ufa; 1976. p.210-230. [in Russian] (Хангильдин В.В. Гомеостатичность и структура урожая зерна у сортов яровой пшеницы в условиях Башкирии. В кн.: *Физиологические и биохимические аспекты гетерозиса и гомеостаза растений* / под ред. В.Г. Конарева, Р.Р. Ахметова. Уфа; 1976. С.210-230).

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. Guidelines for the study of the world collection of wheat, *Aegilops* and triticale (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu mirovoy kolleksii pshenitsy, egilopsa i tritikale). 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., Потокина 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).

Novokhatin V.V. Ecological breeding of spring bread wheat in arid conditions. (Ekologicheskaya selektsiya myagkoy yarovoy pshenitsy v aridnykh usloviyakh) In: P.L. Goncharov, Yu.A. Khristov (eds). *Breeding of Agricultural Plants in the Arid Areas of Siberia and Far East. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; Barnaul, July 21–24, 2015*. Novosibirsk; 2015. p.186-198. [in Russian] (Новохатин В.В. Экологическая селекция мягкой яровой пшеницы в аридных условиях. В кн.: *Селекция сельскохозяйственных растений в аридных территориях Сибири и Дальнего Востока: Материалы международной научно-практической конференции; Барнаул, 21–24 июля 2015 г.* / под ред. П.Л. Гончарова, Ю.А. Христова. Новосибирск; 2015. С.186-198).

- Novokhatin V.V., Shelomentseva T.V., Leonova T.A., Temirbekova S.K., Zuev E.V. Ecological variability of spring soft wheat from VIR collection in Transurals. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2022;(6):17-22. [in Russian] (Новохатин В.В., Шеломенцева Т.В., Леонова Т.А., Темирбаева С.К., Зуев Е.В. Экологическая изменчивость сортов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР в Зауралье. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2022;(6):17-22). DOI: 10.31857/2500-2082/2022/6/17-22
- Urazaliev R.A. Genotype – environment (Genotip – sreda). Almalymbak: Kazakh Research Institute of Crop Farming; 1985. [in Russian] (Уразалиев Р.А. Генотип – среда. Алматы: Казахский НИИ земледелия; 1985).
- Vavilov N.I. Scientific bases of wheat breeding (Nauchnye osnovy selektsii pshenitsy). Moscow; Leningrad: Selkhozgiz; 1935. [in Russian] (Вавилов Н.И. Научные основы селекции пшеницы. Москва; Ленинград: Сельхозгиз; 1935).
- Yakushev V.P., Mikhailenko I.M., Dragavtsev V.A. Reserves of agro-technologies and breeding for cereal yield increasing in the Russian Federation. *Agricultural Biology*. 2015;50(5):550-560. [in Russian] (Якушев В.П., Михайленко И.М., Драгавцев В.А. Агротехнологические и селекционные резервы повышения урожая зерновых культур в России. *Сельскохозяйственная биология*. 2015;50(5): 550-560). DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.550rus
- Zaitsev G.N. Mathematical statistics in experimental botany (Matematicheskaya statistika v eksperimentalnoy botanike). Moscow: Nauka; 1984. [in Russian] (Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. Москва: Наука; 1984).
- Zhuchenko A.A. Adaptive potential of cultivated plants (ecogenetic fundamentals) (Adaptivnyy potentsial kulturnykh rasteniy [ekologo-geneticheskiye osnovy]). Chisinau: Ştiinţă; 1988. [in Russian] (Жученко А.А. Адаптивный потенциал культурных растений (эколого-генетические основы). Кишинев: Штиинца; 1988).
- Zykin V.A., Belan I.A., Roseev V.M., Pashkov S.V. Spring wheat breeding for adaptability: results and prospects. (Selektsiya yarovoy pshenitsy na adaptivnost: rezultaty i perspektivy). *Russian Agricultural Sciences*. 2002;(2):5-7. [in Russian] (Зыкин В.А., Белан И.А., Росеев В.М. Пашков С.В. Селекция яровой пшеницы на адаптивность: результаты и перспективы. *Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук*. 2000;(2):5-7).

Информация об авторах

Владимир Васильевич Новохатин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заслуженный агроном РФ, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал ТНЦ СО РАН, 625501 Россия, Тюменская обл., Тюменский р-н, п. Московский, ул. Бурлаки, 2, tatyanka.leonova.2020@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2191-0420>

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>

Татьяна Владимировна Шеломенцева, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал ТНЦ СО РАН, 625501 Россия, Тюменская обл., Тюменский р-н, п. Московский, ул. Бурлаки, 2, selomentseva.t@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-6182>

Татьяна Алексеевна Леонова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал ТНЦ СО РАН, 625501 Россия, Тюменская обл., Тюменский р-н, п. Московский, ул. Бурлаки, 2, tatyanka.leonova.2020@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2618-9043>

Information about the authors

Vladimir V. Novokhatin, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Honored Agronomist of the Russian Federation, 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 Settlement, Tyumensky District, Tyumen Province 625501, Russia, tatyanka.leonova.2020@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2191-0420>

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>

Tatyana V. Shelomentseva, 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 Settlement, Tyumensky District, Tyumen Province 625501, Russia, selomentseva.t@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4855-6182>

Tatyana A. Leonova, Associate 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 Settlement, Tyumensky District, Tyumen Province 625501, Russia, tatyanka.leonova.2020@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2618-9043>

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 19.05.2023; одобрена после рецензирования 25.07.2023; принята к публикации 04.09.2023.

The article was submitted on 19.05.2023; approved after reviewing on 25.07.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья

УДК 633.852.52:57.045

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-79-89



Эколого-географическое изучение образцов арахиса коллекции ВИР

В. Д. Бемова¹, М. Ш. Асфандиярова^{1,2}, Т. В. Якушева³, В. А. Гаврилова¹, Н. В. Кишлян¹

¹ Федеральное исследовательское учреждение Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

² Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук, Астраханская обл., Россия

³ Федеральное исследовательское учреждение Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, Краснодарский край, Россия

Автор, ответственный за переписку: Виктория Дмитриевна Бемова, viktoria.bemova@yandex.ru

Актуальность. Арахис можно успешно выращивать на юге РФ в условиях Краснодарского края и Астраханской области. В настоящее время в Госреестр РФ включено два сорта арахиса: 'Отрадокубанский' и 'Астраханский 5'. Создание исходного материала для получения новых сортов арахиса, адаптивных к условиям выращивания в Краснодарском крае и Астраханской области, актуально.

Материалы и методы. Исследовали 57 коллекционных образцов арахиса разного происхождения. Трехлетнее изучение образцов по хозяйственно ценным признакам осуществляли в двух эколого-географических точках: в Краснодарском крае и Астраханской области. В качестве стандарта использовали сорт 'Отрадокубанский'. Для статистической обработки данных применяли двухфакторный дисперсионный анализ.

Результаты и обсуждение. При изучении образцов арахиса выявили большой размах изменчивости хозяйственно ценных признаков. Наиболее стабильным признаком является масса 1000 семян. Доля генотипа в изменчивости продуктивности – от 30 до 40%. Выявлено большое влияние почвенно-климатических факторов и места выращивания на вызреваемость бобов. Выход семян в большей степени зависит от генотипа (60–70%). Отобраны лучшие образцы по хозяйственно ценным признакам, представляющие ценный материал для селекции. Некоторые образцы обладают способностью давать хороший урожай либо в Астраханской области, либо в Краснодарском крае, другие – независимо от места выращивания. В результате проведенного исследования подтверждена возможность выращивания арахиса в Астраханской области со среднесуглинистыми почвами на поливе и в условиях Краснодарского края на черноземе без полива.

Ключевые слова: *Arachis hypogaea* L., продуктивность, вызреваемость бобов, масса 1000 семян, изменчивость признаков

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2022-323 от 21.04.2022 о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Бемова В.Д., Асфандиярова М.Ш., Якушева Т.В., Гаврилова В.А., Кишлян Н.В. Эколого-географическое изучение образцов арахиса коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):79-89. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-79-89

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-79-89

Ecogeographic study of peanut accessions from the VIR collection

Viktoriya D. Bemova¹, Minura Sh. Asfandiyarova^{1,2}, Tamara V. Yakusheva³, Vera A. Gavrilova¹, Natalya V. Kishlyan¹

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

² Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Astrakhan Province, Russia

³ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Experiment Station of VIR, Krasnodar Territory, Russia

Corresponding author: Viktoriya D. Bemova, viktoriya.bemova@yandex.ru

Background. It has been shown that southern oilseeds, including peanuts, can be successfully grown in the south of the Russian Federation under the conditions of Krasnodar Territory and Astrakhan Province. Currently, only two peanut cultivars are included in the State Register of the Russian Federation: 'Otradokubansky' and 'Astrakhansky 5'. Development of raw material for obtaining new peanut cultivars adaptable to the growing conditions in Krasnodar Territory and Astrakhan Province is a relevant task.

Materials and methods. We examined 57 peanut accessions of various origins from the VIR collection. The study of peanut accessions for agronomic characters was carried out in two ecogeographic sites located in Krasnodar Territory and Astrakhan Province. Cv. 'Otradokubansky' was used as a reference. ANOVA was applied for statistical data processing.

Results and discussion. A wide range of variability in agronomic characters was revealed during the study of peanut accessions. The most stable character was the 1000 seed weight. The share of the genotype the variability of productivity was from 30 to 40%. A great effect of soil and climate factors and the place of cultivation on the ripening of beans was observed. Seed yield depended on the genotype (60–70%) as well as on the temperature factors and the presence of moisture in the soil. The best accessions were selected according to their agronomic characters; they may serve as promising material for breeding. Some accessions are able to produce a good harvest either in Astrakhan Province or Krasnodar Territory, while others can do it regardless of the place of cultivation. This study confirmed the possibility of growing peanuts in Astrakhan Province on medium loamy soils under irrigation, or in Krasnodar Territory on black earth without irrigation.

Keywords: *Arachis hypogaea* L., productivity, bean maturation, 1000 seed weight, variability of characters

Acknowledgments: this research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with Agreement No. 075-15-2022-323 dated April 21, 2022, on providing a grant in the form of subsidies from the federal budget of the Russian Federation. The grant was provided for the state-supported establishment and development of the world-class scientific center "Agrotechnologies for the Future".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Bemova V.D., Asfandiyarova M.Sh., Yakusheva T.V., Gavrilova V.A., Kishlyan N.V. Ecogeographic study of peanut accessions from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):79-89. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-79-89

Введение

Arachis hypogaea L. (арахис обыкновенный) – однолетнее травянистое растение из семейства бобовых (Fabaceae Lindl.). Особенностью арахиса является то, что его бобы развиваются в земле (геокарпия), за что арахис называют земляным орехом. По характеру цветения у арахиса различают два типа цветков: хазмогамные и клейстогамные. После оплодотворения цветоножка и основание завязи клейстогамных цветков преобразуются в гинофор, роль которого сводится к перенесению их в почву. Максимальная длина гинофора может достигать 16 см. В период надземного роста гинофора завязь остается неактивной, только после погружения в почву формируется зародыш. В связи с этим необходимое условие развития боба – влага, тепло и рыхлая структура почвы (Umen, 1933; Belova, 1953). По форме куста и совокупности других признаков выделяют кустовые, полукустовые и стелющиеся образцы арахиса. Среди группы кустовых форм различают семь сортоотипов (Vakhrusheva et al., 1998).

Арахис занимает 4-е место среди масличных культур и 14-е место среди продовольственных культур в мире (Belayneh, Chondie, 2022). Площади выращивания арахиса в мире (32,72 млн га) и общий годовой объем производства (53,92 млн тонн) неуклонно растут (FAOSTAT, 2021). Индия, Китай, Нигерия и Судан лидируют среди стран – производителей арахиса. Арахис является богатым источником питательных веществ: содержание масла в семенах составляет 44–56%, белка – 22–30%. Семена арахиса богаты ненасыщенными жирными кислотами, витаминами, минералами, клетчаткой и фитохимическими веществами, что, несомненно, может положительно влиять на здоровье человека. Арахис используется в кондитерской промышленности для производства конфет, шоколада, халвы и прочих изделий. Арахис может быть хорошим предшественником для многих культур, так как обогащает почву усвояемым азотом, который образуется клубеньковыми бактериями (Kishlyan et al., 2020).

В годы Советской власти арахис возделывался в республиках Средней Азии, Краснодарском крае и на юге Украинской ССР. Во Всероссийском институте масличных культур (ВНИИМК) были созданы сорта и перспективные линии. В настоящее время Россия импортирует арахис, так как промышленного производства нет. Существует опыт выращивания арахиса в фермерских хозяйствах (Северный Кавказ, Нижнее Поволжье) (Tuz et al., 2018). Коллекция ВИР насчитывает 1823 образца арахиса из 74 стран. Для выявления перспективных образцов арахиса и создания новых сортов нами была поставлена задача изучить коллекционные образцы по хозяйственно ценным признакам в условиях юга РФ. Эколого-географический подход широко используется сотрудниками ВИР для оценки потенциальной урожайности и экологической устойчивости перспективных сортов многих культур. О значимости такого подхода для ускорения темпов селекции указывал Н. И. Вавилов (Vavilov, 1940). Нами проведено эколого-географическое изучение коллекционных образцов арахиса в двух точках испытания в условиях Краснодарского края и Астраханской области в течение трех лет, что позволило выявить лучшие образцы по хозяйственно ценным признакам и рассматривать их как перспективный селекционный материал.

Материалы и методы исследования

В работе использовали 57 коллекционных образцов ВИР разного происхождения и разных сортоотипов: Испанский (к-154, Россия; к-178, США; к-319, Узбекистан; к-597, Канада; к-751, Португалия и др.); Улучшенный Испанский (к-179, США; к-354, Узбекистан и др.); Виргиния (к-46, США; к-300, Трансвааль); Валенсия (к-180, США; к-283, Узбекистан; к-317, Южная Родезия, Зимбабве; к-1026, Мали); Порто-Аллегро (к-173, США; к-1547, Мадагаскар); Теннесси Белый (к-362, 'Перзуван 46/2', Азербайджан; к-1697, Вьетнам) и Теннесси Красный (к-53, США; к-1713, Вьетнам). Исследования проводили в 2019–2021 гг. в двух географических точках: в Прикаспийском аграрном федеральном научном центре Российской академии наук (ПАФНЦ) на территории Астраханской области и на Кубанской опытной станции – филиале ВИР (КОС ВИР), расположенной в Краснодарском крае. Зоны различаются по климатическим и почвенным условиям.

ПАФНЦ расположен в зоне полупустынь. Климат экстремально засушливый, резко континентальный, с жарким летом, малым количеством осадков и большой испаряемостью. Почвенный покров представлен светло-каштановыми почвами с низким плодородием. Содержание гумуса в пахотном слое почвы невелико и находится в пределах 0,7–0,8%, валового азота и фосфора – 0,084 и 0,1% соответственно. Мощность гумусового слоя составляет 42–62 см (Zvolinski, 1991). Ежегодно вносили удобрения в начале вегетации через капельное орошение. Почва опытного участка по механическому составу определяется как среднесуглинистая, крупнопылевая. В течение всех трех сезонов осуществляли капельный полив арахиса: два раза в неделю в начальный период и один раз в 10 дней в период созревания при отсутствии дождей.

Кубанская ОС ВИР расположена в степной части Прикубанской равнины, рельеф ровный. Уровень грунтовых вод низкий (15–20 м), и они не оказывают заметного влияния на почвообразование. Глубина залегания гумусового горизонта – 130–170 см. Содержание гумуса в поверхностных горизонтах почвы – 3,6–4,6%. Равнинная местность и минимальный сток воды способствуют промыванию карбонатов из верхних горизонтов в нижние, поэтому почва представляет собой слабо выщелоченный чернозем. Климат умеренно континентальный, с жарким летом. Характерные особенности – обилие тепла и крайняя неустойчивость всех климатических элементов (Ruseeva, Narodetskaya, 1975). Арахис выращивали без полива.

Для роста и развития арахиса необходима сумма положительных температур 2600–3500°C (Vakhrusheva, 1998). Важным условием развития боба является наличие влаги, тепла и рыхлой структуры почвы, поэтому в начале вегетации проводили рыхление: на ПАФНЦ – после полива, на КОС – после дождя. Трехкратное окучивание повышает урожай семян арахиса на 59,2%, внесение удобрений приводит к увеличению числа бобов в 2 раза (Niklyayev, 1975). Для получения хорошего урожая арахиса в сезон проводили 2–3 окучивания, чтобы максимальное число гинофоров оказалось в земле. После созревания растения арахиса выкапывали, бобы отделяли от стебля и сушили в тканевых мешочках в помещении с хорошей вентиляцией.

Погодные условия всех трех лет были разными. Вместе с тем можно сказать, что различия в температурном режиме в двух точках были незначительные, но с явным

преимуществом высоких температур в ПАФНЦ (2020, 2021 гг.). Количество осадков было выше на КОС ВИР (рис. 1). При этом в течение всех трех сезонов в ПАФНЦ осуществляли капельный полив.

В ПАФНЦ сумма положительных температур за вегетационный период 2019 г. была 3347,6°C, что на 284,6°C выше среднемноголетней; атмосферных осадков выпало больше нормы. Большая часть осадков выпала в июле и сентябре. Лето на Кубанской ОС ВИР было жарким, с осадками значительно ниже нормы. Распределение осадков по месяцам было неравномерным. Высокая температура воздуха, недостаток осадков и ветер с суховеями способствовали почвенной засухе.

В 2020 г. в ПАФНЦ в течение всего летнего сезона температура воздуха была высокая. Июнь, июль и август были практически без осадков, что компенсировали капельным поливом. На КОС средняя температура воздуха в течение всего сезона превышала среднемноголетние значения. В июне осадки выпали в преде-

лах нормы, в июле – на 33 мм больше нормы. В августе дефицит осадков составил 39 мм. Нехватка осадков в августе, высокая температура воздуха привели к почвенной и воздушной засухе к концу летнего сезона.

В 2021 г. в ПАФНЦ летние температуры были выше нормы, с мая по август происходило увеличение температур. Количество осадков умеренное. На КОС ВИР температура воздуха была выше среднемноголетней. Обильные осадки выпали в июне и августе.

Оценку хозяйственно ценных признаков проводили согласно «Классификатору вида *Arachis hypogaea* L.» (Vakhrusheva, Ivanenko, 1985) и методическим указаниям «Изучение коллекции арахиса (*Arachis hypogaea* L.)» (Vakhrusheva, 1995). Изучали признаки: продуктивность – масса бобов с 1 растения, вызреваемость, масса 1000 семян, выход семян. Проведен двухфакторный дисперсионный анализ. Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Office Excel 10.

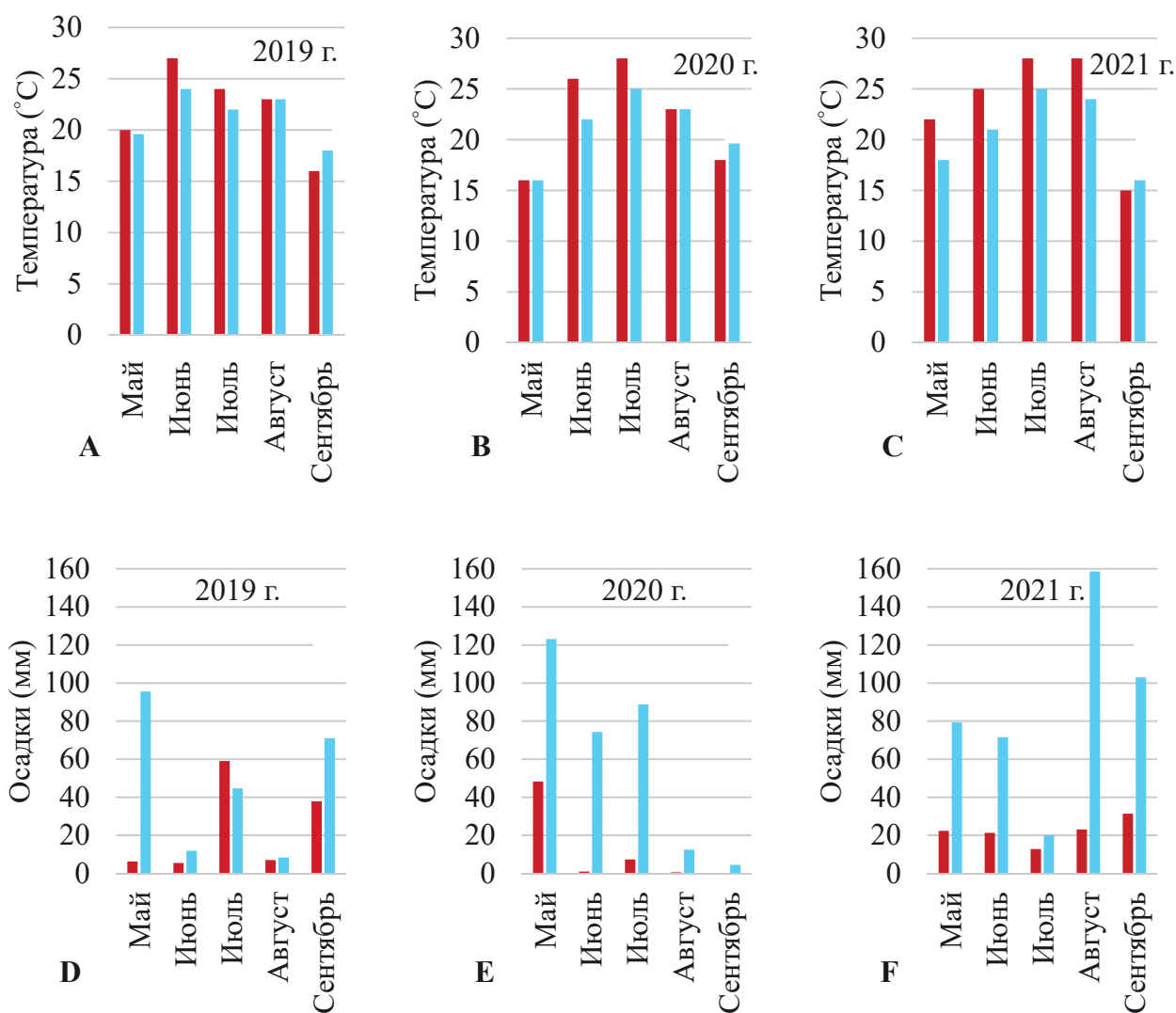


Рис. 1. Средняя температура и количество осадков в период вегетации арахиса в 2019–2021 гг. в Прикаспийском аграрном федеральном научном центре (красный) и на Кубанской опытной станции ВИР (синий):

A, B, C – средняя температура (°C); D, E, F – суммарные осадки (мм)

Fig. 1. Mean temperature and precipitation during the peanut growing seasons in 2019–2021 at the Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS (red) and Kuban Experiment Station of VIR (blue):

A, B, C – mean temperature (°C); D, E, F – total precipitation (mm)

Результаты

Продуктивность

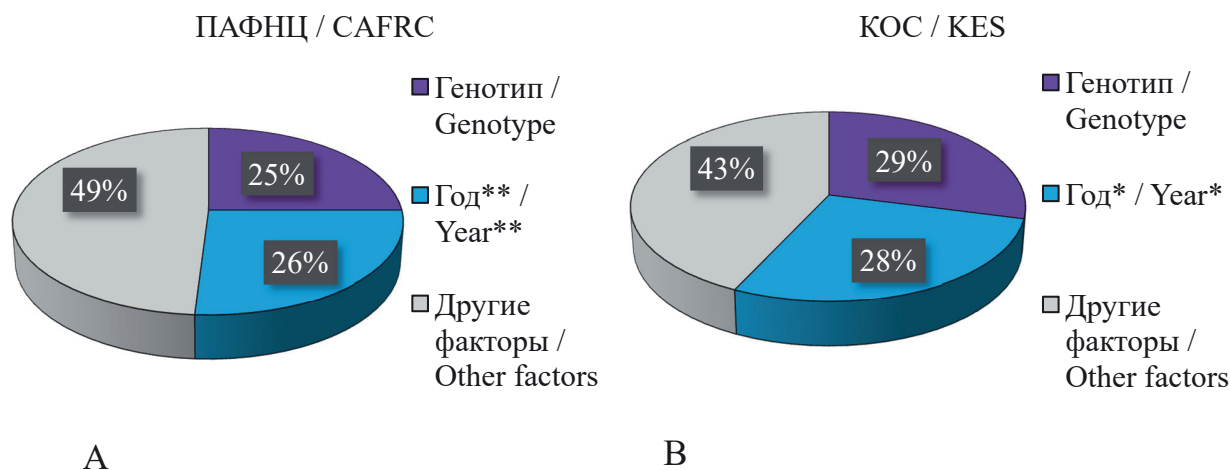
Важным показателем при определении урожайности является продуктивность. Установлено, что продуктивность в ПАФНЦ у коллекционных образцов колеблется в зависимости от года и условий выращивания от 11 до 44 г, в то время как на КОС ВИР – от 4 до 60 г.

На основе двухфакторного дисперсионного анализа трех лет изучения выявлено, что доля влияния на продуктивность генотипа в ПАФНЦ – 25%, на КОС ВИР – 29% (рис. 2.). Большое влияние на продуктивность оказывают неучтенные факторы: на ПАФНЦ – 49%, на КОС ВИР – 43%. Влияние фактора года в ПАФНЦ и на КОС ВИР – 26 и 28% соответственно (влияние достоверно при $p \leq 0,01$). Большое влияние неучтенных факторов можно объяснить различием почвенно-климатических условий и агротехнических приемов (полив, рыхление, окуливание) в двух точках выращивания. Коэффициент вариации (CV) признака продуктивности на КОС выше, чем в ПАФНЦ (таблица).

удалось подсчитать массу 1000 семян на КОС ВИР в 2019 г. Поэтому на рисунке 3 представлены данные двухфакторного дисперсионного анализа массы 1000 семян на КОС ВИР за два года, а для ПАФНЦ – за три. В ПАФНЦ за три года изучения доля влияния генотипа – 88%, на КОС ВИР за два года изучения влияние генотипа на массу 1000 семян – 93%.

Отмечено варьирование массы 1000 семян у образцов арахиса по годам внутри одного места исследования (ПАФНЦ и КОС ВИР). Коэффициент вариации массы 1000 семян среди лучших образцов в ПАФНЦ – 4,2–14,3%, на КОС ВИР – 1,5–31,1%. Масса 1000 семян была выше в ПАФНЦ по сравнению с КОС ВИР, за исключением отдельных образцов.

Выделено 10 крупносемянных образцов с массой 1000 семян 600–800 г: к-74 (Мексика); к-168 (Китай), к-173 (Бразилия); к-720 (Израиль); к-747 (Румыния); к-1942 (Россия), к-168, к-2064, 2065 (Китай); к-1987 (стандарт 'Отрадокубанский', Россия). Мелкосемянные образцы (масса 1000 семян менее 400 г): к-596 ('Negrotipo 2', Аргентина); к-597 ('Early Spanish 0833', Канада). Необходимо от-



** – влияние достоверно при $p \leq 0,01$; * – влияние достоверно при $p \leq 0,05$
 ** – the effect is significant at $p \leq 0.01$; * – the effect is significant at $p \leq 0.05$

Рис. 2. Влияние генотипа и года на продуктивность у образцов арахиса в Прикаспийском аграрном федеральном научном центре (А) и на Кубанской опытной станции ВИР (В), 2019–2021 гг.

Fig. 2. The effect of the genotype and the year on the productivity of peanut accessions at the Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS (A) and Kuban Experiment Station of VIR (B) in 2019–2021

Выделены лучшие по продуктивности образцы за три года изучения одновременно в ПАФНЦ и КОС ВИР: сорта 'Десертный' (к-793, Россия); 'Краснодарец 14' (к-1942, ВНИИМК, Россия); к-173 (Бразилия); к-202 (Северная Манчжурия, Харбин); к-868 (Уганда) (см. таблицу). Лучшие по продуктивности образцы за три года изучения в ПАФНЦ: к-175 (Бразилия); к-317 (Южная Родезия, Зимбабве); к-747 (Румыния); к-2002 (№20031, ВНИИМК, Россия); к-2066 (Китай) и на КОС ВИР: к-178 (США); к-283 (Узбекистан); к-362 (Азербайджан); к-698 (Марокко); к-720 (Израиль); к-751 (Португалия); к-1157 (Камерун); к-1547 (Мадагаскар); к-1697 (Вьетнам) (см. таблицу). Коэффициент вариации признака продуктивности оказался самым высоким по сравнению с другими признаками.

Масса 1000 семян

На основе дисперсионного анализа установлено большое влияние генотипа на массу 1000 семян. Нам не

метить, что некоторые образцы, проявляющие в ПАФНЦ массу 1000 семян более 400 г, на КОС ВИР перешли в группу мелкосемянных; масса 1000 семян 200–300 г: к-3, к-178, к-179, к-180 (США); к-64 (Ява); к-154 ('Испанский', Россия); к-163 (Грузия); к-300 (Трансвааль); к-317 (Зимбабве); к-319, 354 (Узбекистан); к-416 (Аргентина); к-433 (Сенегал); к-555 (Индия); к-695 (Марокко); к-903 (Танзания); к-939 (Бразилия); к-1001 (Эквадор); к-1026, к-1027 (Мали); к-1143 (Аргентина); к-1157 (Камерун).

Вызреваемость

Вызреваемость бобов арахиса – это отношение числа вызревших бобов к общему числу бобов (сумма вызревших и невызревших бобов). По классификатору (Vakhrusheva, Ivanenko, 1985) вызреваемость арахиса – это показатель скороспелости. Чем выше показатель вызреваемости, тем более скороспелый образец. В ПАФНЦ этот показатель у всех образцов в 2020 г. был не ниже 80%, за ис-

Таблица. Характеристика лучших образцов арахиса по хозяйственно ценным признакам, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр и Кубанская опытная станция ВИР (средние значения за 3 года, 2019–2021 гг.)

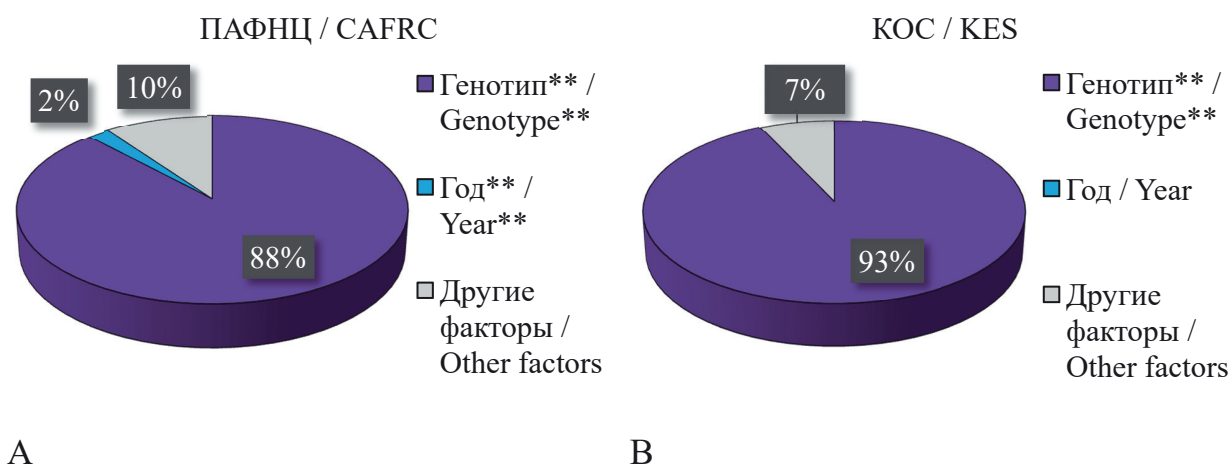
Table. Description of the best peanut accessions according to their agronomic characters at the Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS and Kuban Experiment Station of VIR (average for 3 years, 2019–2021)

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Происхождение / Origin	Название / Name	Сортотип / Cultivar type	Продуктивность, г / Productivity, g		Масса 1000 семян, г / 1000 seed weight, g		Вызреваемость, % / Ripening, %		Лужистость, % / Husk content, %	
				Mean ± Se ¹ , g	CV, %	Mean ± Se, g	CV, %	Mean ± Se, %	CV, %	Mean ± Se, %	CV, %
Кубанская опытная станция ВИР / Kuban Experiment Station of VIR											
1987 ст.	Россия	Отрадокубанский	Валенсия	61,1 ± 25,0	70,9	642,5 ± 53,5*	11,7	48,0 ± 7,1	25,6	33,9 ± 0,3*	1,2
173	Бразилия	Rохо	Порто-Аллегро	54,6 ± 32,9	90,4	611,5 ± 33,5*	7,7	32,1 ± 16,2	16,2	39,2 ± 2,0*	7,4
178	США		Испанский	32,7 ± 6,3	33,4	338,0 ± 12,0*	5,0	47,9 ± 14,8	14,8	31,8 ± 1,0*	4,8
202	Северная Манчжурия	zemljanoj oreh n3	стелющийся	44,5 ± 11,8	46,0	614,5 ± 23,5*	5,4	60,4 ± 12,2	12,2	37,9 ± 2,9*	10,8
283	Узбекистан		Валенсия	42,7 ± 8,7	35,6	455,0 ± 52,0*	16,1	54,0 ± 15,5	15,5	33,5 ± 0,6*	2,7
362	Азербайджан	Перзуван 46/2	Теннеси Белый	33,5 ± 4,2*	6,3	435,5 ± 11,5*	3,7	36,3 ± 22,4	22,4	35,9 ± 0,1*	0,6
698	Марокко		полукустовой	61,8 ± 19,1	53,5	635,0 ± 24,0*	5,3	29,9 ± 15,6	15,6	37,3 ± 0,7*	2,8
720	Израиль	Red Rehovot	Виргиния	39,5 ± 2,3	10,1	482,6 ± 242,6*	8,4	32,8 ± 17,9	17,9	35,7 ± 2,8*	11,0
751	Португалия		Испанский	45,9 ± 11,2	42,5	563,0 ± 50,0*	12,5	49,4 ± 15,3	15,3	30,4 ± 1,8*	8,3
793	Россия		Валенсия	37,5 ± 13,0	60,0	400,0 ± 88,0*	31,1	59,7 ± 9,9	9,9	28,5 ± 3,2*	16,1
868	Уганда	Ntuku Kigezi	Валенсия	35,8 ± 3,7	18,1	460,0 ± 75,0*	23,0	63,6 ± 14,1	14,1	41,9 ± 14,8*	13,5
1157	Камерун	70-112	Испанский	52,1 ± 9,5	31,5	320,0 ± 57,0*	25,1	56,9 ± 9,6	9,6	40,0 ± 1,5*	5,3
1547	Мадагаскар	57-107	Порто-Аллегро	33,9 ± 3,9	20,2	449,0 ± 5,0*	1,5	56,8 ± 17,5	17,5	35,3 ± 1,5*	6,2
1697	Вьетнам		Теннеси Белый	34,9 ± 7,0	35,0	410,5 ± 14,5*	5,0	51,8 ± 9,5	9,5	32,2*	0
1942	Россия	Краснодарец 14	Валенсия	61,2 ± 2,7*	17,9	832,0 ± 100,0*	17,0	30,2 ± 19,6	19,6	36,6 ± 2,4*	9,4
НСР				5,6		76,9		4,3		2,3	

Таблица. Окончание
Table. The end

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Происхождение / Origin	Название / Name	Сортотип / Cultivar type	Продуктивность, г / Productivity, g		Масса 1000 семян, г / 1000 seed weight, g		Вызреваемость, % / Ripening, %		Лузжистость, % / Husk content, %	
				Mean ± Se ¹ , g	CV, %	Mean ± Se, g	CV, %	Mean ± Se, %	CV, %	Mean ± Se, %	CV, %
Прикаспийский аграрный федеральный научный центр / Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS											
1987 ст.	Россия	Отрадокубанский	Валенсия	28,2 ± 0,6	3,7	743,3 ± 27,1	6,3	88,6 ± 2,9	5,8	32,8 ± 1,0	5,3
173	Бразилия	Roxo	Порто-Аллегро	33,9 ± 8,2	42,3	756,6 ± 20,5	4,7	84,9 ± 0,9	2,0	35,4 ± 0,5	2,6
175	Бразилия	Rasteiro	полукустовой	22,4 ± 1,9	15,0	540,3 ± 44,8	14,3	95,3 ± 3,3	6,1	29,2 ± 2,1	12,4
202	Северная Манчжурия	zemljanoj oreh n3	стелющийся	23,8 ± 2,6	18,9	671,3 ± 40,3	10,4	78,8 ± 5,3	11,8	38,6 ± 2,6	11,7
317	Южная Родезия		Валенсия	29,6 ± 5,6	33,1	477,6 ± 38,4	13,9	90,1 ± 1,0	2,0	26,8 ± 1,1	7,5
747	Румыния		стелющийся	21,2 ± 2,1	17,5	762,3 ± 18,4	4,2	84,8 ± 2,8	5,7	35,7 ± 2,2	10,9
793	Россия	Десертный	Валенсия	31,5 ± 1,9	10,9	567,6 ± 22,8	6,9	94,5 ± 1,3	2,4	25,3 ± 1,1	7,6
868	Уганда	Ntuku Kigezi	Валенсия	29,3 ± 3,3	19,4	666,3 ± 23,1	6,0	88,9 ± 1,0	2,0	30,8 ± 0,9	5,2
1942	Россия	Краснодарец 14	Валенсия	27,3 ± 1,7	10,7	706,0 ± 32,7	8,0	90,9 ± 0,7	1,4	28,1 ± 1,6	10,2
2002	Россия	№ 20031	Валенсия	29,8 ± 7,6	44,6	593,0 ± 42,3	12,3	87,2 ± 1,7	3,5	28,1 ± 2,0	12,
2066	Китай	Long Hua Sheng 2	Валенсия	25,9 ± 2,6	17,5	675,6 ± 21,8	5,6	87,3 ± 2,3	4,7	23,9 ± 1,3	9,5
НСР				2,6		63,4		3,1		3,1	

Примечание: ¹ Mean ± Se – среднее с доверительным интервалом (± стандартная ошибка) за три года изучения; * – среднее за два года
 Note: ¹ Mean ± Se – three-year mean with a confidence interval (± standard error); * – two-year means



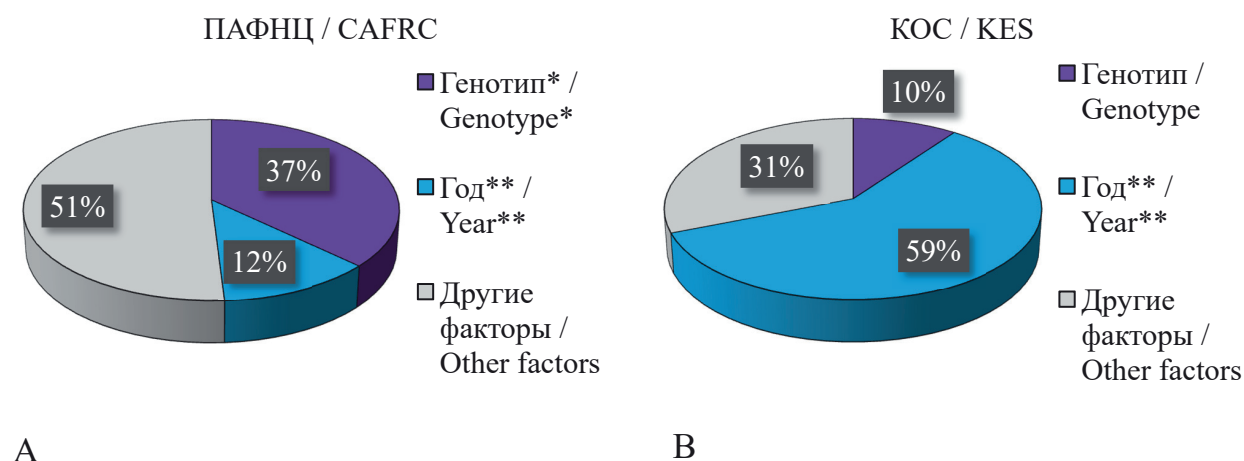
** – влияние достоверно при $p \leq 0,01$; * – влияние достоверно при $p \leq 0,05$
 ** – the effect is significant at $p \leq 0.01$; * – the effect is significant at $p \leq 0.05$

Рис. 3. Влияние генотипа, года и других факторов на массу 1000 семян образцов арахиса, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр (А) 2019–2021 гг., Кубанская опытная станция ВИР (В) 2020–2021 гг.

Fig. 3. The effect of the genotype, year, and other factors on the 1000 seed weight of peanut accessions at the Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS (A) in 2019–2021, and Kuban Experiment Station of VIR (B) in 2020–2021

ключением образцов: к-41, к-51 (США), к-168 (Западный Китай), к-202 (Северная Манчжурия). В 2019 и 2021 г. вызреваемость у ряда образцов была на уровне 60–70%. На КОС ВИР вызреваемость бобов даже у лучших по продуктивности образцов арахиса была на уровне 50–60%, у некоторых образцов – 20–30%. При двухфакторном дисперсионном анализе за три года изучения в ПАФНЦ было выявлено достоверное влияние генотипа на вызреваемость – 37% и фактора года – 12%. Неучтенные факторы составили 51% (рис. 4). На КОС ВИР погодные условия за три года оказались настолько разными, что влияние фактора года на вызреваемость составило 59%. При этом влияние генотипа – 10%.

Таким образом, на вызреваемость бобов большое влияние оказывает место выращивания и, соответственно, разные почвенно-климатические условия. В ПАФНЦ при высокой вызреваемости большинства образцов продуктивность может быть разной (от высокой и средней до низкой). Наиболее высокая вызреваемость в ПАФНЦ обусловлена стабильными условиями выращивания на поливе. На КОС ВИР при высокой продуктивности вызреваемость в большинстве случаев ниже 50%. На вызреваемость бобов в наибольшей степени влияют агротехнические приемы (полив, рыхление, окучивание), температурный фактор и структура почвы. Вызреваемость бобов арахиса – признак с наибольшим размахом изменчиво-



** – влияние достоверно при $p \leq 0,01$; * – влияние достоверно при $p \leq 0,05$
 ** – the effect is significant at $p \leq 0.01$; * – the effect is significant at $p \leq 0.05$

Рис. 4. Влияние генотипа, года и условий выращивания на вызреваемость образцов арахиса за три года, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр (А), Кубанская опытная станция ВИР (В), 2019–2021 гг.

Fig. 4. The effect of the genotype, year, and growing conditions on the ripening rate of peanut beans during the three years of study at the Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS (A) and Kuban Experiment Station of VIR (B), 2019–2021

сти. Вызреваемость и продуктивность – важные элементы структуры урожая.

Выход семян

При лущении бобов получают два показателя: выход семян (%) и лужистость (%). Чем меньше процентное содержание лужки, тем выше выход семян. По данным двухфакторного дисперсионного анализа, на выход семян в ПАФНЦ за три года изучения влияние генотипа – 56% и фактора года – 6% (рис. 5). При анализе выхода семян на КОС ВИР за два года изучения доля влияния генотипа составила 74%, фактора года – 6%. Таким образом, для признака «выход семян» решающее значение имеет генотип.

Масса 1000 семян в наибольшей степени определяет генотипом (до 90%), однако место выращивания также оказывает влияние на этот признак. На КОС ВИР у большинства образцов масса 1000 семян была меньше, чем в ПАФНЦ, за некоторым исключением. Масса 1000 семян – слабо варьирующий признак $CV = 4,2-16,1\%$. Эти данные согласуются с данными авторов из Эфиопии, которые при изучении сортов арахиса в разных условиях установили, что в среднем за два года испытания коэффициент вариации массы 1000 семян был на уровне 7,6%. Самый высокий уровень варьирования отмечен для числа бобов на растении – 24,6% (Belay et al., 2018). Благодаря эколого-географическому испытанию, проведенному в разных регионах Эфиопии, при помощи дис-

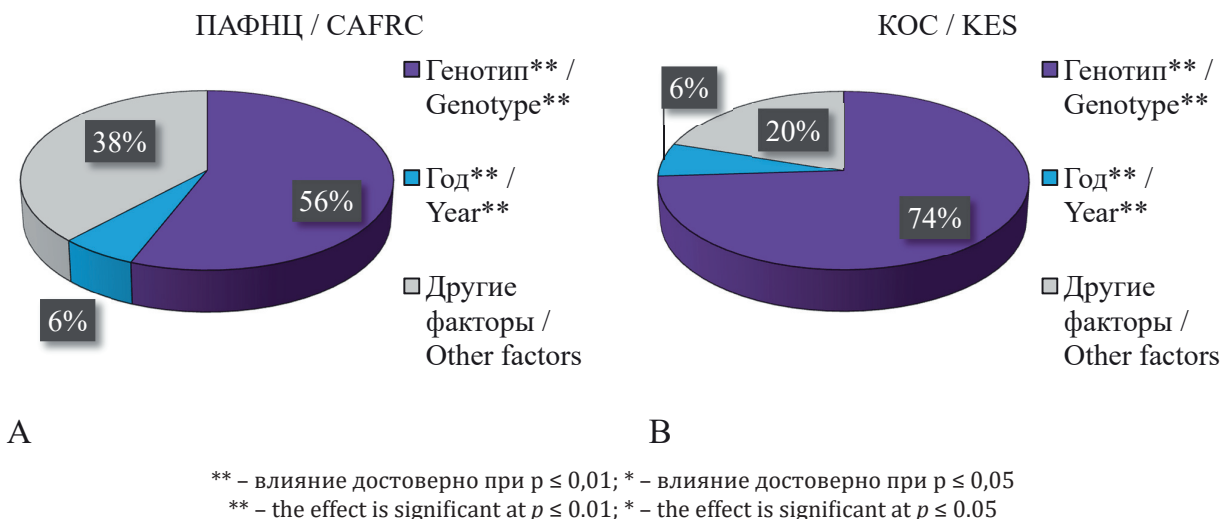


Рис. 5. Влияние генотипа, года и других факторов на выход семян, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр (А) 2019–2021 гг., Кубанская опытная станции ВИР (В) 2020–2021 гг.

Fig. 5. The effect of the genotype, year, and other factors on the peanut seed yield at the Caspian Agrarian Federal Research Center of the RAS (A) in 2019–2021, and Kuban Experiment Station of VIR (B) in 2020–2021

Обсуждение

Проведенное изучение 57 коллекционных образцов арахиса в двух географических точках позволило выявить размах изменчивости хозяйственно ценных признаков. Продуктивность образцов арахиса значительно варьировала в зависимости от почвенно-климатических и других факторов. Влияние генотипа на продуктивность – на уровне 25–30%. Коэффициент вариации признака продуктивности выше на КОС ВИР, чем в ПАФНЦ, и самый высокий по сравнению с коэффициентом вариации других признаков. Вызреваемость у лучших образцов по продуктивности на ПАФНЦ была на уровне 70–90%, на КОС ВИР – 30–60%. Коэффициент вариации признака вызреваемости также более высокий на КОС ВИР. Низкий процент вызреваемости бобов арахиса на Кубанской станции, возможно, связан с тем, что завязывается максимальное количество бобов, но они не успевают вызреть. Как правило, на КОС ВИР в сентябре начинаются дожди и уборку проводят раньше (в конце сентября или начале октября). Образцы на ПАФНЦ убирают позднее (10–15 октября). Вызреваемость бобов арахиса – признак с наибольшим размахом изменчивости у образцов. Зависит от места выращивания, при стабильных условиях – на 40% от генотипа. Выход семян – важный признак структуры урожая. Влияние генотипа на данный признак – 60–70%.

персионного анализа были выявлены наиболее продуктивные, урожайные и крупносемянные сорта арахиса и установлены лучшие сорта для каждой зоны. Авторы сообщили об изменчивости компонентов урожая среди сортов арахиса в зависимости от сезона. Различия в урожайности этих сортов могут быть связаны с их генотипом и характером агроэкологической адаптивности (Gebregziabher et al., 2017; Belay et al., 2018; Belayneh, Chondie, 2022). В то же время при изучении 30 сортов арахиса в разных регионах Алжира была выявлена высокая изменчивость признака массы 1000 семян (CV до 40,12%) (Djeghim et al., 2021).

При изучении изменчивости признаков структуры урожая у двух сортов и пяти линий арахиса в 2015–2017 гг. в Астраханской области показано, что 76% изменчивости массы 1000 семян определяется генотипом, тогда как продуктивность находится под наименьшим влиянием генотипа (15%) (Tuz et al., 2018), что согласуется с результатами нашего исследования. По данным других авторов (Golombek et al., 1995; Sanders, Blankenship, 1984), даже незначительные колебания средней температуры почвы могут привести к различиям в размере семян арахиса, созревании бобов и урожайности.

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что ряд образцов обладает способностью давать хороший урожай и в Астраханской области, и в Краснодарском крае.

Заключение

Впервые проведено изучение 57 коллекционных образцов арахиса в течение трех лет в двух эколого-географических точках. Это позволило выявить значительный размах изменчивости по хозяйственно ценным признакам и показать долю влияния генотипа и факторов среды на них. Было установлено, что образцы достоверно различаются по продуктивности, массе 1000 семян, вызреваемости, выходу семян. Наиболее стабильный признак – масса 1000 семян. Для ПАФНЦ характерна более высокая вызреваемость, чем на КОС ВИР. Вызреваемость на КОС ВИР имеет большой размах изменчивости по годам, что связано с варьированием погодных факторов и отсутствием полива. Влияние генотипа на продуктивность – на уровне 25–30%, на выход семян – 60–70%.

Выделены лучшие образцы по продуктивности одновременно в двух точках (ПАФНЦ и КОС ВИР): 'Десертный' (к-793), 'Краснодарец 14' (к-1942) (Россия); к-173 (Бразилия); к-202 (Северная Манчжурия); к-868 (Уганда). В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что условия Астраханской области в зоне полупустынь со среднесуглинистыми почвами на поливе и Краснодарского края в зоне степей на черноземе без полива позволяют выращивать арахис. В качестве селекционного материала отобраны лучшие образцы по комплексу хозяйственно ценных признаков: продуктивность, вызреваемость, выход семян.

References / Литература

- Belay F., Meresa H., Syum S. Genetic variation and association for kernel yield and yield related traits of released groundnut (*Arachis hypogaea* L.) varieties in Abergelle District, Northern Ethiopia. *Journal of Medicinal Plants Studies*. 2018;6(6):265-271.
- Belayneh D.B., Chondie Y.G. Participatory variety selection of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) in Taricha Zuriya district of Dawuro Zone, southern Ethiopia. *Heliyon*. 2022;24;8(3):e09011. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09011
- Belova E.V. Biological features of peanut flowering and fruiting (Biologicheskiye osobennosti tsveteniya i plodoobrazovaniya arakhisa) [dissertation]. Leningrad: VIR; 1953. [in Russian] (Белова Е.В. Биологические особенности цветения и плодообразования арахиса: дис. ... канд. биол. наук. Ленинград: ВИР; 1953).
- Djeghim H., Bellil I., Khelifi D. Genetic diversity of the Algerian peanut population analyzed using morphological markers and seed storage proteins. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):111-124. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-111-124
- FAOSTAT: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture data. Rome: FAO; 2021. Available from: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> [accessed Apr. 20, 2023].
- Gebregziabher B.S., Harfe E., Tekle G. Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) varieties evaluation for yield and yield components at Tanqua-Abergelle district, Northern Ethiopia. *Sky Journal of Agricultural Research*. 2017;6(3):057-061.
- Golombek S.D., Sridhar R., Singh U. Effect of soil temperature on the seed composition of three Spanish cultivars of groundnut (*Arachis hypogaea* L.) *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1995;43(8):2067-2070. DOI: 10.1021/jf00056a021
- Kishlyan N.V., Bemova V.D., Matveeva T.V., Gavrilova V.A. Biological peculiarities and cultivation of groundnut (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(1):119-127. [in Russian] (Кишлян Н.В., Бемова В.Д., Матвеева Т.В. Гаврилова В.А. Биологические особенности и возделывание арахиса. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2020;181(1):119-127). DOI: 10.30901/2227-8834-2020-1-119-127
- Niklyayev V.S. Biological features of peanut flowering and fruiting in Guinea (Biologicheskiye osobennosti tsveteniya i plodoobrazovaniya arakhisa v usloviyakh Gvinei). *Agricultural Biology*. 1975;10:933-936. [in Russian] (Никляев В.С. Биологические особенности цветения и плодообразования арахиса в условиях Гвинеи. *Сельскохозяйственная биология*. 1975;10:933-936).
- Ruseeva Z.N., Narodetskaya Sh.Sh. Agroclimatic resources of Krasnodar Territory (Agroklimaticheskiye resursy Krasnodarskogo kraya). Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. [in Russian] (Русеева З.Н., Народецкая Ш.Ш. Агроклиматические ресурсы Краснодарского края. Ленинград: Гидрометеоздат; 1975).
- Sanders T.H., Blankenship P.D. Effect of soil temperature on yield factors of Florunner peanuts. *Proceedings of American Peanut Research and Education Society*. 1984;16(1):29. Available from: <https://apresinc.com/images/2014/06/Volume-16-1984-MobileAL.pdf> [accessed Apr. 13, 2023].
- Tuz R.K., Podolnaya L.P., Asfandiyarova M.Sh., Dubovskaya A.G., Eremin V.A., Migacheva E.O. Variability of peanut samples of VNIIMK's breeding in the conditions of the Astrakhan region. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2018;4(176):64-67. [in Russian] (Туз Р.К., Подольная Л.П., Асфандиярова М.Ш., Дубовская А.Г., Еремин В.А., Мигачева Е.О. Изменчивость образцов арахиса селекции ВНИИМК в условиях Астраханской области. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2018;4(176):64-67). DOI: 10.25230/2412-608X-2018-3-175-64-67
- Umen D.P. The biology of peanut flowering (Biologiya tsveteniya arakhisa). Krasnodar: VNIIMK; 1933. [in Russian] (Умен Д.П. Биология цветения арахиса. Краснодар: ВНИИМК; 1933).
- Vakhrusheva T.E. Evaluation of the peanut collection (*Arachis hypogaea* L.). Guidelines (Izucheniye kolleksitsii arakhisa (*Arachis hypogaea* L.). Metodicheskiye ukazaniya). St. Petersburg: VIR; 1995. [in Russian] (Вахрушева Т.Е. Изучение коллекции арахиса (*Arachis hypogaea* L.). Методические указания. Санкт-Петербург: ВИР; 1995).
- Vakhrusheva T.E. Peanut (Arakhis). In: *Oil Crops for Food Purposes in Russia (Breeding Problems and Assortment) (Maslichnye kultury dlya pishchevogo ispolzovaniya v Rossii [problemy seleksitsii, sortiment])*. St. Petersburg: VIR; 1998. p.20-23. [in Russian] (Вахрушева Т.Е. Арахис. В кн.: *Масличные культуры для пищевого использования в России (проблемы селекции, сортимент)*. Санкт-Петербург: ВИР; 1998. С.20-23).
- Vakhrusheva T.E., Ivanenko E.N. Species classifier for *Arachis hypogaea* L. (Peanut, or groundnut) (Klassifikator vida *Arachis hypogaea* L. [Arakhis podzemny ili zemlyanoy orekh]) Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Вахрушева Т.Е., Иваненко Е.Н. Классификатор вида *Arachis hypogaea* L. (Арахис подземный или земляной орех). Ленинград: ВИР; 1985).
- Vakhrusheva T.E., Ivanenko E.N., Karimova A.Yu. Catalogue of the VIR global collection. Issue 694. Peanut. S.N. Kutuzova (ed.). St. Petersburg: VIR; 1998. [in Russian] (Вахрушева Т.Е., Иваненко Е.Н., Каримова А.Ю. Каталог миро-

вой коллекции ВИР. Выпуск 694. Арахис / под ред. С.Н. Кутузовой. Санкт-Петербург: ВИР; 1998).
Vavilov N.I. The new systematics of cultivated plants. Oxford: The Clarendon Press; 1940.
Zvolinski V.P. Integrated development of multisectoral agricultural production in the Lower Volga agroindustrial

system (Kompleksnoye razvitiye mnogootraslevogo selskokhozyaystvennogo proizvodstva v sisteme APK Nizhney Volgi). Moscow: RUDN; 1991. [in Russian] (Зволинский В.П. Комплексное развитие многоотраслевого сельскохозяйственного производства в системе АПК Нижней Волги. Москва: РУДН; 1991).

Информация об авторах

Виктория Дмитриевна Бемова, лаборант-исследователь, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, viktoria.bemova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9574-0356>

Мунира Шаймардановна Асфандиярова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук, 416251 Россия, Астраханская обл., Черноярский р-н, с. Соленое Займище, квартал Северный, 8, rtuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3801-3734>

Тамара Владимировна Якушева, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, 352183 Россия, Краснодарский край, п. Ботаника, ул. Центральная, 2, kos-vir@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2661-2377>

Вера Алексеевна Гаврилова, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, v.gavrilova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8110-9168>

Наталья Васильевна Кишлян, 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, natalya-kishlyan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4454-6948>

Information about the authors

Viktoria D. Bemova, Laboratory Research Assistant, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, viktoria.bemova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9574-0356>

Munira Sh. Asfandiyarova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Caspian Agrarian Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 8 Severny Block, Solenoe Zaimishche, Chernoyarsky District, Astrakhan Province 416251, Russia, rtuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3801-3734>

Tamara V. Yakusheva, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Experiment Station of VIR, 2 Tsentralnaya St., Botanika Settlement, Krasnodar Territory 352183, Russia, kos-vir@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-2661-2377>

Vera A. Gavrilova, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, v.gavrilova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8110-9168>

Natalya V. Kishlyan, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, natalya-kishlyan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4454-6948>

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 24.05.2023; одобрена после рецензирования 16.06.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 24.05.2023; approved after reviewing on 16.06.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.34:581.543(470.311)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-90-104



Фенологическая оценка скороспелых образцов сои (*Glycine max* (L.) Merr.) в условиях Московской области

Е. В. Власова¹, Ю. В. Горбунова¹, И. В. Сеферова²

¹ Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, Москва, Россия

² Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Викторовна Власова, stevlas@yandex.ru

Актуальность. Сортимент скороспелых сортов, пригодных для выращивания в Нечерноземной зоне РФ, крайне ограничен. Основным методом отбора источников скороспелости для сельскохозяйственного производства и селекционных программ является оценка генофонда в требуемых условиях.

Материалы и методы. Объектом исследования служили образцы сои из коллекции ВИР (81 образец), охарактеризованные как раннеспелые в условиях Северо-Запада РФ. Исследования проводили в 2018–2020 гг. в условиях полевого опыта в Московской области РФ. Максимальные значения суммы активных температур выше 10°C за вегетационный период варьировали от 1642 до 2189°C.

Результаты. Дана оценка образцов по средней продолжительности межфазных периодов: «всходы – цветение» (37–53 дня), «цветение – созревание» (50–85 дней) и «всходы – созревание» (81–130 дней). Крайние даты созревания образцов наблюдали 20 августа – 05 октября, максимальная длина периода от всходов до созревания составляла 93–139 дней. Большая часть изученных образцов характеризовалась коротким периодом «всходы – цветение». Различия между образцами по продолжительности вегетационного периода были обусловлены преимущественно разной длительностью периода «цветение – созревание».

Заключение. Погодные условия в средней полосе России позволяют стабильно получать урожай семян сои при их созревании не позднее I декады сентября. 32 образца из селекционных учреждений РФ, Беларуси, Польши, Германии, Швеции и США удовлетворяли этому условию в течение трех лет наблюдений. Выделенные образцы характеризовались коротким периодом «всходы – цветение» (37–48 дней) и продолжительностью периода «цветение – созревание» 50–66 дней. Они могут быть использованы в качестве источников скороспелости в селекции сои.

Ключевые слова: сорт, скороспелость, продолжительность вегетационного периода, фенология

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации государственных заданий ФГБНУ ФНЦ Садоводства № 0432-2021-0003 «Сохранить, пополнить, изучить генетические коллекции сельскохозяйственных растений и создать репозитории плодовых и ягодных культур, заложенные свободными от вредоносных вирусов растениями» и ВИР по проекту № FGEM-2022-0002 «Выявление возможностей генофонда бобовых культур для оптимизации их селекции и диверсификации использования в различных отраслях народного хозяйства».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Власова Е.В., Горбунова Ю.В., Сеферова И.В. Фенологическая оценка скороспелых образцов сои (*Glycine max* (L.) Merr.) в условиях Московской области. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023; 184(3):90-104. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-90-104

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-90-104

Phenological assessment of early-maturing soybean accessions (*Glycine max* (L.) Merr.) under the conditions of Moscow Province

Elena V. Vlasova¹, Yulia V. Gorbunova¹, Irina V. Seferova²

¹ Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, Moscow, Russia

² N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Elena V. Vlasova, stevlas@yandex.ru

Background. The range of early-maturing cultivars suitable for the Non-Black-Earth Zone of the Russian Federation (RF) is extremely limited. The main method of finding sources of earliness for crop production and breeding is the evaluation of the gene pool under the required conditions.

Materials and methods. The objects of the study were 81 soybean accessions from the VIR collection, precharacterized as early-ripening under the conditions of Northwest Russia. The studies were carried out in 2018–2020 as field trials under the conditions of Moscow Province.

Results. Soybean accessions were characterized by the duration of the emergence-to-flowering (37–53 days), flowering-to-ripening (50–85 days) and emergence-to-ripening (81–130 days) periods. The extreme ripening dates for the accessions were observed from August 20 to October 5, while the maximum duration from emergence to ripening was from 93 to 139 days. The highest sum of active temperatures above 10°C for a growing season ranged from 1642 to 2189°C. Most of the studied accessions were characterized by a short emergence-to-flowering period. Therefore, the differences among accessions in the duration of the growing season were mainly due to the different lengths of their flowering-to-ripening period.

Conclusion. Soybean seeds should ripen no later than the first 10 days of September for a stable harvest under the weather conditions of the Russian Non-Black-Earth Zone. There were 32 accessions from breeding centers of the RF, Belarus, Poland, Germany, Sweden, and the U.S. that met these requirements during the three years of observations. The selected accessions demonstrated a short emergence-to-flowering period of 37–48 days, and the length of their flowering-to-ripening period of 50–66 days, on average for three years. They can be used as sources of earliness in soybean breeding.

Keywords: cultivar, early-ripening, growing season duration, phenology

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state tasks assigned to the Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, No. 0432-2021-0003 “Preserve, replenish, and study genetic collections of agricultural plants and establish repositories of fruit and berry crops planted free of viruses”, and the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 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”.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Vlasova E.V., Gorbunova Yu.V., Seferova I.V. Phenological assessment of early-maturing soybean accessions (*Glycine max* (L.) Merr.) under the conditions of Moscow Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):90-104. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-90-104

Введение

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) является основной производимой и потребляемой в мире масличной культурой и считается наиболее рентабельным источником растительного белка (Wilcox, 2004). Традиционно значительная часть промышленных посевов сои в РФ была сосредоточена на Дальнем Востоке. Однако благодаря достижениям селекции сою стали успешно возделывать в Европейской части РФ. Неуклонный рост площадей посевов сои в последние годы отмечают в областях Центрально-Черноземного региона (Белгородской, Курской, Воронежской, Брянской, Орловской) (Seferova, Vishnyakova, 2018). В условиях Нечерноземной зоны эффективность возделывания существующих сортов сои лимитируются меньшей теплообеспеченностью и более длинным световым днем. Ультраскороспелые сорта, включенные в Госреестр по Центральному региону, все еще нуждаются в улучшении по показателям семенной продуктивности, длины стебля и высоты прикрепления нижнего боба (Vlasova, Gorbunova, 2017). Дальнейший поиск источников скороспелости для сельскохозяйственного производства и селекционных программ в Нечерноземной зоне крайне актуален (Vishnyakova et al., 2017).

Оценка генотипов по признакам раннего цветения и созревания с использованием молекулярно-генетических маркеров в настоящее время является трудновыполнимой задачей. Хотя возможности расширяются по мере идентификации генотипического состава и установления молекулярных механизмов экспрессии генов при их взаимодействии с факторами окружающей среды (Weller, Ortega, 2015; Bu et al., 2021). В настоящее время описаны локусы серии *E* (от *E1* до *E11*), гены *J*, *Tof5*, *Tof11*, *Tof12*, *Tof16*, *LUX*, *Dt1*, *Dt2*, а также ряд локусов количественных признаков (*QTL*), оказывающих влияние на фенологические характеристики сои (Vicente et al., 2016; Fedorina et al., 2022; Lv et al., 2022). Однако для интерпретации результатов секвенирования генома, детекции локусов и установления особенностей функционирования генов требуются базовые фенологические эксперименты.

Знание фенологических характеристик образцов, составляющих коллекции, обуславливает успех их дальнейшего использования в молекулярно-генетических исследованиях и позволяет расширить генетическое разнообразие источников скороспелости, используемых в селекционных программах (Seferova, Novikova, 2015; Vishnyakova et al., 2017; Miladinović et al., 2018; Kumawat et al., 2019).

Ценным исходным материалом для создания сортов, обладающих скороспелостью, слабой фотопериодической чувствительностью и низкой требовательностью к температурам воздуха, являются 342 образца сои, выделенные по результатам скрининга коллекции ВИР в условиях Ленинградской области. В условиях Северо-Запада РФ они демонстрировали способность формировать выполненные семена, но при условии ручного способа уборки с дозариванием бобов на стеблях и досушиванием семян (Seferova, 2016; Seferova, Vishnyakova, 2018). Результаты испытания отдельных образцов из этого набора в условиях Московской области показали, что их созревание происходит в близкие к оптимальным для региона сроки (Vlasova, Gorbunova, 2016; Shafigullin et al., 2016). Поэтому, учитывая накопленный опыт и положительные результаты предыдущих исследований, испытания образцов сои в условиях Московской области были продолжены.

Цель исследования – фенологическая оценка источников скороспелости сои из коллекции ВИР в условиях Московской области.

Материалы и методы

Испытывали 81 образец сои из коллекции ВИР, которые являются достаточно скороспелыми для формирования выполненных бобов и всхожих семян в условиях Северо-Запада РФ (Seferova, 2016). Образцы представляют собой производственные сорта и селекционный материал из 14 стран (табл. 1). Семенная продуктивность и другие хозяйственно ценные признаки у данных образцов существенно различаются и требуют дальнейшего изучения.

Таблица 1. Перечень изученных образцов сои коллекции ВИР
Table 1. List of the tested soybean accessions from the VIR collection

№ по каталогу ВИР	Название	Происхождение	№ по каталогу ВИР	Название	Происхождение
Образцы из Российской Федерации					
10656	ПЭП 22	Ленинградская обл.	9609	СибНИИК 315	Новосибирская обл.
10044	СибНИИСХОЗ 6	Омская обл.	9587	Белор	Белгородская обл.
5546	Тимирязевская 1	г. Москва	9959	Окская	Рязанская обл.
11035	М-12	г. Москва	9960	Светлая	Рязанская обл.
11039	М-31	г. Москва	11114	Касатка	Рязанская обл.
11040	М-70	г. Москва	11115	Малета	Рязанская обл.
9953	Соер 4	Саратовская обл.	8777	Взлет	Амурская обл.
9954	Соер 5	Саратовская обл.	10043	Алтом	Алтайский край
10388	Соер 13-91	Саратовская обл.	11199	Бара	Краснодарский край

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

№ по каталогу ВИР	Название	Происхождение	№ по каталогу ВИР	Название	Происхождение
Образцы из зарубежных стран					
10847	Снежок	Беларусь	11012	Kenchawol	Великобритания
10878	СН 23-42	Беларусь	6817	073-5	Канада
10881	СН 36-74-1	Беларусь	10539	KG-20	Канада
10884	СН 1014-1-20	Беларусь	10679	OT 87.8	Канада
11383	Оресса	Беларусь	4880	Молдавская 65	Молдова
6375	Chabem Wekoju	Польша	11486	Ras 20	Нидерланды
6456	Arctic	Польша	9018	Precoce 90	Румыния
6924	Нордик 3	Польша	11046	HM 648 (Rita)	Словакия
6925	Нордик 5	Польша	5536	Ugra	Швеция
7136	Нордик 138	Польша	5583	840-5-3	Швеция
7410	В	Польша	5586	856-3-3	Швеция
8751	Nordia	Польша	5588	Fiskeby III	Швеция
10624	Aldana	Польша	6275	Fiskeby V	Швеция
10625	РАН-288	Польша	6793	Bravalla	Швеция
10641	LMF	Польша	6884	Szwedzka 4/75	Швеция
10898	1037/2	Польша	9628	748-5	Швеция
10976	Jutro	Польша	11232	1344	Швеция
11589	133/211 MN	Польша	11278	1342	Швеция
11593	Nawiko	Польша	11294	1218-4-4	Швеция
10856	Устя	Украина	11355	1220-118-23	Швеция
10869	Елена	Украина	11357	1312-17-2	Швеция
10886	К-0152	Украина	11360	1320	Швеция
11518	Легенда	Украина	11362	1337	Швеция
11534	Либідь	Украина	11389	1352	Швеция
6887	S-43	Франция	11488	766-2	Швеция
9922	Major	Франция	11489	738-4	Швеция
10606	Kalmit	Франция	6789	711/74	Германия
10964	Baron	Чехия	9837	Sito	Германия
9434	Balesta	США	10549	Semu 8001	Германия
9512	MON-21	США	10551	Semu 8107	Германия
623953	Kosodiguri Extra Early	Япония	11490	Gokuwase Hayabusa Edamame	Япония
6781	Mutante: Stamm 54/145 M4509/73	Германия			

Опыты проводили в 2018–2020 гг. в условиях Ступинского района Московской области на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах в полевом севообороте с использованием традиционных агротехнических мероприятий. Биопрепараты не применяли. Семена высевали рядовым способом на делянках 2 м² в двукратной повторности. Норма высева – 100 семян/м². Уборку производили в фазу полной спелости бобов вручную. Собранные семена использовали для посева на следующий год. Отмечали сроки появления всходов, цветения и созревания. Дату начала цветения определяли от зацветания первых цветков, дату созревания – при побурении бобов и формировании твердых семян у 75% растений на делянке согласно методике ВИР (Vishnyakova et al., 2010).

Для оценки влияния метеорологических параметров на изменчивость фенологических характеристик образцов использовали показатели средней температуры воздуха (t, °C) и суммы осадков в период испытаний (мм). Метеорологические данные получены на метеостанции п. Михнево (55°13' с. ш., 37°96' в. д.; высота над уровнем моря – 178 м).

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью программы MS Excel 2016 с надстройкой XLSTAT. Вычисляли продолжительность межфазных периодов «всходы – цветение» и «цветение – созревание», продолжительность вегетационного периода (ПВП, дней) и сумму активных температур выше 10°C (САТ, °C) за этот период. Данные каждого образца анализировали по средним за три года наблюдений, максимальным значениям за этот период, размаху изменчивости и коэффициенту вариации по годам (Cv, %). Изменчивость фенологических показателей в пределах выборочной совокупности (рис. 1, a, b, c, 3, 5) представляли в виде блочных диаграмм типа «ящик с усами» (“box plots”), в которых границами ящика служили центральные значения между первым и третьим квартилями, а «усы» демонстрировали минимальные и максимальные значения. Межгодовые различия определяли по средним значениям и дисперсии. Оценку существенности разности средних сопряженных выборок проводили по t-критерию Стьюдента. Достоверность различий между дисперсиями устанавливали по критерию F Фишера. Оценку достоверности различий между образцами по числу дней за периоды «цве-

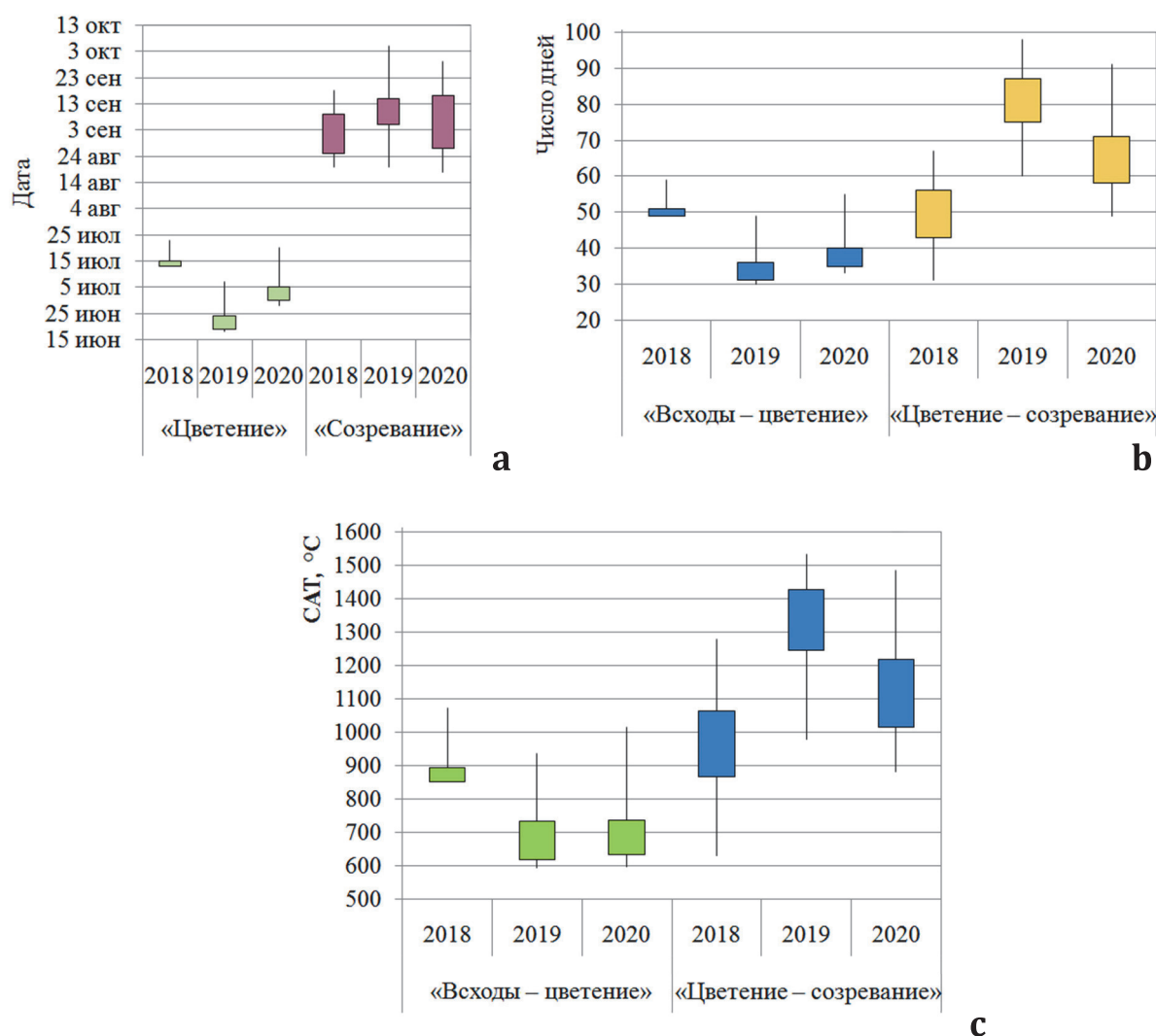


Рис. 1. Изменчивость фенологических характеристик у образцов сои в 2018–2020 гг.: **а** – даты цветения и созревания; **б** – продолжительность периодов «всходы – цветение» и «цветение – созревание»; **в** – сумма активных температур (САТ, °C) за периоды «всходы – цветение» и «цветение – созревание»

Fig. 1. Variability of phenological characteristics in soybean accessions in 2018–2020: **a** – the dates of flowering and ripening; **b** – the number of days from emergence to flowering and from flowering to ripening; **c** – the sum of active temperatures (САТ, °C) during the emergence-to-flowering and flowering-to-ripening periods

тение – созревание» и «всходы – созревание» проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа и наименьшей существенной разности (НСР). Для проверки соответствия вариационных рядов нормальному распределению строили гистограммы и использовали критерий согласия Пирсона хи-квадрат (χ^2), а также показатели эксцесса (E_x) и асимметрии (A_s).

Характеристику образцов сои по продолжительности периодов «всходы – цветение» и «всходы – созревание» проводили в соответствии с Международным классификатором СЭВ (Shchelko et al., 1990) по следующим шкалам:

период «всходы – цветение» (дней): «очень короткий»: 1 – менее 31, 2 – 31–35; «короткий»: 3 – 36–40, 4 – 41–50 дней; «средний»: 5 – 51–60, 6 – 61–70; «длинный»: 7 – 71–80, 8 – 81–90, «очень длинный»: 9 – более 90;

период «всходы – созревание» (дней): «очень короткий»: 1 – менее 81, 2 – 81–90; «короткий»: 3 – 91–100, 4 – 101–110 дней; «средний»: 5 – 111–120, 6 – 121–130; «длинный»: 7 – 131–140, 8 – 141–150; «очень длинный»: 9 – более 150.

Результаты и обсуждение

Посев сои осуществляли 10 мая в 2018 г. и 2 мая в 2019 и 2020 г. Полные всходы отмечали: 25–26 мая в 2018 и 2020 г. и 16–19 мая в 2019 г. Разброс значений дат цветения и созревания, а также продолжительности межфазных периодов и суммы активных температур за эти периоды в пределах изучаемого набора образцов в 2018–2020 гг. демонстрируют рисунки 1, а, б, с.

В таблице 2, а представлены средние и дисперсии показателей продолжительности периодов «всходы – цветение», «цветение – созревание», «всходы – созревание» и суммы активных температур (САТ, °С) за эти периоды. Результаты оценки существенности разности средних по t-критерию Стьюдента (табл. 2, б) во всех случаях указывали на достоверность различий между средними по годам при уровне значимости 0,01, так как для всех сравниваемых пар средних t-фактическое по модулю больше табличного (t_{01}), а значения двухсторонней вероятности (p) были значительно меньше 0,01.

Дисперсия показателей в пределах изучаемой группы образцов, как правило, менялись незначительно. По результатам оценки достоверности различий между дисперсиями по критерию F Фишера (табл. 2, в) было установлено, что только в 2018 г. в период «всходы – цветение» дисперсия по образцам была достоверно ниже, чем в остальные годы как по числу дней, так и по сумме активных температур за этот период. На это указывали показатели отношения дисперсий 2019 / 2018 г. ($F = 3,3$ по числу дней и 2,3 по САТ, °С) и 2020 / 2018 г. ($F = 2,9$ по числу дней и 2,3 по САТ, °С), которые превышали критические значения ($F_{01} = 1,7$), и значения односторонней вероятности p, которые были значительно меньше 0,01. В остальных случаях значения $F < F_{05}$ и $p > 0,05$ указывали на отсутствие оснований отвергать гипотезу о равенстве дисперсий.

Поскольку соя – растение короткого дня, то при увеличении продолжительности светового дня сроки начала ее цветения и созревания наступают позже. С ростом температур развитие сои ускоряется по крайней мере до достижения слишком высоких, неблагоприятных значений (превышающих 27°C). Модифицирующее влияние на темпы развития растений оказывают осадки: их обилие сокращает продолжительность периода «посев – всхо-

ды», но увеличивает длительность периода «всходы – цветение» (Summerfield et al., 1993; Kozlov et al., 2018; Seferova, Novikova, 2015). На основании данных о средней температуре воздуха (t, °С) и сумме осадков в отдельные декады вегетационного периода в 2018–2020 гг. (рис. 2, а, б) нами проанализировано влияние этих метеорологических показателей на межгодовую изменчивость фенологических характеристик сои.

Отличительной особенностью погодных условий в период «посев – всходы» в 2020 г. являлись низкие температуры воздуха во II (+10,0°C) и III (+11,3°C) декадах мая. В этот период дважды (16 и 20 мая) отмечали снижение ночной температуры воздуха до 0,0°C. Несмотря на обилие осадков, в холодных условиях 2020 г. всходы появились на 23–24-й день, в то время как в более теплых условиях 2018 и 2019 г. – на 14–17-й день после посева.

Период «всходы – цветение» оказался самым продолжительным в 2018 г. (в среднем 50,5 дней) из-за низких температур воздуха в I декаде июня: среднедекадная температура воздуха (+12,5°C) была меньше, чем в 2019 и 2020 г. на 8,5 и 3,7°C соответственно. Как было показано выше, в 2018 г. дисперсия продолжительности периода «всходы – цветение» была меньше по сравнению с показателями 2019 и 2020 г. в 3,3 и 2,9 раз соответственно. И если в 2018 г. размах изменчивости по датам цветения составлял 10 дней, то в 2019 и 2020 г. он увеличился вдвое (19 и 22 дня соответственно). Эти данные позволяют предположить, что в относительно холодных условиях хуже проявляются различия между образцами с неодинаковой способностью ускорять цветение при повышении температуры воздуха.

В 2019 г. даты всходов и цветения сои отмечали раньше, чем в 2020 г. в среднем на 7 и 12 дней соответственно. Развитие растений до начала цветения в 2019 г. проходило при менее длинном дне, более высоких температурах воздуха и меньшей влагообеспеченности по сравнению с 2020 г. Совокупность перечисленных факторов способствовала тому, что в 2019 г. продолжительность периода «всходы – цветение» (от 30 до 49 дней, в среднем 33 дня) оказалась короче, чем в 2020 г. в среднем на 5 дней.

Ускоренному прохождению периода «цветение – созревание» (от 31 до 67 дней, в среднем 49,6 дней) в 2018 г. благоприятствовали высокие температуры воздуха со II–III декад июля до II декады сентября. Напротив, в 2019 г. период «цветение – созревание» был наиболее продолжительным (от 60 до 98 дней, в среднем 80,6 дней). Затягивание сроков репродуктивного развития в этом году мы связываем в первую очередь с более холодными условиями в июле и I декаде августа по сравнению с 2018 и 2020 г. Холодной была также III декада сентября 2019 г. (ниже нормы на 1,9°C), в течение которой (после первого заморозка (-1,0°C) 24 сентября) оставшиеся неубранными и продолжавшие вегетацию самые позднеспелые образцы сои сбросили листья.

Таким образом, в нашем исследовании подтвердилось более быстрое прохождение образцами сои межфазных периодов «посев – всходы», «всходы – цветение» и «цветение – созревание» в условиях с более высокой теплообеспеченностью. Сумма активных температур за межфазный период напрямую зависит от числа дней и средней температуры воздуха. Вследствие того, что последние два показателя находятся в отрицательной зависимости, сумма активных температур меньше варьирует по годам по сравнению с числом дней. На это указывают значения коэффициентов вариации (C_v , %). По числу дней изменчивость высокая: в среднем по образцам

Таблица 2. Оценка межгодовых различий средней продолжительности межфазных периодов и суммы активных температур за эти периоды**Table 2. Assessment of the differences between years in the mean duration of the interphase periods and the sums of active temperatures in these periods**

Периоды:	«Всходы – цветение»			«Цветение – созревание»			«Всходы – созревание»		
а) Средние и дисперсии по годам									
Годы:	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
по числу дней:									
Среднее	50,5	33,4	38,4	49,6	80,6	64,6	100,1	114,0	103,0
Дисперсия	6,4	21,2	18,9	66,7	63,8	82,1	67,2	77,2	86,7
по САТ, °С									
Среднее	884	666	702	983	1323	1113	1867	1989	1815
Дисперсия	3313	7551	7544	21210	14590	18372	20546	15345	17841
б) Результаты оценки существенности разности средних по t-критерию									
Сравниваемые годы:	t факт.	p	t факт.	p	t факт.	p	t факт.	p	
по числу дней:									
2020–2019	11,3	2,6E-18	-16,1	8,6E-27	-12,0	1,2E-19			
2019–2018	-35,8	5,2E-51	41,4	8,4E-56	18,6	8,6E-31			
2020–2018	-27,4	2,3E-42	16,4	2,7E-27	3,5	6,8E-04			
по САТ, °С:									
2020–2019	4,1	8,6E-05	-13,3	6,1E-22	-13,3	7,1E-22			
2019–2018	-23,6	8,4E-38	25,8	1,7E-40	10,4	1,6E-16			
2020–2018	-20,1	4,5E-33	8,2	3,5E-12	-4,1	1,0E-04			
<p>t факт. – фактическое значение критерия Стьюдента. Положительное либо отрицательное значение t факт. указывает: среднее арифметическое какого года выше. Для сравнения с t критическим используют модуль значения t фактического;</p> <p>p – двухсторонняя доверительная вероятность; малые значения представлены в экспоненциальном формате; $t_{01} = 2,6$ – t критическое на 1-процентном уровне;</p>									
в) Результаты оценки достоверности различий между дисперсиями по критерию F									
Сравниваемые годы:	F	p	F	p	F	p	F	p	
по числу дней:									
2020–2019	1,1	0,3	1,3	0,13	1,1	0,3			
2019–2018	3,3	1,1E-07	1,0	0,42	1,2	0,3			
2020–2018	2,9	1,4E-06	1,2	0,18	1,3	0,1			
по САТ, °С:									
2020–2019	1,0	0,5	1,2	0,2	1,1	0,3			
2019–2018	2,3	1,5E-04	1,4	0,1	1,2	0,2			
2020–2018	2,3	1,5E-04	1,1	0,3	1,1	0,3			
<p>p – односторонняя вероятность; малые значения представлены в экспоненциальном формате;</p> <p>F – фактическое значение критерия Фишера;</p> <p>$F_{05} = 1,5$ и $F_{01} = 1,7$ – F критическое одностороннее на 5- и 1-процентных уровнях, соответственно</p>									

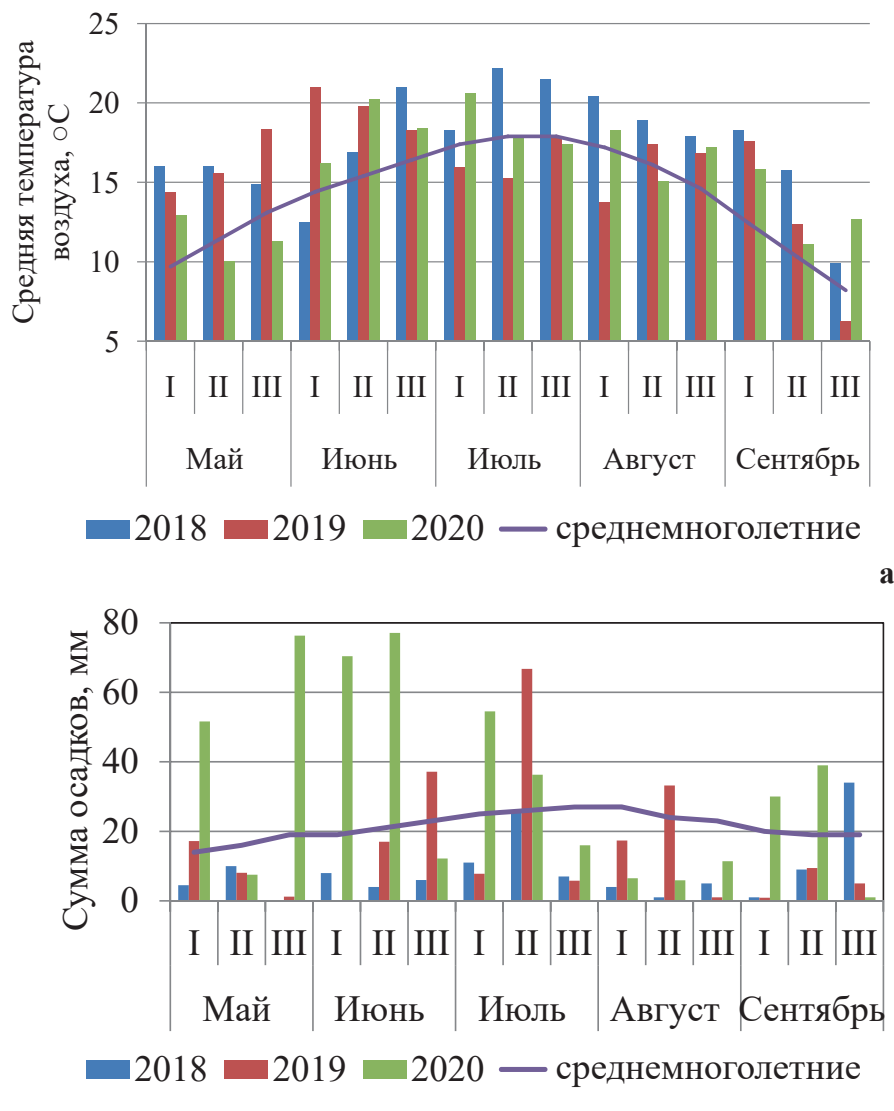


Рис. 2. Среднедекадные метеорологические показатели в 2018–2020 гг.:
 а – среднесуточная температура воздуха; б – сумма осадков

Fig. 2. Ten-day meteorological parameters in 2018–2020:
 а – mean air temperatures; б – precipitation amounts

$S_v = 22,5\%$ («всходы – цветение») и $24,4\%$ («цветение – созревание»), а по сумме активных температур – средняя ($S_v = 16,9\%$ и $16,6\%$ соответственно) (рис. 3). Хотя в целом продолжительность периодов «всходы – цветение», «цветение – созревание» (см. рис. 1, б) и сумма активных температур (см. рис. 1, с) за эти периоды менялись по годам в одном направлении. Коэффициенты вариации продолжительности периода «всходы – созревание» в среднем по образцам составляли: $S_v = 7,9\%$ (по числу дней) и $S_v = 5,6\%$ (по САТ за этот период). Их значения были в три раза ниже по сравнению с теми же показателями длины периодов «всходы – цветение» и «цветение – созревание» (см. рис. 3), и указывали на слабую изменчивость признака по годам. Возможно, что начало созревания сои регулируется длительностью светового дня и таким образом оказывает стабилизирующее влияние на продолжительность вегетационного периода.

Гистограмма вариационного ряда распределения образцов по длительности периода «всходы – цветение» (рис. 4, а) отображает превалирование ранозацветающих

образцов. Вариационная кривая характеризуется островершинностью (эксцесс $E_x = 4,92$) и правосторонней асимметрией (асимметричность $A_s = 2,13$).

Вариационный ряд по длительности периода «цветение – созревание» (рис. 4 б) демонстрирует соответствие нормальному распределению частот, поскольку показатели эксцесса и асимметрии близки к нулю ($E_x = 0,07$; $A_s = 0,35$), χ^2 фактическое (2,54) меньше χ^2 критического (7,81) с вероятностью 0,47, что больше уровня значимости 0,05.

Результаты оценки вариационного ряда по продолжительности периода «всходы – созревание» (рис. 4, с) также подтверждают его соответствие нормальному распределению, поскольку $E_x = 0,56$; $A_s = 0,03$; χ^2 фактическое (1,71) меньше χ^2 критического (7,81) с вероятностью 0,63, превышающей уровень значимости 0,05. В силу того, что подавляющее большинство образцов характеризовалось коротким периодом «всходы – цветение», полиморфизм представленного набора образцов по продолжительности вегетационного периода был

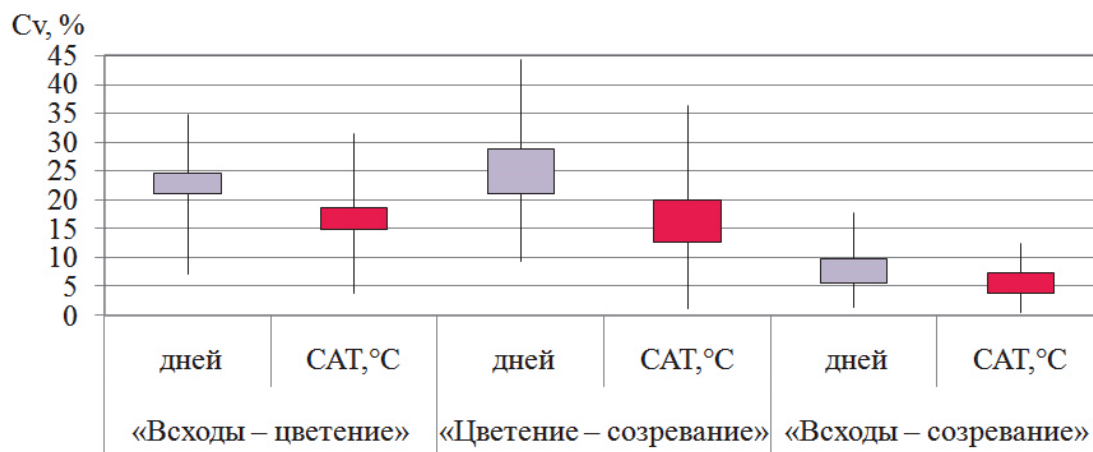


Рис. 3. Коэффициенты вариации продолжительности межфазных периодов и суммы активных температур, 2018–2020 гг. (Cv, % – коэффициент вариации, САТ, °С – сумма активных температур)

Fig. 3. Variability between years in the duration of the interphase periods (days) and the sums of active temperatures in 2018–2020 (Cv, % – coefficient of variation; САТ, °С – sum of active temperatures)

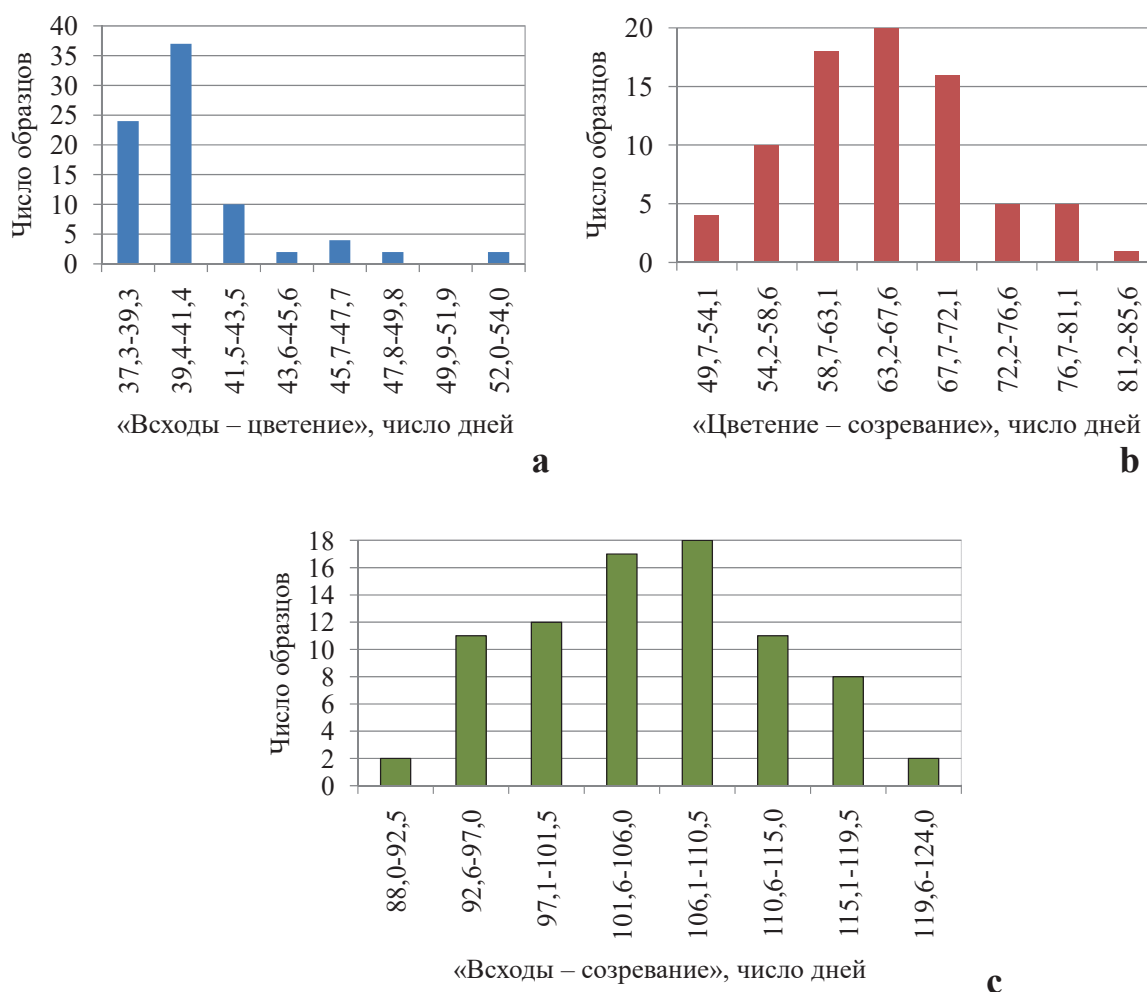


Рис. 4. Распределение образцов сои по средней продолжительности межфазных периодов, 2018–2020 гг.: а – «всходы – цветение», б – «цветение – созревание», с – «всходы – созревание»

Fig. 4. Frequency distribution of soybean accessions according to the duration of interphase periods (on average for 2018–2020): а – from emergence to flowering; б – from flowering to ripening; с – from emergence to ripening

обусловлен преимущественно различной длительностью периода «цветение – созревание».

При анализе данных продолжительности периодов «цветение – созревание» и «всходы – созревание» методом двухфакторного дисперсионного анализа для всех источников вариации (образец, год, взаимодействие) получены значения доверительной вероятности (p) значительно меньше 0,01, а показатели критерия Фишера (F фактического) превосходили табличные значения на 1-процентном уровне ($F_{0.01}$) (табл. 3). Полученные данные свидетельствовали о достоверности вклада в изменчивость изучаемых признаков как генетических различий между образцами, так и условий лет изучения. Также имел место эффект взаимодействия «образец – год», что указывало на несколько различную реакцию образцов на условия года изучения. Значения $HCP_{0.01}$ для оценки существенности частных различий между средними по образцам по продолжительности периода «всходы – созревание» на 1-процентном уровне составляли 4,9 дней, что меньше интервалов, по которым разделяют образцы в Международном классификаторе СЭВ (Shchelko et al., 1990). Аналогичный показатель для периода «цветение – созревание» составил: $HCP_{0.01} = 4,3$ дня.

1 ('Светлая' – 50 дней) и 5 ('Елена' – 81 день и '1344' – 85 дней).

Следует отметить, что любая характеристика образцов по группам спелости, построенная по усредненным показателям, не позволяет оценить индивидуальную реакцию образцов на внешние условия в отдельные годы. В частности, при производственном возделывании сортов сои важна информация о наиболее поздних датах созревания и максимальных значениях продолжительности периода «всходы – созревание» и суммы активных температур выше 10°C за вегетационный период, отмеченных за период наблюдений. Данные характеристики изученных нами образцов представлены в табл. 5.

Таким образом, по датам созревания самым скороспелым оказался сорт 'Светлая' (Рязанская обл.), который был готов к уборке в разные годы 18–20 августа. Это единственный сорт с "очень коротким" (81–90 дней) периодом «всходы – созревание». Он характеризовался коротким периодом «всходы – цветение» и отличался наименее продолжительным периодом «цветение – созревание» (50 дней в среднем за 3 года наблюдений).

В течение III декады августа вызревали сорта: 'Окская', 'Касатка', 'Малета' (Рязанская обл.); 'СибНИИК 315' (Новосибирская обл.); 'СибНИИХОЗ 6' (Омская обл.);

Таблица 3. Результаты двухфакторного дисперсионного анализа продолжительности периода «цветение – созревание» и «всходы – созревание»

Table 3. Results of a two-way ANOVA for the duration of the flowering-to-ripening and emergence-to-ripening periods

Источник вариации	«цветение – созревание»		«всходы – созревание»		$F_{0.01}^{**}$
	F факт.*	p^{***}	F факт.*	p^{***}	
Образец	36,1	1,8E-99	34,2	6,19E-97	1,50
Год	4473,3	2,0E-192	760,7	2,5E-105	4,69
Взаимодействие	8,8	3,6E-50	6,2	1,07E-36	1,39

* F факт. – фактическое значение критерия Фишера; ** $F_{0.01}$ – критическое значение критерия Фишера при уровне значимости 0,01; *** p – значения доверительной вероятности (представлены в экспоненциальном формате)

* F fact. – the actual value of the Fisher criterion; ** $F_{0.01}$ – the critical value of the Fisher criterion at a significance level of 0.01; *** p – the probability value (presented in an exponential format)

Группировка образцов в соответствии с предлагаемыми в Международном классификаторе СЭВ (Shchelko et al., 1990) интервалами продолжительности периодов «всходы – цветение» и «всходы – созревание» (в среднем за 3 года) представлена в таблице 4. В соответствии со шкалой классификатора почти все образцы имели "короткий" период «всходы – цветение» (36–40 и 41–50 дней) и только у двух ('KG-20' и 'Mutante: Stamm 54/145 M4509/73') он был средней длительности (51–60 дней). По продолжительности периода «всходы – созревание» (от 88 до 124 дней) образцы представляли группы 2 – 6, характеризовавшиеся "очень коротким", "коротким" и "средним" вегетационным периодом. Крайние группы 2 и 6 содержали по одному образцу ('Светлая' – 88 дней и '1344' – 124 дня). Длительность периода «цветение – созревание» варьировала в пределах 50–85 дней. Классификатор не дает градации по этому признаку. Мы предлагаем выделять следующие группы по длительности периода «цветение – созревание»: 1 – менее 51; 2 – 51–60, 3 – 61–70, 4 – 71–80, 5 – 81–90 дней. Минимальное количество образцов было представлено в крайних группах:

'Соер 5', (Саратовская обл.); 'Nawiko' (Польша); 'Balesta' (США). Эти сорта характеризовались "коротким" (91–100 дней) вегетационным периодом, ранним цветением и сравнительно непродолжительным периодом «цветение – созревание» (51–60 дней).

До конца I декады сентября достигали полной спелости образцы: 'Соер 13-91' (Саратовская обл.); 'Нордик 3', 'Нордик 5', 'Нордик 138', 'В', 'LMF', '1037/2' (Польша); '711/74' (Германия); '738-4', '766-2', '1320', '1337', '1352', '840-5-3', '1220-118-23', '1312-17-2', 'Szwedzka 4/75', 'Bravalla', 'Ugra' (Швеция); 'СН 23-42' (Беларусь), 'Тимирязевская 1', 'М-31' (Москва); 'ПЭП 22' (Ленинградская обл.). Эти образцы являются представителями групп с "коротким" (91–110 дней) вегетационным периодом. Они характеризовались ранним цветением и продолжительностью периода «цветение – созревание» от 51 до 66 дней.

Сроки созревания остальных образцов были отмечены позже I декады сентября, что нежелательно для возделывания в зоне испытания, хотя погодные условия в целом позволяли проводить их уборку по достижении

Таблица 4. Фенологическая характеристика изученных образцов сои (2018–2020 гг.)**Table 4. Phenological description of the studied soybean accessions (2018–2020)**

Средняя продолжительность межфазных периодов (дней):				
«всходы – созревание»*	“всходы – цветение”**:			«цветение – созревание»
	3. “короткий” 36–40	4. “короткий” 41–50	5. “средний” 51–60	
2. “очень короткий”, 81–90	Светлая			менее 51
3. “короткий”, 91–100	Касатка, Малета, Соер 5, Соер 13-91, СибНИИСХОЗ 6, СибНИИК 315, М-31, Balesta, 1320, 1337, 1352, 766-2, 1220-118-23, 1312-17-2, Szwedzka 4/75, Bravalla, Nawiko, В, Нордик 5, Нордик 3, Arctic	Окская, 711/74		51–60
4. “короткий”, 101–110		Тимирязевская 1, Ros 2D		51–60
	М-12, М-70, Белор, Соер 4, Взлет, Алтом, СН 23-42, Kenchawol, S-43, Sito, Semu 8001, Semu 8107, LMF, Jutro, РАН-288, Aldana, 738-4, 748-5, 840-5-3, 856-3-3, 1342, 1218-4-4, Ugra, Fiskeby V	ПЭП 22, Бара, Оресса, СН 1014-1-20, 133/211 MN, 1037/2, Nordia, Нордик-138, Fiskeby III		61–70
	СН 36-74-1			71–80
5. “средний”, 111–120		Молдавская 65, Легенда, Chabem Wekoju, Baron, НМ 648 (Rita)	Mutante: Stamm 54/145 M4509/73, KG-20	61–70
	Снежок, Либідь, К-0152, Kalmit, Major, OT 87.8, 073-5, MON-21	Kosodiguri Extra Early, Gokuwase Hayabusa Edamame, Устя, Precose 90		71–80
	Елена			81–90
6. “средний”, 121–130	1344			81–90

* – в заголовках столбцов и строк – группы и соответствующие им интервалы продолжительности периодов «всходы – цветение» и «всходы – созревание» согласно Международному классификатору СЭВ (Shchelko et al., 1990)

** – the column and row headings are groups and corresponding intervals of the duration of the emergence-to-flowering and emergence-to-ripening periods according to the International COMECON List of Descriptors (Shchelko et al., 1990)

полной спелости и без дальнейшего дозаривания. Только в 2019 г. четыре образца закончили репродуктивное развитие лишь после первых заморозков: ‘Mutante: Stamm 54/145 M4509/73’ (Германия) (30 сентября), ‘НМ 648 (Rita)’ (Словакия) (5 октября), ‘Елена’ (Украина) и ‘1344’ (Швеция) (29 сентября).

Необходимо отметить, что среди тех образцов, которые ежегодно достигали полной спелости в течение августа и I декады сентября, присутствуют как образцы из РФ, так и из стран Европы (Швеции, Польши, Германии, Беларуси) и США. Изменчивость продолжительности периода «всходы – созревание» у групп образцов, сформированных по их географическому происхождению, от-

ражена на рисунке 5. В целом образцы из Украины, Молдовы, Румынии, Словакии, Чехии, Канады и Японии характеризовались наиболее длительным вегетационным периодом, а группы образцов из России, Польши, Германии, Нидерландов, Великобритании, Швеции и США были крайне неоднородны по этому признаку.

Различное географическое происхождение скороспелых образцов сои свидетельствует о заинтересованности исследователей разных стран в создании сортов, адаптированных по фенологическим характеристикам к нетрадиционным регионам возделывания сои.

При оценке скороспелости сои Г. С. Посыпанов предлагал использовать градацию по сумме активных темпера-

Таблица 5. Максимальные значения даты созревания, продолжительности вегетационного периода у образцов сои, 2018–2020 гг.**Table 5.** Maximum values of the ripening date and the duration of the growing season for soybean accessions in 2018–2020

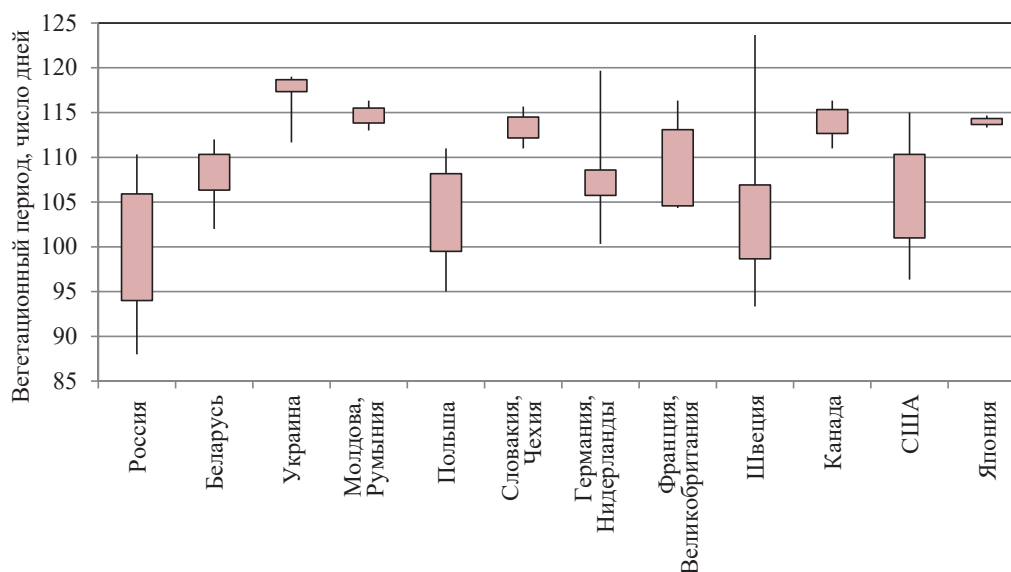
Название и происхождение образцов	Максимальные значения:		
	даты созревания	ПВП, дней*	САТ, °С**
Светлая	20 августа	93	1642
Окская, Касатка, Малета, Соер 5, СибНИИСХОЗ 6, СибНИИК 315, Balesta, Nawiko	27 – 31 августа	93–104	1657–1827
Соер 13-91, СН 23-42, В, Нордик 5, 711/74, 1320, 1337, 1352, 766-2, 1220-118-23, 1312-17-2, Bravalla, Szwedzka 4/75	1 – 5 сентября	100–109	1768–1914
Тимирязевская 1, М-31, ПЭП 22, Нордик 3, Нордик-138, 1037/2, LMF, 738-4, 840-5-3, Ugra	9 – 10 сентября	100–113	1914–1995
М-12, М-70, Бара, Взлет, Белор, Соер 4, СН 1014-1-20, Оресса, Arctic, 133/211 MN, Jutro, Baron, S-43, Major, Kenchawol, 748-5, 1342, 1218-4-4, Fiskeby V, Semu 8107, Sito, Semu 8001, Ros 2D	11 – 15 сентября	113–119	2022–2083
Алтом, СН 36-74-1, Снежок, Легенда, Молдавская 65, Chabem Wekoju, Nordia, RAH-288, Aldana, MON-21, OT 87.8, 073-5, KG-20, Precoce 90, Kalmit, Kosodiguri Extra Early, Gokuwase Hayabusa Edamame, 856-3-3, Fiskeby III	16 – 20 сентября	113–124	2000–2126
К-0152, Устя, Либідь	24 – 25 сентября	121–129	2083–2149
Елена, Mutante: Stamm 54/145 M4509/73, 1344	29 – 30 сентября	126–134	2115–2189
НМ 648 (Rita)	5 октября	139	2189

Примечание: * ПВП – продолжительность вегетационного периода от даты всходов до даты созревания (дней);

** САТ – сумма активных температур выше 10°C за вегетационный период

Note: * ПВП – the duration of the growing season (days);

** САТ – the sum of active temperatures above 10°C for the growing season

**Рис. 5.** Средняя продолжительность вегетационного периода у образцов сои разного географического происхождения (2018–2020 гг.)**Fig. 5.** The number of days from emergence to maturity for the studied set of soybean accessions, on average for 2018–2020, depending on their geographic origin

тур, наряду с классификацией по продолжительности периода от всходов до созревания (Еникеева, Каразанова, 2000). Однако сгруппировать образцы одновременно по обоим показателям крайне проблематично из-за несоответствия шкал оценки (Vlasova, Gorbunova, 2016). Установить строгую взаимосвязь показателей затруднительно также из-за различной их вариабельности по годам, отмеченной в текущем опыте. В среднем за три года проведенных наблюдений группам продолжительности периода «всходы – созревание», согласно Международному классификатору СЭВ (Shchelko et al., 1990), соответствовала следующая сумма активных температур: 2. “очень короткий” – 81–90 дней – менее 1600°C; “короткий”: 3 – 91–100 дней – 1600–1800°C, 4 – 101–110 дней – 1801–1970°C; “средний”: 5 – 111–120 дней – 1971–2100°C, 6 – 121–130 дней – более 2100°C.

Значительный полиморфизм по фенологическим характеристикам исследуемой группы образцов, установленный при выращивании их в условиях Московской области, свидетельствует о генетическом разнообразии, которое трудно выявить при возделывании тех же образцов при более коротком дне и более высоких температурах воздуха. Это свойство скороспелых образцов сои отмечали также Jia et al. (2014). Однако, как показали результаты нашего эксперимента, при пониженных температурах воздуха размах варьирования продолжительности периода «всходы – цветение» может снижаться, что при прочих равных условиях может приводить к уменьшению дифференциации образцов по продолжительности вегетационного периода.

Следует отметить, что в изученной нами выборке полиморфизм по срокам цветения имел меньшее влияние на различную скороспелость образцов по сравнению с продолжительностью периода «цветение – созревание». Это свойство источников скороспелости отмечали также Н. Jia et al. (2014) и Я. В Федорина с соавторами (Fedorina et al., 2022). И связано оно с тем, что формы, характеризующиеся ранним созреванием в холодных регионах, обладают слабой фотопериодической чувствительностью фазы цветения к долготе дня. Поэтому создание трансгрессивных форм в селекции сои на скороспелость возможно путем сокращения репродуктивного периода развития после цветения.

Заключение

По результатам трехлетних испытаний в условиях Московской области проведена фенологическая оценка 81 образца сои коллекции ВИР. В соответствии с Международным классификатором СЭВ (Shchelko et al., 1990) в среднем за 3 года длительность периода «всходы – созревание» у исследуемых образцов оценивалась от “очень короткой” до “средней” (от 81 до 130 дней). Большинство образцов имели “короткий” период «всходы – цветение» (37–50 дней), и только у двух образцов он был “средней” продолжительности (52–53 дня). Поэтому полиморфизм представленного набора образцов по продолжительности вегетационного периода был обусловлен преимущественно различной длительностью периода «цветение – созревание» (от 50 до 85 дней). Отмечено влияние температуры воздуха на варьирование по годам продолжительности периодов «всходы – цветение» и «цветение – созревание».

Испытания в различных погодных условиях позволили выделить 32 образца, способных вызревать в условиях Московской области в оптимальные сроки – до конца

I декады сентября. Выделенные источники характеризовались коротким периодом «всходы – цветение» (37–48 дней) и продолжительностью периода «цветение – созревание» 50–66 дней.

References / Литература

- Bu T., Lu S., Wang K., Dong L., Li S., Xie Q. et al. A critical role of the soybean evening complex in the control of photoperiod sensitivity and adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2021;118(8):e2010241118. DOI: 10.1073/pnas.2010241118
- Еникеева Л.Н., Каразанова Л.Н. Soybean: Scientific and production directory (Soya: Nauchno-proizvodstvenny spravochnik). Moscow: RASKhN; 2000. [in Russian] (Еникеева Л.Н., Каразанова Л.Н. Соя: Научно-производственный справочник. Москва: РАСХН; 2000).
- Fedorina J.V., Khlestkina E.K., Seferova I.V., Vishnyakova M.A. Genetic mechanisms underlying the expansion of soybean *Glycine max* (L.) Merr. cultivation to the north. *Ecological Genetics*. 2022;20(1):13-30. [in Russian] (Федорина Я.В., Хлесткина Е.К., Сеферова И.В., Вишнякова М.А. Молекулярно-генетические механизмы, лежащие в основе продвижения ареала возделывания сои к северу. *Экологическая генетика*. 2022;20(1):13-30). DOI: 10.17816/ecogen83879
- Jia H., Jiang B., Wu C., Lu W., Hou W., Sun S. et al. Maturity group classification and maturity locus genotyping of early-maturing soybean varieties from high-latitude cold regions. *PLoS One*. 2014;9(4):e94139. DOI: 10.1371/journal.pone.0094139
- Kozlov K.N., Novikova L.Yu., Seferova I.V., Samsonova M.G. A mathematical model of the impact of climatic factors on soybean development. *Biophysics*. 2018;63(1):175-176. [in Russian] (Козлов К.Н., Новикова Л.Ю., Сеферова И.В., Самсонова М.Г. Математическая модель влияния климатических факторов на развитие сои. *Биофизика*. 2018;63(1):175-176). DOI: 10.1134/S0006350918010086
- Kumawat G., Yadav A., Satpute G.K., Gireesh C., Patel R., Shivakumar M. et al. Genetic relationship, population structure analysis and allelic characterization of flowering and maturity genes *E1*, *E2*, *E3* and *E4* among 90 Indian soybean landraces. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2019;25(8):387-398. DOI: 10.1007/s12298-018-0615-3
- Lv T., Wang L., Zhang C., Liu S., Wang J., Lu S. et al. Identification of two quantitative genes controlling soybean flowering using bulked-segregant analysis and genetic mapping. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:987073. DOI: 10.3389/fpls.2022.987073
- Miladinović J., Čeran M., Đorđević V., Balešević-Tubić S., Petrović K., Đukić V. et al. Allelic variation and distribution of the major maturity genes in different soybean collections. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:1286. DOI: 10.3389/fpls.2018.01286
- Seferova I.V. Soybean in the north-west of the Russian Federation. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2016;3(167):101-105. [in Russian] (Сеферова И.В. Соя в условиях северо-запада Российской Федерации. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2016;3(167):101-105).
- Seferova I.V., Novikova L.Y. Climatic factors affecting the development of early soybean accessions in the environments of the Russian Northwest. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2015;176(1):88-97. [in Russian] (Сеферова И.В., Новикова Л.Ю. Климатические факторы, влияющие на развитие скороспелых образцов

- сои в условиях Северо-Запада РФ. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2015;176(1):88-97. DOI:10.30901/2227-8834-2015-1-88-97
- Seferova I.V., Vishnyakova M.A. Soybean gene pool from VIR collection for the promotion of agronomical area of the crop to the north. *Legumes and Groat Crops*. 2018;3(27):41-47. [in Russian] (Сеферова И.В., Вишнякова М.А. Генофонд сои из коллекции ВИР для продвижения агрономического ареала культуры к северу. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2018;3(27):41-47). DOI: 10.24411/2309-348X-2018-11030
- Shafigullin D.R., Romanova E.V., Gins M.S., Pronina E.P., Gins V.K. Evaluation and selection of different varieties and lines of soybean for breeding for valuable traits in the Central European part of Russia. *Vegetable Crops of Russia*. 2016;2(31):28-32. [in Russian] (Шафигуллин Д.Р., Романова Е.В., Гинс М.С., Пронина Е.П., Гинс В.К. Оценка и подбор исходного материала для селекции сои на хозяйственно ценные признаки в условиях Центрального района Европейской части России. *Овощи России*. 2016;2(31):28-32).
- Shchelko L., Sedova T., Korneychuk V., Pastucha L., Sinsky T., Hofirek P., Bares I., Sehnaeva J. The international COMECON list of descriptors for the genus *Glycine* Willd. *Ленинград: ВИР; 1990*. [in Russian] (Щелко Л., Седова Т., Корнейчук В., Пастуха Л., Синский Т., Гофирек П., Бареш И., Сегналова Я. Международный классификатор СЭВ рода *Glycine* Willd. Ленинград: ВИР; 1990).
- Summerfield R.J., Lawn R.J., Qi A., Ellis R.H., Roberts E.H., Chay P.M., et al. Towards the reliable prediction of time to flowering in 6 annual crops. II. Soybean (*Glycine max*). *Experimental Agriculture*. 1993;29(3):253-289. DOI: 10.1017/S0014479700020858
- Vicente D., Schuster I., Lazzari F., Paranzini J.P.D., de Oliveira M.A.R., Prete C.E.C. Mapping and validation of molecular markers of genes *Dt1* and *Dt2* to determine the type of stem growth in soybean. *Acta Scientiarum: Agronomy*. 2016;38(1):61-68. DOI: 10.4025/ACTASCIAGRON.V38I1.26216
- Vishnyakova M.A., Buravtseva T.V., Bulyntsev S.V., Burylaeva M.O., Semenova E.V., Seferova I.V., Aleksandrova T.G., Yankov I.I., Egorova G.P., Gerasimova T.V., Drugova E.V. Methodological guidelines. The VIR global collection of grain legume crop genetic resources: replenishment, conservation and studying (Metodicheskiye ukazaniya. Kolleksiya mirovykh geneticheskikh resursov zernovykh bobovykh VIR: popolneniye, sokhraneniye i izucheniye). St. Petersburg: VIR; 2010. [in Russian] (Вишнякова М.А., Буравцева Т.В., Булынтцев С.В., Бурляева М.О., Семенова Е.В., Сеферова И.В., Александрова Т.Г., Янков И.И., Егорова Г.П., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Методические указания. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение. Санкт-Петербург: ВИР; 2010).
- Vishnyakova M.A., Seferova I.V., Samsonova M.G. Genetic sources required for soybean breeding in the context of new biotechnologies (review). *Agricultural Biology*. 2017;52(5):905-916. [in Russian] (Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Самсонова М.Г. Требования к исходному материалу для селекции сои в контексте современных биотехнологий (обзор). *Сельскохозяйственная биология*. 2017;52(5):905-916). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.5.905rus
- Vlasova E.V., Gorbunova Yu.V. Comparative evaluation of seed productivity of soybean early ripening samples from VIR collection. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2017;51:129-134. [in Russian] (Власова Е.В., Горбунова Ю.В. Сравнительная оценка семенной продуктивности скороспелых образцов сои из коллекции ВИР. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2017;51:129-134).
- Vlasova E.V., Gorbunova Yu.V. Estimation the early-ripening soybean varieties from VIR collection by ability to maturing in Central Russia. *Fodder Production*. 2016;(6):36-40. [in Russian] (Власова Е.В., Горбунова Ю.В. Оценка скороспелых образцов сои из коллекции ВИР по способности вызревать в средней полосе России. *Кормопроизводство*. 2016;(6):36-40).
- Weller J.L., Ortega R. Genetic control of flowering time in legumes. *Frontiers in Plant Science*. 2015;6:207. DOI: 10.3389/fpls.2015.00207
- Wilcox J.R. World distribution and trade of soybean. In: R.M. Shibles, J.E. Harper, R.F. Wilson, R.C. Shoemaker (eds). *Soybeans: Improvement, Production, and Uses. Vol. 16. Chapter 1*. 3rd ed. Madison, WI: American Society of Agronomy; 2004. p.1-14. DOI: 10.2134/agronmonogr16.3ed.c1

Информация об авторах

Елена Викторовна Власова, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, 115598 Россия, Москва, ул. Загорьевская, 4, stevlas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3285-8186>

Юлия Владимировна Горбунова, младший научный сотрудник, Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства, 115598 Россия, Москва, ул. Загорьевская, 4, u.v.gorbunova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4948-3627>

Ирина Владимировна Сеферова, 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, i.seferova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3308-9198>

Information about the authors

Elena V. Vlasova, Cand. Sci (Biology), Head of a Laboratory, Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, 4 Zagorevskaya St., Moscow, 115598, Russia, stevlas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3285-8186>

Yulia V. Gorbunova, Associate Researcher, Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, 4 Zagorevskaya St., Moscow, 115598, Russia, u.v.gorbunova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4948-3627>

Irina V. Seferova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.seferova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3308-9198>

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 18.01.2023; одобрена после рецензирования 21.06.2023; принята к публикации 04.09.2023.

The article was submitted on 18.01.2023; approved after reviewing on 21.06.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья

УДК 635.652.2:631.524

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-105-115



Стабильность продуктивности и периода вегетации фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.) в контрастных эколого-географических условиях

Л. Ю. Новикова, А. А. Берзегова, М. В. Гуркина, Т. В. Буравцева

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

Автор, ответственный за переписку: Тамара Васильевна Буравцева, t.buravtseva@vir.nw.ru

Актуальность. Изучение степени влияния окружающей среды на селекционно значимые признаки актуально в условиях изменения климата. Выявление стабильных образцов при оценке исходного материала в контрастных эколого-географических условиях способно повысить эффективность селекционной работы.

Материалы и методы. В контрастных условиях Майкопа и Астрахани в течение трех лет высевались 30 образцов фасоли из коллекции ВИР. Изучение восьми хозяйственно ценных признаков осуществляли согласно методике ВИР. Статистический анализ проводили методами ANOVA, корреляционного и регрессионного анализа. Экологическую стабильность продуктивности оценивали по S. A. Eberhart и W. A. Russell (1966).

Результаты и обсуждение. Изучение вариабельности признаков показало относительную стабильность продолжительности межфазного периода «посев – созревание» (средний коэффициент вариации – 10,9%) и массы 1000 семян (17,3%). Влияние генотипа было определяющим фактором изменчивости массы 1000 семян (67,6% дисперсии). Продолжительность периода вегетации, число бобов на растение, число семян в бобе и продуктивность больше зависели от условий среды. В обоих пунктах исследования продуктивность образца зависит от числа бобов ($r = 0,80; 0,91$), масса 1000 семян отрицательно связана с числом семян в бобе ($r = -0,38; -0,47$). Период вегетации в Майкопе зависит от периода «цветение – созревание» ($r = 0,73$); в Астрахани – от «всходы – цветение» ($r = 0,85$). Установлено, что продолжительность межфазных периодов «посев – всходы» и «всходы – цветение» достоверно коррелирует со средней температурой ($r = -0,87; 0,87$ соответственно); продолжительность периода «цветение – созревание» от средней температуры не зависит.

Заключение. Выделены относительно стабильные образцы по признакам продуктивности и продолжительности периода вегетации, которые имеют как детерминантный, так и индетерминантный характер роста, что свидетельствует о перспективности селекционной работы с разными группами фасоли.

Ключевые слова: фасоль, коллекция ВИР, изучение, климатические условия, селекционные признаки, ANOVA, корреляция, регрессия

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по теме № FGEM-2022-0002 «Выявление возможностей генофонда бобовых культур для оптимизации их селекции и диверсификации использования в различных отраслях народного хозяйства».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Новикова Л.Ю., Берзегова А.А., Гуркина М.В., Буравцева Т.В. Стабильность продуктивности и периода вегетации фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.) в контрастных эколого-географических условиях. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):105-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-105-115

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-105-115

Productivity and growing-season stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under contrasting ecogeographic conditions

Liubov Yu. Novikova, Aneta A. Berzegova, Maria V. Gurkina, Tamara V. Buravtseva

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

Corresponding author: Tamara V. Buravtseva, t.buravtseva@vir.nw.ru

Background. Studying the effect size of the environment versus breeding-oriented plant traits is relevant under climate change. Identification of stable accessions while evaluating the source material in contrasting environments can increase the efficiency of breeding practice.

Materials and methods. Thirty common bean accessions from the VIR collection were sown for 3 years in the contrasting environments of Maikop and Astrakhan. Eight useful agronomic traits were studied according to VIR's guidelines. Statistical processing was carried out using ANOVA, correlation and regression analyses. Environmental stability of productivity was assessed according to S. A. Eberhart and W. A. Russell (1966).

Results and discussion. The study of the variability of traits showed the stability of the sowing-to-ripening period duration (average coefficient of variation: 10.9%) and 1000 seed weight (17.3%). The effect of the genotype was the determining factor only for 1000 seed weight (67.6% of the variance). The growing season duration, number of pods per plant, number of seeds per pod, and productivity depended more on the environments. Productivity formation patterns were basically the same at both sites: productivity of an accession depended on the number of pods, and 1000 seed weight was negatively related to the number of seeds per pod. The growing season in Maikop depended on the flowering-to-ripening period ($r = 0.73$); in Astrakhan, on the sprouting-to-flowering period ($r = 0.85$). The duration of the sowing-to-sprouting and sprouting-to-flowering periods significantly correlated with mean temperatures ($r = -0.87$ and 0.87 , respectively), while the flowering-to-ripening period did not depend on the mean temperature.

Conclusion. Accessions relatively stable in their productivity and duration of the growing season were identified. They demonstrated both determinant and indeterminate growth, attesting to the prospects of breeding work with different common bean groups.

Keywords: common bean, VIR collection, studying, climate conditions, breeding-oriented traits, ANOVA, correlation, regression

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, 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".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Novikova L.Yu., Berzegova A.A, Gurkina M.V., Buravtseva T.V. Productivity and growing-season stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under contrasting ecogeographic conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):105-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-105-115

Введение

В мировом земледелии фасоль обыкновенную возделывают на площади около 35 млн га (<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>) более чем в 100 странах в различных почвенно-климатических зонах. Оптимальная температура для фасоли обыкновенной составляет на этапе всходов 15–18°C, формирования вегетативных органов – 16–20°C, цветения – 18–22°C, плодоношения – 20–23°C (Stepanov, 1957; Belolyubtsev, Sennikov, 2012). Температурный минимум прорастания – 10–12°C, появления всходов – 12–13°C, цветения – 15–18°C. Наиболее благоприятным является климат со средней месячной температурой летом 18–23°C. Культура влаголюбива, особенно в фазу цветения (Kerefov, 1975).

Существенный фактор растениеводства XXI века – изменение климата. Главными тенденциями изменения климата являются рост температуры и дестабилизация водного режима, вызванная активизацией испарения с океанов (IPCC..., 2021). Изменение климата оказывает неблагоприятное воздействие на урожайность многих культур и представляет собой потенциальную угрозу производству сельскохозяйственной продукции (Jägermeier et al., 2021). Центральная проблема современного растениеводства – повышение устойчивости урожая сельскохозяйственных культур к неблагоприятным факторам внешней среды (Zhuchenko, 2009). Основной задачей селекции становится повышение адаптивности сортов в условиях комплексного изменения лимитирующих факторов (Rybas', 2016).

Сорта фасоли характеризуются различной пластичностью в контрастных эколого-географических условиях (Acosta-Quezada et al., 2022), в частности разной устойчивостью к высоким температурам (Suárez et al., 2020). В условиях потепления и дестабилизации климата особенно актуально выделение стабильных генотипов сельскохозяйственных культур. Одной из основных задач, которые стоят перед селекционерами фасоли, является создание оптимального генотипа растений, способного стабильно реализовывать свой потенциал и при этом оптимально реагировать на изменение условий выращивания (Marakaeva, Kazydub, 2016). Во Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), где сохраняется мировая коллекция фасоли, насчитывающая 7880 образцов этой культуры из 102 стран мира, ежегодно проводится изучение образцов коллекции в различных эколого-географических условиях. Это позволяет, рассматривая стабильность как устойчивость признака в различных условиях среды, находить по разным параметрам стабильные генотипы с целью их дальнейшего использования в селекционном процессе для повышения адаптивности создаваемых сортов.

Целью нашей работы стало выявление степени влияния окружающей среды на селекционно значимые признаки образцов фасоли обыкновенной при возделывании в контрастных климатических условиях Астрахани и Майкопа; определение стабильных образцов.

В задачи исследования входило:

- сравнение варибельности селекционно значимых признаков образцов;
- сравнение селекционно значимых признаков образцов в пунктах исследования;
- сравнение условий теплообеспеченности межфазных периодов в средах исследования;
- выявление образцов, стабильных по периоду вегетации и продуктивности.

Материалы и методы

Материалом для изучения послужили 30 образцов фасоли обыкновенной (*Phaseolus vulgaris* L.) различного эколого-географического происхождения (табл. 1). Эти образцы, пригодные для выращивания и дающие урожай на территории России, были отобраны нами из большей выборки для исследования в контрастных погодных условиях по итогам предварительного испытания образцов, поступивших в коллекцию генетических ресурсов растений ВИР в 2014 г.

Исследованный материал из 17 стран мира представлен селекционными и местными сортами. Образцы разнообразны по направлению использования, характеру роста растений и типу куста. При проведении изучения отмечалось влияние изменяющихся климатических условий на тип куста у переходных форм (полукустовые, с завязывающейся верхушкой) в пунктах исследования. Образцы высевали в условиях Майкопской (МОС) и Астраханской (АОС) опытных станций – филиалов ВИР в течение трех лет (2014, 2016, 2018 г.). Изучены следующие показатели: «посев – всходы», «всходы – цветение», «цветение – созревание», «посев – созревание» (сутки), продуктивность растения (г), число бобов на растение (шт.), масса 1000 семян (г), число семян в бобе (шт.).

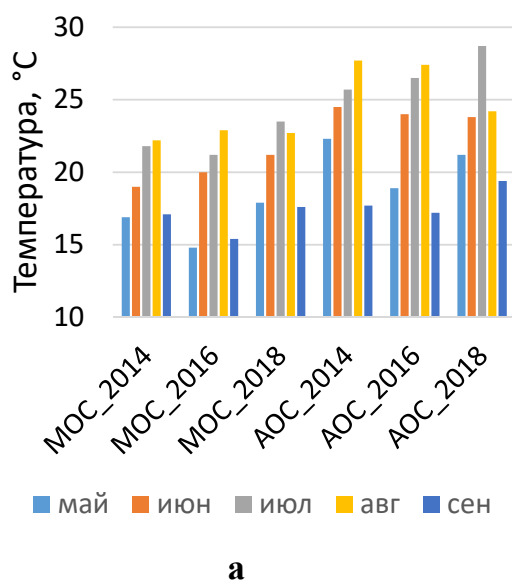
Для выявления влияния окружающей среды на селекционно значимые признаки фасоли обыкновенной при возделывании в контрастных погодных условиях посев и изучение хозяйственно ценных признаков осуществляли согласно методике ВИР (Budanova et al., 1987; Vishniyakova et al., 2018). Погодные данные МОС ВИР получены на Майкопском метеопункте ВИР, АОС ВИР – на сайте Росгидромета для метеостанции WMO ID 34880 Астрахань (46°17' N; 47°59' E). Статистический анализ проведен в пакете Statistica 13.3 методами дисперсионного (ANOVA), корреляционного, регрессионного анализов. Сравнение характеристик выборки на двух станциях сделано однофакторным дисперсионным анализом. Исследована корреляция продуктивности с другими показателями на каждой станции. Рассчитана корреляция продуктивности на одной станции с продуктивностью на другой; такое же сравнение сделано для других показателей. Классификация силы корреляций сделана по Б. А. Доспехову (меньше 0,3 по модулю – слабая; выше 0,7 – сильная; от 0,3 до 0,7 – средняя) (Dospikhov, 1973). Апостериорный анализ проведен критерием Тьюки. Стабильность периода вегетации и сумм температур оценивали по коэффициенту вариации (Dospikhov, 1973). Экологическую стабильность продуктивности определяли по методике S. A. Eberhart и W. A. Russell (Eberhart, Russell, 1966; Pakudin, 1976). Оценивались коэффициент регрессии генотипа на среду (b) и дисперсия отклонений от линии регрессии (s_a^2). Под средой понимали 6 сочетаний «географический пункт × год». В исследовании принят уровень значимости 5%. Приведенные в тексте статьи коэффициенты корреляции значимы, если не указано иное.

Влияние пункта исследования. Климат в пунктах исследования контрастен: МОС ВИР (44°27' N; 40°10' E) находится в зоне влажного умеренного климата, АОС ВИР (46°14' N, 48°01' E) – в зоне засушливого континентального климата. Климат последних 30 лет (1991–2020 гг.) характеризуется на МОС ВИР суммой активных температур выше 10°C – 3300°C, суммой осадков за период активной вегетации – 510 мм, ГТК = 1,5. На АОС ВИР – соответственно 3800°C, 140 мм, 0,4. Погодные

Таблица 1. Краткая характеристика изученных образцов фасоли обыкновенной
Table 1. Brief description of the studied common bean accessions

№ по каталогу ВИР	Название образца	Происхождение	Тип куста	Использование
Детерминантные				
15648	Fruhe Dickeleischige Wachs	Германия	кустовой	овощное
15649	Finaro	Германия	кустовой	овощное
15650	Prisma	Германия	кустовой	зерновое
15651	Fori	Германия	кустовой	овощное
15652	Charmo	Нидерланды	кустовой	овощное
15653	Ajax	Нидерланды	кустовой	туршевое
15657	Fidalgo	Португалия	кустовой	туршевое
15658	Без названия	Марокко	кустовой	зерновое
15663	3180/3 PBI	Англия	кустовой	зерновое
15666	Earliserve	Канада	кустовой	овощное
15670	Местная	Индия	кустовой	зерновое
15672	Пестро-коричневая	Россия	кустовой	зерновое
15673	Местная овощная	Россия	кустовой	овощное
15762	Без названия	Армения	кустовой	туршевое
Индетерминантные				
15645	VMI 48	Куба	полукустовой	зерновое
15646	VMI 1	Куба	с завивающейся верхушкой	зерновое
15654	Без названия	Греция	полувьющийся	зерновое
15655	Без названия	Бразилия	полувьющийся	зерновое
15656	Agoana	Бразилия	полукустовой	зерновое
15659	Без названия	Марокко	полувьющийся	зерновое
15660	Местная	Румыния	полувьющийся	туршевое
15661	Местная	Румыния	полувьющийся	овощное
15662	Без названия	Вьетнам	полувьющийся	зерновое
15665	Без названия	Сингапур	полувьющийся	зерновое
15667	Lamdong	Лаос	полукустовой	зерновое
15668	DEM 25	Лаос	с завивающейся верхушкой	зерновое
15669	DEM 25-9	Лаос	полукустовой	зерновое
15671	Без названия	Вьетнам	полувьющийся	зерновое
15761	Без названия	Китай	полукустовой	зерновое
15789	Без названия	Китай	полувьющийся	зерновое

условия лет эксперимента также были контрастны (рис. 1).



мян в бобе велико влияние случайной ошибки (42,0 и 41,9%), включающей межгодовую вариабельность.

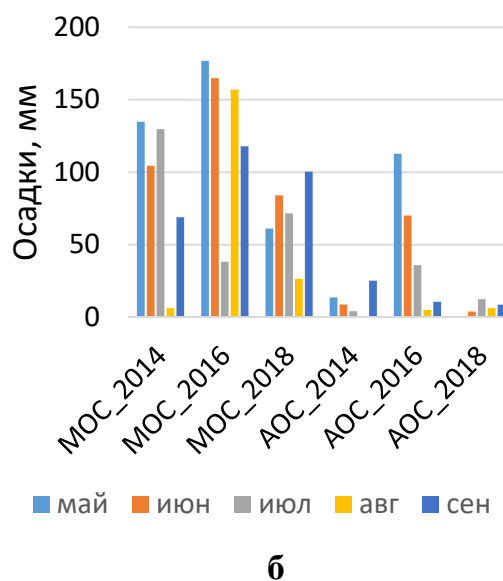


Рис. 1. Погодные условия в годы исследования (Майкопская и Астраханская опытные станции – филиалы ВИР; 2014, 2016, 2018 г.): а) средняя месячная температура воздуха; б) месячная сумма осадков
Fig. 1. Weather conditions during the years of the study (Maikop and Astrakhan Experiment Stations of VIR; 2014, 2016, and 2018): а) mean monthly air temperature; б) monthly precipitation

Средняя температура мая составляла на МОС ВИР 16,0°C, на АОС ВИР – 20,8°C; июня: 20,1 и 24,1°C; июля: 22,2 и 27,0°C; августа: 22,6 и 26,4°C; сентября: 16,7 и 18,1°C соответственно. Суммы осадков мая составляли на МОС ВИР 124 мм, на АОС ВИР – 42 мм; июня: 118 и 28 мм; июля: 80 и 18 мм; августа: 63 и 4 мм; сентября: 96 и 15 мм соответственно. Наиболее холодным и влажным на обеих станциях был 2016 г. К лимитирующим факторам, как известно, относятся температура и осадки. В нашем исследовании влияние осадков не учитывалось ввиду капельного полива посевов на АОС ВИР и достаточного увлажнения на МОС ВИР.

Результаты и обсуждение

Вариабельность признаков и влияние факторов. Сравнение коэффициентов вариации хозяйственно ценных признаков показало, что в среднем наиболее вариабельным в 6 средах исследования у образцов был признак «число бобов на растение» (средний по 30 образцам коэффициент вариации – 99,1%) и «продуктивность» (93,0%). Наиболее стабильны признаки продолжительности периода «посев – созревание» (10,9%) и массы 1000 семян (17,3%). Коэффициент вариации признака «число семян в бобе» составил 22,8%.

Для оценки влияния факторов (пункт, образец) использовали двухфакторный дисперсионный анализ, который показал, что оба фактора и их взаимодействие значимо влияли на период вегетации («посев – созревание»), продуктивность, число бобов на растение и число семян в бобе (табл. 2). Большой вес имела случайная ошибка, в которую включены межгодовые различия.

Влияние генотипа было определяющим фактором только для массы 1000 семян (67,6% дисперсии). На продуктивность и число бобов на растение влияние пункта было больше, чем образца и случайной ошибки (40,9 и 41,3%). На продолжительность вегетации и число се-

Сравнение селекционно значимых признаков в пунктах исследования. Продолжительность периода от посева до массового созревания составила (рис. 2) на МОС ВИР в среднем по выборке 99,7 суток (варьируя у образцов от 94,3 до 102,7 суток), а на АОС ВИР достоверно меньше – 94,4 суток (76,7–124,07 суток; уровень значимости различий $p = 0,023$). Увеличение продолжительности вегетации на МОС ВИР связано с продолжительным межфазным периодом «посев – всходы» по сравнению с АОС ВИР (25 против (vs.) 8 суток соответственно). На МОС ВИР наблюдался более короткий период «всходы – цветение» (32 vs. 41 суток), а продолжительность «цветение – созревание» на станциях достоверно не различалась (43 vs. 46 суток, $p = 0,052$).

В условиях МОС ВИР формировалось меньшее число бобов на растение (3,1 vs. 21,1 штук, $p = 0,000$), большее число семян в бобе (5,1 vs. 4,0 штук, $p = 0,000$), масса 1000 семян достоверно не различалась (243 vs. 229 г, $p = 0,374$), в итоге наблюдалась меньшая продуктивность, чем на АОС ВИР (4 vs. 18 г/растение, $p = 0,000$).

Таким образом, от условий среды зависели средние показатели продолжительности периода вегетации, числа бобов на растение, числа семян в бобе и продуктивности.

Для изучения закономерностей формирования продуктивности (стабильного урожая) были изучены корреляции хозяйственно значимых признаков как внутри каждого пункта исследований, так и между станциями. Анализ корреляций хозяйственно значимых признаков в пунктах исследования показал, что закономерности формирования продуктивности на МОС ВИР и АОС ВИР в основном одинаковы: продуктивность образца зависит от числа бобов ($r = 0,80; 0,91$), масса 1000 семян отрицательно связана с числом семян в бобе ($r = -0,38; -0,47$). Что касается периода вегетации («посев – созревание»), то на МОС ВИР он зависит от периода «цветение – созревание» ($r = 0,73$), а на АОС ВИР больше связан с периодом

Таблица 2. Оценка влияния факторов «пункт» и «образец» на хозяйственно ценные признаки фасоли обыкновенной дисперсионным анализом

(Майкопская и Астраханская опытные станции – филиалы ВИР; 2014, 2016, 2018 г.)

Table 2. The effect of the “site” and “accession” factors on valuable agronomic characters of common bean assessed by the analysis of variance

(Maikop and Astrakhan Experiment Stations of VIR; 2014, 2016, and 2018)

Фактор	Посев-созревание		Число бобов на растение		Масса 1000 семян		Число семян в бобе		Продуктивность	
	p	SS, %	p	SS, %	p	SS, %	p	SS, %	p	SS, %
Образец	0,001	23,6	0,000	17,3	0,000	67,6	0,026	17,1	0,002	16,0
Пункт	0,000	5,0	0,000	41,3	0,032	1,0	0,000	23,0	0,000	40,9
Образец × пункт	0,000	29,5	0,008	13,1	0,619	5,6	0,017	18,0	0,027	12,5
Ошибка		42,0		28,3		25,8		41,9		30,6

p – уровень значимости влияния фактора; SS, % – процент объясненной дисперсии

p – the significance level of the factor’s effect; SS, % – percentage of the explained variance

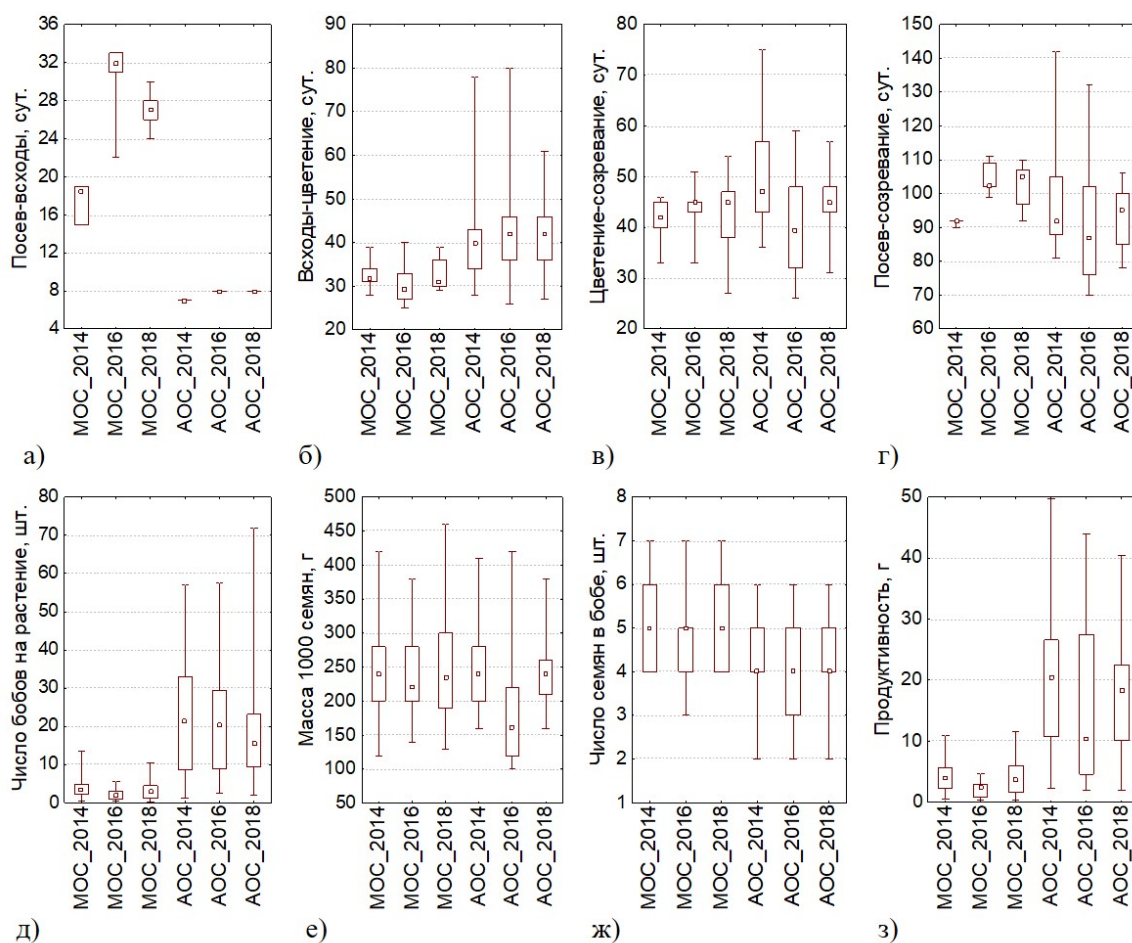


Рис. 2. Агробиологические характеристики образцов фасоли обыкновенной

(Майкопская и Астраханская опытные станции – филиалы ВИР; 2014, 2016, 2018 г.):

- а)** «посев – всходы»; **б)** «всходы – цветение»; **в)** «цветение – созревание»; **г)** «посев – созревание»;
- д)** число бобов на растение; **е)** масса 1000 семян; **ж)** число семян в бобе; **з)** масса семян с растения.

Представлены: медиана, кватили, минимум и максимум

Fig. 2. Agrobiological characteristics of common bean accessions

(Maikop and Astrakhan Experiment Stations of VIR; 2014, 2016, and 2018):

- a)** sowing-to-sprouting period; **б)** sprouting-to-flowering period; **в)** flowering-to-ripening period;
- г)** sowing-to-ripening period; **д)** number of pods per plant; **е)** 1000 seed weight; **ж)** number of seeds per pod;
- з)** seed weight per plant. The median, quartiles, minimum, and maximum are presented

«всходы – цветение» ($r = 0,85$). Соответствующие характеристики образца между станциями коррелировали достоверно по трем показателям: наибольшая корреляция наблюдается по массе 1000 семян ($r = 0,85$), то есть образцы с высокой массой 1000 семян на МОС ВИР имели высокий показатель и на АОС ВИР; корреляция средней силы характеризовала соответствие числа бобов на растении ($r = 0,53$) и продуктивности ($r = 0,40$) между станциями; корреляция продолжительности вегетационного периода между пунктами исследования незначима ($r = -0,31$). Таким образом, образцы, лучшие по продолжительности вегетации или продуктивности в одном пункте, перестают быть лучшими на другом, и селекция по этим важнейшим характеристикам для каждого пункта должна вестись отдельно.

Условия теплообеспеченности периода вегетации и межфазных периодов в средах исследования. Погодные условия АОС ВИР в годы исследования характеризовались избыточными для фасоли температурами, оптимум для которой в период активной вегетации составляет 18–23°C (Kerefov, 1975). В то же время на МОС ВИР в период «посев – всходы» температуры были ниже оптимума, составляющего для этого периода 15–18°C. На МОС ВИР всходы наблюдались через 17–31 сутки после посева, а на АОС ВИР – через 7–8 суток. Несмотря на различие почти на две недели в датах посева в пунктах исследования, в среднем массовое цветение на станциях пришлось на близкие даты, период «цветение – созревание» не различался по продолжительности при значительно боль-

шей сумме температур на АОС ВИР, что вызвано избыточно высокими температурами в этот период, которые не ускоряли развитие. В результате массовое созревание пришлось на МОС ВИР на 7 августа, на АОС ВИР – 13 августа. Сумма температур за период «посев – созревание» на МОС ВИР, равная в среднем 1930°C (1809–2003°C), была достоверно ниже (сравнение проведено однофакторным дисперсионным анализом, $p = 0,000$), чем на АОС ВИР – 2349°C (1881–3036°C) (табл. 3).

Для каждого образца был рассчитан коэффициент вариации продолжительности вегетации и суммы температур за вегетацию по 6 средам исследования. Средний по образцам коэффициент вариации сумм температур (14,8%) превышает коэффициент вариации продолжительности вегетации (10,9%). Если вегетация происходит в условиях лимитирования температурами, то чем выше температура, тем быстрее растение завершает вегетацию, и суммы температур за вегетацию более стабильны, чем ее продолжительность (Mishchenko, 2009). Полученный результат свидетельствует в пользу того, что продолжительность вегетации на АОС ВИР регулировалась не накоплением суммы необходимых температур, для ряда образцов температуры в АОС ВИР были избыточны.

Корреляционный анализ усредненных по выборке показателей в разных средах показал, что продолжительность периода «посев – всходы» имеет значительную зависимость от средней температуры периода ($r = -0,87$), в условиях МОС ВИР температурный фактор был лимитирующим (рис. 3, а). Продолжительность меж-

Таблица 3. Теплообеспеченность межфазных периодов образцов фасоли обыкновенной в пунктах исследования (Майкопская и Астраханская опытные станции – филиалы ВИР; 2014, 2016, 2018 г.)

Table 3. Heat supply during the interphase periods of common bean accessions at the sites of the study (Maikop and Astrakhan Experiment Stations of VIR; 2014, 2016, and 2018)

Межфазный период	Показатель	МОС			АОС		
		2014	2016	2018	2014	2016	2018
Посев – всходы	Дата посева	07.05	26.04	28.04	12.05	10.05	12.05
	Длительность, сут.	17,2	31,1	26,8	7,0	8,0	8,0
	Сумма температур, °C	297,9	431,5	442,3	178,3	149,3	172,9
	Средняя температура, °C	18,4	14,3	17,1	29,7	21,3	24,7
	Дата всходов	24.05	27.05	24.05	19.05	18.05	20.05
Всходы – цветение	Длительность, сут.	32,7	29,9	32,4	41,1	41,3	41,3
	Сумма температур, °C	614,1	554,4	639,5	1002,1	938,1	953,0
	Средняя температура, °C	19,4	19,2	20,3	25,0	23,1	23,5
	Дата цветения	25.06	26.06	26.06	29.06	28.06	30.06
Цветение – созревание	Длительность, сут.	41,9	43,8	43,1	50,9	40,7	45,1
	Сумма температур, °C	888,7	944,2	976,3	1311,8	1098,3	1242,7
	Средняя температура, °C	21,7	22,1	23,2	26,3	27,7	28,2
	Дата созревания	06.08	08.08	08.08	19.08	08.08	14.08
Посев – созревание	Длительность, сут.	91,9	104,8	102,3	99,1	90,0	94,4
	Сумма температур, °C	1800,6	1930,2	2058,2	2492,2	2185,8	2368,6
	Средняя температура, °C	19,6	18,4	20,1	25,2	24,2	25,1

фазного периода «всходы – цветение» коррелировала со средней температурой за период положительно достоверно ($r = 0,87$), что свидетельствует об избыточности температур в условиях АОС ВИР (см. рис. 3, б). Продолжительность межфазного периода «цветение – созревание» от средней температуры не зависит.

квадрат коэффициента корреляции, $0,87^2$ (Dospekhov, 1973).

Оценка стабильности периода вегетации и продуктивности. Изучение, проведенное в контрастных эколого-географических условиях, позволило выделить

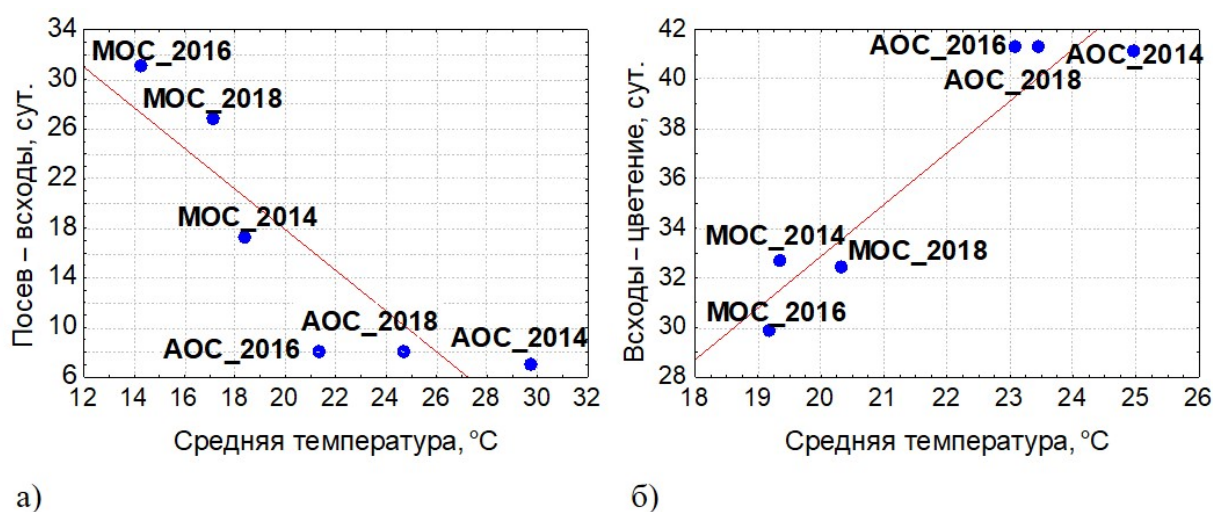


Рис. 3. Зависимость продолжительности периодов «посев – всходы» (а) и «всходы – цветение» (б) от средней температуры периода (Майкопская и Астраханская опытные станции – филиалы ВИР; 2014, 2016, 2018 г.)
Fig. 3 Dependence of the duration of the sowing-to-sprouting (a) and sprouting-to-flowering (б) periods on the mean temperature during the interphase periods (Maikop and Astrakhan Experiment Stations of VIR; 2014, 2016, and 2018)

Таким образом, температуры 14–18°C, наблюдавшие в условиях МОС ВИР в период «посев – всходы», лимитируют темп развития растений фасоли, а при 22–30°C на АОС ВИР скорость развития достигает максимального возможного значения. В период «всходы – цветение» температуры 23–25°C (на АОС ВИР) были избыточными и задерживали цветение.

Зависимость периода «посев – всходы» (L) от средней температуры за период (T) может быть описана уравнением

$$L = 50,7 - 1,6 \cdot T \quad R^2 = 0,76$$

Здесь R^2 – коэффициент детерминации уравнения, показывающий процент объясненной уравнением дисперсии. В данном случае парной линейной регрессии это

стабильные образцы по признакам продолжительности периода вегетации («посев – созревание») и продуктивности.

Стабильность периода вегетации образцов определяли по коэффициенту вариации, учитывая, что вариабельность признака считается незначительной, если коэффициент вариации меньше 10% (Dospekhov, 1973). Выделено семь наиболее стабильных образцов (первый квартиль), которые показали относительную независимость периода вегетации от условий и имели коэффициент вариации этого признака < 8% (табл. 4).

Оценку стабильности продуктивности образцов проводили по методу S. A. Eberhart и W. A. Russell (1966), который основан на расчете двух параметров: коэффици-

Таблица 4. Образцы фасоли обыкновенной, выделившиеся по стабильности периода вегетации (Майкопская и Астраханская опытные станции – филиалы ВИР; 2014, 2016, 2018 г.)

Table 4. Common bean accessions with the best growing-season stability (Maikop and Astrakhan Experiment Stations of VIR; 2014, 2016, and 2018)

Номер по каталогу ВИР	Название образца	Происхождение	Посев – созревание, сутки			
			Среднее	Min	Max	Cv, %
15653	Аjax	Нидерланды	101,3	92	107	5,1
15654	Без названия	Греция	103,0	92	107	5,5
15655	Без названия	Бразилия	100,0	92	107	6,8
15656	Aroana	Бразилия	95,8	87	107	7,7
15667	Lamdong	Лаос	97,2	88	105	6,5
15668	DEM 25	Лаос	95,8	87	105	6,9
15671	Без названия	Вьетнам	99,3	92	109	6,7

ента линейной регрессии (b_i) и дисперсии отклонения от линии регрессии (s_d^2). Коэффициент линейной регрессии продуктивности сортов b_i показывает их реакцию на изменение условий выращивания (пластичность), а показатель s_d^2 характеризует стабильность признака в различных условиях; стабильный сорт, по мнению авторов метода, – это сорт с $b_i = 1$ и $s_d^2 = 0$.

В таблице 5 представлены результаты оценки продуктивности по изложенному выше методу. Образцы отсортированы по коэффициенту b_i . В нашем исследовании однозначно стабильных образцов не выявлено. Относительную стабильность (значение коэффициента регрес-

сии b_i , близкое к 1, и при этом как можно меньшее значение параметра стабильности s_d^2) по признаку продуктивности показали пять образцов третьего квартиля (к-15646, к-15652, к-15657, к-15666, к-15761), характеризующиеся средними показателями продуктивности (9–13,2 г/растение), близкими к 1 значениями b_i (0,98–1,17) и значениями параметра стабильности $s_d^2 = 10,2–20,3$.

Образцы, выделившиеся по стабильности продолжительности вегетации и продуктивности, имеют как детерминантный, так и индетерминантный характер роста, что свидетельствует о перспективности селекционной работы с разными группами фасоли.

Таблица 5. Продуктивность (г/растение) фасоли обыкновенной в эколого-географическом испытании и показатели ее стабильности (по: Eberhart, Russell, 1966)

Table 5. Productivity (g/plant) of common bean in the ecogeographic trials and its stability parameters (from Eberhart, Russell, 1966)

№ по каталогу ВИР	Происхождение	МОС ВИР			АОС ВИР			Средняя продуктивность	b_i	s_d^2
		2014	2016	2018	2014	2016	2018			
15648	Германия	1,5	2,5	7,2	5,0	2,2	3,6	3,7	0,02	5,6
15661	Румыния	5	0,3	1,8	2,3	5,5	2,5	2,9	0,06	4,7
15672	Россия, Омская обл.	1,9	2,5	6,4	7,6	2,0	4,8	4,2	0,13	6,0
15660	Румыния	8,1	1,67	0,3	4,2	2,0	10,3	4,4	0,17	17,4
15649	Германия	1,1	2,9	6,0	14	6,2	10,1	6,7	0,52	6,3
15650	Германия	0,5	2,1	2,7	13,9	2,5	8,2	5,0	0,52	10,5
15658	Марокко	6,6	0,5	2,1	4,3	10,5	21,1	7,5	0,54	47,2
15762	Армения	1,7	4,6	1,6	9,6	3,0	23,5	7,3	0,65	55,0
15668	Лаос	3,3	2,6	7,3	16,9	4,6	19,0	8,9	0,71	23,8
15669	Лаос	3,9	2,0	0,8	7,0	14,2	22,5	8,4	0,75	43,1
15663	Великобритания	5,6	3,6	10,9	14,0	30,6	20,7	14,2	0,88	65,0
15662	Вьетнам	5,8	2,8	3,9	14,4	12,2	24,9	10,7	0,88	25,3
15670	Индия	3,1	3,6	10,7	21,3	3,0	27,8	11,6	0,92	73,6
15653	Нидерланды	4,0	3,0	0,4	10,7	28,8	16,7	10,6	0,93	74,3
15761	Китай	3,4	0,9	6,6	21,4	8,0	20,3	10,1	0,98	16,8
15651	Германия	1,5	2	3,6	29,0	5,6	10,0	8,6	1,04	50,1
15666	Канада	3,3	3,4	5,2	26,1	10,6	18,3	11,1	1,09	12,7
15646	Куба	3,3	0,8	1,2	21,4	8,0	22,1	9,5	1,13	17,6
15789	Китай	10,9	0,8	1,1	24,5	34,5	7,2	13,2	1,14	126,0
15657	Португалия	2,0	0,9	1,4	17,2	18,5	21,0	10,2	1,15	10,2
15652	Нидерланды	2,3	0,5	1,5	26,6	8,0	15,0	9,0	1,17	20,3
15654	Греция	3,9	3,7	4,1	24,1	37,2	10,4	13,9	1,24	117,0
15673	Россия, Ставропольский край	5,7	2,1	4,5	19,7	29,0	24,3	14,2	1,28	34,9
15667	Лаос	4,4	0,8	3,8	31,0	21,9	12,9	12,5	1,36	28,5

Таблица 5. Окончание
Table 5. The end

№ по каталогу ВИР	Происхождение	МОС ВИР			АОС ВИР			Средняя продуктивность	b_i	s_d^2
		2014	2016	2018	2014	2016	2018			
15671	Вьетнам	5,6	2,7	5,1	43,4	2,2	18,3	12,9	1,48	146,0
15659	Марокко	7,3	2,1	3,8	45,0	27,5	2,0	14,6	1,55	201,0
15656	Бразилия	5,9	2,5	3,4	24,1	37,7	34,5	18,0	1,76	74,9
15655	Бразилия	7,5	4,3	2,8	34,9	44,0	18,5	18,7	1,78	118,0
15665	Сингапур	4,1	4,7	11,7	37,0	26,0	34,5	19,7	1,81	10,1
15645	Куба	3,6	2,2	2,0	49,7	10,5	40,4	18,1	2,38	113,0
Среднее		4,2	2,3	4,1	20,7	15,2	17,5	10,7	1	51,8

Заклучение

Из коллекции фасоли выделены относительно стабильные образцы по признакам продолжительности периода вегетации (коэффициент вариации < 8%) – семь образцов (к-15653, к-15654, к-15655, к-15656, к-15667, к-15668, 15671) и продуктивности (средняя продуктивность – 9–13,2 г/растение, коэффициент регрессии на среднюю $b_i = 0,98–1,17$; показатель стабильности $s_d^2 = 10,2–20,3$) – пять образцов (к-15646, к-15652, к-15657, к-15666, к-15761). Выделенные образцы имеют как детерминантный, так и индетерминантный характер роста и перспективны для включения их в селекционный процесс.

References / Литература

- Acosta-Quezada P.G., Valladolid-Salinas E.H., Murquincho-Chuncho J.M., Jadán-Veriñas E., Ruiz-González M.X. Heterogeneous effects of climatic conditions on Andean bean landraces and cowpeas highlight alternatives for crop management and conservation. *Scientific Reports*. 2022;12(1):6586. DOI: 10.1038/s41598-022-10277-x
- Belolyubtsev A.I., Sennikov A.I. Bioclimatic potential of ecosystems: a manual (Bioklimaticheskiy potentsial ekosistem: uchebnoye posobiye). Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 2012. [in Russian] (Белолубцев А.И., Сенников В.А. Биоклиматический потенциал экосистем: учебное пособие. Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 2012).
- Budanova V.I., Lagutina L.V., Buravtseva T.V. Guidelines. The study of common bean accessions from the global collection (Metodicheskiye ukazaniya. Izucheniye obraztsov mirovoy kollektzii fasoli). Leningrad: VIR; 1987. [in Russian] (Буданова В.И., Лагутина Л.В., Буравцева Т.В. Методические указания. Изучение образцов мировой коллекции фасоли. Ленинград: ВИР; 1987).
- Dospikhov V.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). Moscow: Kolos; 1979. [in Russian] (Доспехов В.А. Методика полевого опыта. Москва: Колос; 1979).
- Eberhart S.A., Russell W.A. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 1966;6(1):36-40. DOI: 10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations: [website]. Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> [accessed Dec. 02, 2022].
- IPCC: Summary for Policymakers. In: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; New York, NY: Cambridge University Press; 2021. p.3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001
- Jägermeyr J., Müller C., Ruane A.C., Elliott J., Balkovic J., Castillo O. et al. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*. 2021;2(11):873-885. DOI: 10.1038/s43016-021-00400-y
- Kerefov K.N. Biological fundamentals of crop production (Biologicheskiye osnovy rasteniyevodstva). Moscow: Vyschaya Shkola; 1975. [in Russian] (Керефов К.Н. Биологические основы растениеводства. Москва: Высшая школа; 1975).
- Marakaeva T.V., Kazydub N.G. Assessment of ecological plasticity and stability of samples of haricot of Western Siberia vegetable in the conditions of the southern forest-steppe. *International Research Journal*. 2016;6(48):52-58. [in Russian] (Маракаева Т.В., Казыдуб Н.Г. Оценка экологической пластичности и стабильности образцов фасоли овощной в условиях южной лесостепи Западной Сибири. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016;6(48):52-58). DOI: 10.18454/IRJ.2016.48.047
- Mishchenko Z.A. Agricultural climatology. (Agroklimatologiya). Kiev: KNT; 2009. [in Russian]. (Мищенко З.А. Агроклиматология. Киев: КНТ, 2009).
- Pakudin V.Z. Parameters of environmental plasticity assessment in cultivars and hybrids (Parametry otsenki ekologicheskoy plastichnosti sortov i gibridov). In: L.V. Khotyleva (ed.). *Theory of Selection in Plant Populations (Teoriya otbora v populyatsiyakh rasteniy)*. Novosibirsk: Nauka; 1976. p.178-189. [in Russian] (Пакудин В.З. Параметры оценки экологической пластичности сортов и гибридов. В кн.: *Теория отбора в популяциях растений* / под ред. Л.В. Хотылевой. Новосибирск: Наука; 1976. С. 178-189).
- 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). *Сельскохозяй-*

- ственная биология. 2016;51(5):617-626). DOI: 10.15389/agrobiology.2016.5.617rus
- Stepanov V.N. Biological classification of agricultural plants in field cultivation (Biologicheskaya klassifikatsiya selskohozyaystvennykh rasteniy polevoy kultury). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1957;(2):5-29. [in Russian] (Степанов В.Н. Биологическая классификация сельскохозяйственных растений полевой культуры. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1957;2:5-29).
- Suárez L.R., Polanía J.A., Contreras A.T., Rodríguez L., Machado L., Ordoñez C. et al. Adaptation of common bean lines to high temperature conditions: genotypic differences in phenological and agronomic performance. *Euphytica*. 2020;216(2):28. DOI: 10.1007/s10681-020-2565-4
- Vishniyakova M.A., Seferova I.V., Buravtseva T.V., Burliyeva 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., Янков 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). DOI: 10.30901/978-5-905954-79-5
- Zhuchenko A.A. Adaptive crop production (ecogenetic fundamentals): theory and practice. Vol. 3 (Adaptivnoye rastenyevodstvo [ekologo-geneticheskiye osnovy]: teoriya i praktika. T. 3). Moscow: Agrorus; 2009. [in Russian] (Жученко А.А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы): теория и практика. Том 3. Москва: Агрорус; 2009).

Информация об авторах

Любовь Юрьевна Новикова, доктор сельскохозяйственных 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, l.novikova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4051-3671>

Анета Абрековна Берзегова, доктор биологических наук, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Майкопская опытная станция – филиал ВИР, 385746 Россия, Республика Адыгея, Майкоп, ул. Научная, 1, berzegova_aneta@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5250-9867>

Мария Владиславовна Гуркина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Астраханская опытная станция – филиал ВИР, 416462 Россия, Астраханская обл., Приволжский р-н, с. Яксатово, m.gurkina-08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6169-6089>

Тамара Васильевна Буравцева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, t.buravtseva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2304-2380>

Information about the authors

Liubov Yu. Novikova, Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.novikova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4051-3671>

Aneta A. Berzegova, Dr. Sci. (Biology), Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Maikop Experiment Station of VIR, 1 Nauchnaya St., Maikop 385746, Russia, berzegova_aneta@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5250-9867>

Maria V. Gurkina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Astrakhan Experiment Station of VIR, Astrakhan 416462, Russia, m.gurkina-08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6169-6089>

Tamara V. Buravtseva, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, t.buravtseva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2304-2380>

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 21.02.2023; одобрена после рецензирования 30.06.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 21.02.2023; approved after reviewing on 30.06.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
UDC 635.652:75.113
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-116-124



Genetic control of yield components in green beans (*Phaseolus vulgaris* L.)

Mayra Contreras-Rojas¹, Dilmer Gabriel Guerra Guzmán², Seir Antonio Salazar Mercado¹

¹ Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia

² Universidad Nacional de Agricultura, Catacamas, Honduras.

Corresponding author: Mayra Contreras-Rojas, mayracontreras@ufps.edu.co

Background. This work aimed at using Hayman's methodology to study the inheritance of some quantitative traits, such as the number of pods per plant, pod length, mean pod weight, and yield per plant in 15 diallel hybrids of six green bean cultivars.

Materials and methods. The research was carried out at the Experimental Center of Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira (CEUNP). A randomized complete block experimental design with four replications was used.

Results. For most of the traits, except yield per plant, the additive-dominant model was adequate. Non-additive effects with overdominance controlled the number of pods per plant, pod length, and mean pod weight. Most of the characters presented an unequal proportion of positive and negative genes in the loci ($H_1 < H_2$). The asymmetric distribution of genes in the parents ($H_2/4H_1$) was below the maximum value (0.25), except for the character "number of pods per plant". The K_D/K_R ratio confirmed for most of the traits that there was an excess of recessive alleles over dominant alleles. Dominance effects (h^2) for most characters suggested that the substantial contribution of dominance was not due to heterogeneity of loci in these characters. The narrow-sense heritability was moderate to low. The correlation coefficient r ($Y_r; W_r + V_r$) indicated that dominant genes were responsible for the increased number of pods per plant and recessive genes for increased pod length and mean pod weight.

Conclusions. Conventional breeding methods like pedigree selection could be employed to improve the characters "pod length" and "mean pod weight", and for the number of pods per plant, management of segregating populations should employ the single-seeded descent method.

Keywords: diallel analysis, additive effects, dominant effects, epistasis, genetic parameters

Acknowledgements: this study was funded by the Research and Extension Division of the Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira.

The authors express their special thanks to Dr. Fredy A. Salazar Villareal for his methodological support, analysis, and data interpretation in the research process, and Dr. Myriam del Carmen Salazar Villareal for her collaboration in the field activities. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Contreras-Rojas M., Guzmán D.G.G., Salazar Mercado S.A. Genetic control of yield components in green beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):116-124. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-116-124

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-116-124

Генетический контроль компонентов урожайности овощной фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.)

М. Контрерас-Рохас¹, Д. Г. Г. Гусман², С. А. Саласар Меркадо¹

¹ Университет Франсиско де Паула Сантандер, Сан-Хосе де Кукута, Колумбия

² Национальный сельскохозяйственный университет, Катакамас, Гондурас

Автор, ответственный за переписку: Майра Контрерас-Рохас, mayracontreras@ufps.edu.co

Актуальность. Цель данной работы – изучение с помощью методологии Хаймана наследования некоторых количественных признаков, таких как количество бобов на растение, длина боба, средний вес боба и урожай бобов с растения у 15 диаллельных гибридов шести сортов овощной фасоли.

Материалы и методы. Исследования проводились в Экспериментальном центре Национального университета Колумбии – Пальмира (CEUNP). Использовалась рандомизированная полноблочная экспериментальная схема с четырьмя повторностями.

Результаты. Для большинства признаков, за исключением урожайности с одного растения, адекватной была аддитивно-доминантная модель. В контроле количества бобов на растение, длины боба и средней массы боба преобладали аддитивные эффекты (наследование по типу сверхдоминирования). Для большинства признаков наблюдалось неодинаковое соотношение генов с положительными и отрицательными эффектами в локусах ($H_1 < H_2$). Неравномерное распределение генов у родителей ($H_2/4H_1$) было ниже максимального значения (0,25), за исключением признака «количество бобов на растение». Отношение K_D/K_R указывало на преобладание рецессивных аллелей над доминантными для большинства признаков. Эффекты доминирования (h^2) для большинства признаков свидетельствуют о том, что существенный вклад доминирования не был обусловлен гетерогенностью локусов по этим признакам. Наследуемость в узком смысле была умеренной или низкой. Значения коэффициента корреляции r ($Yr; Wr + Vr$) свидетельствовали о том, что доминантные гены отвечают за увеличение количества числа бобов на растение, а рецессивные гены – за увеличение длины боба и его средней массы.

Выводы. Традиционные методы селекции, такие как метод педигри, могут быть использованы для улучшения признаков длины бобов и среднего веса бобов, а для числа бобов на растение в работе с расщепляющимися популяциями необходимо использовать метод отбора единичных семян.

Ключевые слова: диаллельный анализ, аддитивные эффекты, доминантные эффекты, эпистаз, генетические параметры

Благодарности: данное исследование было профинансировано Отделом исследований и распространения знаний Национального университета Колумбии – кампус Пальмира.

Авторы выражают особую благодарность д-ру Фреду А. Саласару Вильярреалу за методологическую поддержку, анализ и интерпретацию данных в процессе исследования, а также д-ру Мириам дель Кармен Саласар Вильярреал за сотрудничество в полевых исследованиях.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Контрерас-Рохас М., Гусман Д.Г.Г., Саласар Меркадо С.А. Генетический контроль компонентов урожайности овощной фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.). Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023;184(3):116-124. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-116-124

Introduction

Green beans are unripe fruits of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) which are consumed fresh or processed. They are a good source of nutrients and bioactive compounds, as well as proteins, carbohydrates, fiber, and vitamins (Fabbri, Crosby, 2016). It is the sixth most important vegetable in Colombia, in terms of area (5,584 hectares) and production, (45,124 tons) (Agronet, 2020). A way to increase productivity of this crop is utilization of genetic improvement programs aimed at obtaining high-yielding cultivars (varieties). While there have been huge investments, the success rate has been slow and very low, and therefore the challenge of green bean productivity persists.

Genetic studies to establish the mode of inheritance, gene action and gene effects of major quantitative traits in green bean are scarce in the literature. Knowledge of the nature and magnitude of the genetic effects is essential for the selection process and to know the behavior of segregating generations (Cruz et al., 2004). During the execution of the improvement program, the methods to be followed or the size of the population to be carried out should be taken into account. Therefore, it is necessary to invest in programs that can favor the generation of superior genotypes, increasing the economic benefits for farmers.

Green bean pod yield is a highly complex trait, controlled by hundreds or thousands of genes with very small effects, which makes it difficult to study. However, yield components exhibit simpler heritability and, therefore, the selection progress achieved by selecting these components may be greater than selecting directly for yield. Knowledge of the nature and magnitude of the genetic effects controlling yield components is helpful in planning and executing a breeding program (Venkovsky, Barriga, 1992).

The crossing systems or mating designs allow to know and evaluate the genetic effects of quantitative traits, as well as to identify and select superior genotypes and design the most efficient breeding methods. Regarding diallel analysis methods, C. A. Cruz et al. (2012) mention the method proposed by B. Griffing (1956), C. O. Gardner and S. A. Eberhart (1966), and the method proposed by B. I. Hayman (1954a, 1954b). Hayman's method is based on the knowledge of the environmental and genetical parameters, such as means, variance, and covariance, obtained from the diallel analysis (Cruz et al., 2012). This methodology provides an efficient study of the gene action involved in the control of traits and identifies the presence of epistatic interactions, also estimates the genetic component of genotype determination and selection limit that can be obtained in segregating generations from the evaluated parents. The present study was conducted to investigate the gene effects that control genetic control of yield components in green beans, using the diallel analysis methodology.

Materials and methods

Six green bean genotypes: two commercial cultivars 'Blue Lake' from Ferry Morse Company (G17723) and 'UNAPAL-Milenio' from Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira (G51158), and four lines from the world bean collection of the Genetic Resources Unit, International Center for Tropical Agriculture (URG-CIAT), previously selected by the Vegetable Program of Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira (G23956, G20400, G18212, and G16806), were subjected to a complete diallel cross design in all possible combinations without reciprocal crosses. The evaluation of

the 21 genotypes (six parents and 15 hybrids) was carried out in the second semester of 2019 and first semester of 2020, at the Experimental Center of the Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira (CEUNP), located in the municipality of Candelaria (26°C; 1,000 m.a.s.l.; annual rainfall 1,028 mm; relative humidity 75%) (Ortiz et al., 2020).

A randomized complete block experimental design with four replications was applied. The experimental unit consisted of eight plants, in furrows 8 m long with a 1.50 m distance between furrows and 1 m distance between plants. Four central plants were evaluated. The following characteristics were analyzed: a) number of pods per plant (NPP), all pods with at least one viable seed on each plant sampled were counted (was recorded from the four selected plants from each plot); b) pod production per plant (PPP), the weight of all pods per plant, expressed in kilograms (based on the pods collected in the experimental unit); c) mean pod weight (MPW), the ratio of pod production per plant over the number of pods per plant, expressed in grams; and d) pod length (PL), the pod measured from its insertion in the pedicel to the free apex end, the average length of ten pods per experimental unit taken and expressed in centimeters.

The validity of the genetic information of the recorded data was based on the genetic assumptions formulated by B. I. Hayman (1960). To verify whether the data fit the additive-dominant model (absence of epistasis), the sufficiency test was based on linear regression analysis of W_r on V_r , testing the significance of the regression coefficient ($H_0: b = 1$ vs. $H_a: b \neq 1$), the regression should result in a regression coefficient not significantly different than one ($b = 1$). If $b \neq 1$, significant epistatic effects were assumed; in this case a second test was applied after weighing the values of W_r and V_r , the test (t_2) with rotation of the W_r axis on the V_r axis at 45° , followed by a new regression coefficient ($H_0: b = 0$ vs. $H_a: b \neq 0$), b was expected to be no different from 0 (zero); the nonsignificant value of the t_2 test also confirmed the absence of non-allelic interaction and, therefore, the genes would be independent in their action for the random association. The failure of these tests completely invalidates the additive-dominant model (Mather, Jinks, 1982). The different genetic components and parameters of variation were calculated, based on standard procedures (Hayman, 1954a, b; Singh, Chaudhary, 1999), only for those characteristics that fit the additive-dominant model: we estimated D (genetic component related to additive effects); H_1 and H_2 (dominance deviations); h^2 (dominant gene action); F (frequency of dominant and recessive alleles between parents); E (environmental variance component); and the following genetic parameters: $(H_1/D)^{1/2}$ (mean degree of dominance); $H_2/4H_1$ (symmetry of allele distribution between parents); K_D/K_R (dominant/recessive ratios); h^2/H_2 (number of genes with dominance); h^2e (narrow-sense heritability); and r (correlation coefficient). Significance levels of all genetic components were determined by t -test. All statistical procedures were performed with the help of the Genes program (Cruz, 2020).

Results and discussion

Sufficiency test of the additive-dominant model

Table 1 presents the results of the application of the two tests to determine the adequacy of the data to the additive-dominant model for the evaluated characteristics. For the NPP, PL, and MPW, the test results were from partially to non-significant, thus validating the use of the additive-dominant model in the genetic study of these traits. The PPP trait

Table 1. Sufficiency test of the additive-dominant model based on linear regression analysis of W_r on V_r for mean pod weight, pod production per plant, number of pods per plant, and pod length, among six bean parents and their F_1 s, according to the methodology proposed by B. I. Hayman (1954a, b)

Таблица 1. Проверка достаточности аддитивно-доминантной модели на основе линейного регрессионного анализа (W_r/V_r) для среднего веса боба, урожая бобов с растения, количества бобов на растение и длины боба среди шести родительских форм фасоли и их гибридов F_1 согласно методологии, предложенной Б. Хейманом (Hayman, 1954a, b)

Character ¹	Regression ²	Rotation axes ³ \hat{W}_r y \hat{V}_r ³
	t ($H_0: b=1$)	F = t ² ($H_0: B=b-1=0$)
PPP	-6.51*	3.66*
NPP	-2.73*	1.69 ns
LDV	-2.40*	1.57 ns
MPW	-2.48*	1.44 ns

Note: ¹ MPW – mean pod weight; PPP – pod production per plant; NPP – number of pods per plant; PL = pod length

² t-test, average values of W_r and V_r , with a 5% probability level

³ F-test, average values of W_r and V_r by rotation of the axes at 45°, probability level at 5%; ns – not significant

Примечание: ¹ MPW – средний вес боба; PPP – урожай бобов с растения; NPP – количество бобов на растение; PL – длина боба

² t-тест, средние значения W_r и V_r при 5% уровне вероятности

³ F-тест, средние значения W_r и V_r при повороте осей на 45°, уровень вероятности 5%; ns = не значимо

showed statistical significance at 5%, indicating the presence of epistasis; in this case, the analysis cannot be performed using Hayman’s methodology.

\hat{W}_r/\hat{V}_r Analysis

Number of pods per plant (NPP)

The results concerning the trait “number of pods per plant” (NPP) are shown in Table 2. They demonstrate that the components associated with additive effects (D) and dominance effects (H_1 , H_2 , and h^2) are controlling the trait inheritance. However, the values of dominance effects were of higher magnitude ($H_1 = 3582.89^{**}$; $H_2 = 3008.47^{**}$ and $h^2 = 8752.56^{**}$) compared to additive effects ($D = 336.65^{**}$), indicating that the character “number of pods per plant” (NPP) is more influenced by dominant effects. Similar results were obtained in the studies conducted by M. P. Da Silva et al. (2004), J. H. Chung, E. Stevenson (1973), W. Krause et al. (2012), and E. Y. Owusu et al. (2020) in green beans, kidney beans, and cowpea. However, E. E. Arunga et al. (2010), M. A. A. Barelli et al. (1999), R. Rodrigues et al. (1998), E. V. Rodrigues et al. (2018), E. V. Rodrigues et al. (2016), F. D. Rocha et al. (2014), and N. J. Nayak et al. (2018) reported contradictory results in which additive effects predominated for this trait.

No significant environmental effects (E) were found for this trait (Table 2), indicating that the differences were mainly based on genotypic variations. This result corroborates the findings reported by Iqbal et al. (2011).

The difference between $D-H_1$ estimates also provides information about genetic effects on inheritance of the character. When the estimate is negative, dominance genetic effects predominate; however, positive estimates reveal the presence of additive genetic effects. As shown in Table 2, the $D-H_1$ estimate (-3246.24^{**}) presented a negative and significant value, which indicates the predominance of dominant genetic effects in this trait and is confirmed by the narrow heritability value ($h^2e = 0.23$), suggesting that the simplest breeding method, based on the selection in later segregating generations, when the trait of interest is already fixed, such as the

single seed descent (SSD) method, can be recommended to obtain satisfactory gains in terms of the NPP in future generations. This result corroborates the findings reported by M. P. Da Silva et al. (2004) and M. A. A. Barelli et al. (1999) who observed a genetic advance with intermediate heritability estimates for the trait NPP.

The proportion of genes with positive dominance effects (H_1) is shown from the H_1 versus H_2 value. If $H_1 > H_2$, genes will be more positive (increase), on the other hand, if $H_1 < H_2$, genes will be more negative (decrease). The H_1 value (3582.89^{**}) was higher than the H_2 value (3008.47^{**}), indicating that genes that increase the trait NPP (dominant genes) were more frequent among the parents than the recessive genes. The distribution of genes among parents expressed by the $H_2/4H_1$ ratio was symmetrical (0.21) for the trait (see Table 2), indicating a symmetrical distribution of favorable or unfavorable genes among the parents. Similar results were reported by A. M. Iqbal et al. (2011) and M. P. Da Silva et al. (2004). The overall dominance effects of heterozygous loci (h^2) were found to be significant (8752.56^{**}), indicating that dominance was due to heterozygosity where most of the dominant genes had positive effects.

The proportion of dominant genes in the parents is reflected in the K_D/K_R value. If $K_D/K_R > 1$, there are more dominant genes in the parents. Conversely, if $K_D/K_R < 1$, then there are more recessive genes in the parents (Singh, Chaudhary, 1999). In this study, the ratio $K_D/K_R = 1.53$ showed a higher predominance of dominant genes for the trait NPP (see Table 2) and was confirmed by the positive F value (460.29).

The estimation of the number of genes or gene blocks with dominant effects ($h^2/H_2 = 2.91$) indicated the existence of at least three genes or three gene blocks acting on the genetic control of the trait. However, this estimator underestimates the number of genes with little or no dominance (Cruz et al., 2012).

The estimation of the mean degree of dominance (H_1/D)^{1/2} = 3.26 indicates the existence of overdominance among the genes involved in the genetic control of the trait (see Table 2). Similar results were obtained by M. P. Da Silva et al. (2004) and M. A. A. Barelli et al. (1999). This result can

Table 2. Genetic parameters and variance components for the traits “number of pods per plant” (NPP), “pod length” in cm (PL), and “mean pod weight” (MPW) in green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) using Hayman’s method
Таблица 2. Генетические параметры и компоненты дисперсии для признаков «количество бобов на растение» (NPP), «длина боба» в см (PL) и «средний вес боба» (MPW) у овощной фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.), рассчитанные по методу Хеймана

Genetic parameters ¹	NPP	PL	MPW
D	336.65 **	1.04 **	0.12
H ₁	3582.89 **	1.22 *	0.21
H ₂	3008.47**	0.75	0.05
h ²	8752.56**	-0.04	-0.05
F	460.29	-0.59	-0.30
E	0.13	0.06	0.13 **
D-H ₁	-3246.24 **	-0.19	-0.09
(H ₁ /D) ^{1/2}	3.26	1.09	1.31
H ₂ /4H ₁	0.21	0.15	0.06
K _D /K _R	1.53	0.59	0.05
h ² /H ₂	2.91	-0.05	-1.04
h ² e	0.23	0.81	0.68
r	-0.66	0.55	0.43

Note: ¹D – additive gene action; H₁ – variance component due to dominance effects of alleles with positive effects; H₂ – variance component due to dominance effects of alleles with negative effects; F – relative frequency of dominant and recessive alleles; h² – dominant gene action; E – experimental error; D-H₁ – difference between additive and dominant gene effects; (H₁/D)^{1/2} – mean degree of dominance; H₂/4H₁ – allele distance (symmetry); K_D/K_R – dominant/recessive ratios; h²/H₂ – number of genes with dominance; h²e – narrow-sense heritability; r – correlation coefficient;

*, ** – significant at the 5% and 1% probability level, respectively

Примечание: ¹D – аддитивное действие генов; H₁ – компонент вариации, обусловленный эффектами доминирования аллелей с положительным эффектом; H₂ – компонент вариации, обусловленный эффектами доминирования аллелей с отрицательным эффектом; F – относительная частота доминантных и рецессивных аллелей; h² – доминантное действие генов; E – ошибка эксперимента; D-H₁ – разница между аддитивным и доминантным эффектами генов; (H₁/D)^{1/2} – средняя степень доминирования; H₂/4H₁ – расстояние между аллелями (симметрия); K_D/K_R – соотношение доминантности и рецессивности; h²/H₂ – число генов с доминированием; h²e – наследуемость в узком смысле; r = коэффициент корреляции;

*, ** – значимы на 5% и 1% уровне вероятности соответственно

be corroborated through graphical analysis in cases where the regression line of Wr on Vr intercepts the ordinate axis below the origin point (Figure 1).

The correlation r (Yr, Wr + Vr) (-0.66) was negative, indicating that genes that increase the trait “number of pods per plant” are predominantly dominant (see Table 2). These results coincide with those found by M. P. Da Silva et al. (2004) and M. A. A. Barelli et al. (1999). The order of dominance is reflected in the covariance (Wr) and variance (Vr) relationship in the graph (see Figure 1). The higher proportion of dominant genes will be found closer to the origin point and will present lower values of Wr and Vr, while those found further from the origin point will present a higher number of recessive genes and higher values of Wr and Vr (Vallejo, Estrada, 2013). In this case, parents 2 (G23956), 3 (G20400), 5 (G16806), and 6 (G51158) were the most suitable for obtaining superior lines, since they carried a higher proportion of dominant genes and were located at the lower limit of the regression line (see Figure 1).

Pod length (PL)

The genetic variance components for the pod length trait (PL) were significant for D and H₁, while H₂, h², F, and E were

not significant (see Table 2). When comparing the magnitude of additive (D = 1.04**) and dominance (H₁ = 1.22*) components, the non-additive component was revealed to have a greater contribution to the expression of the mentioned character (see Table 2). Similar results were obtained by A. K. Islam et al. (2006) and A. M. Iqbal et al. (2011). It was also observed that the estimates obtained for D-H₁(-0.19) were negative, revealing that dominant effects are more important in the expression of the trait, as well as indicating overdominance, which can be confirmed by the value of (H₁/D)^{1/2} = 1.09 (see Table 2).

The environmental component (E) estimate was non-significant, suggesting the minimum role of environment in modifying this trait. Similar results were provided by Gangadhara et al. (2019) and Iqbal et al. (2011).

The heritability estimation showed a high narrow-sense heritability (h²e = 0.81; > 60%) for the studied trait, indicating that PL is highly heritable. Such magnitude allows the suggestion that desirable genes will be transmitted to the next generations with higher reliability. Considering the dominance components, the magnitude of H₁(1.22*) was higher than H₂(0.75), indicating the predominance of genes with positive effects among the parents for the PL trait, and this

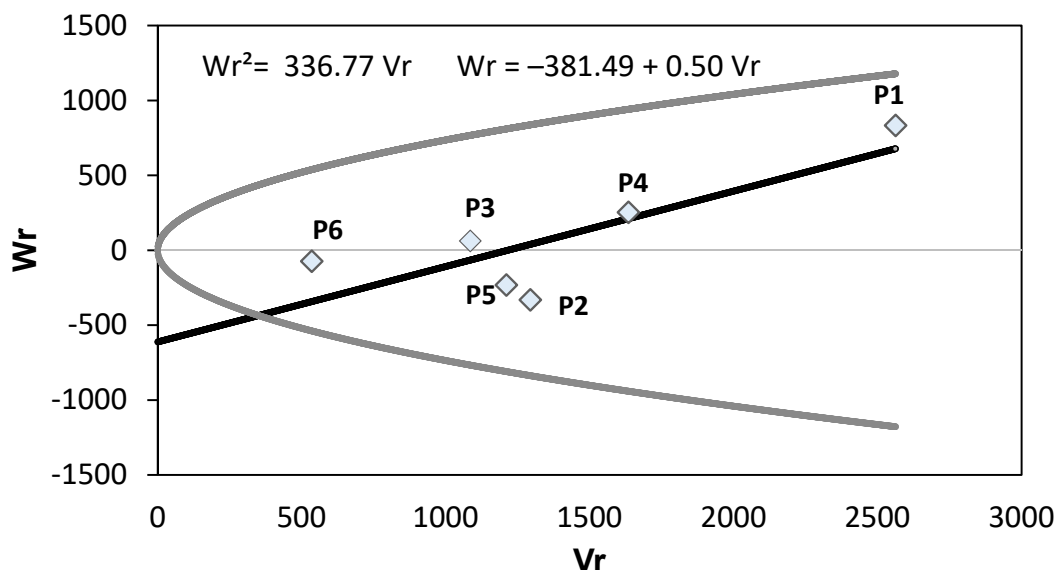


Fig. 1. Regression between W_r vs. V_r and limiting parabola for the number of pods per plant (NPP) in green bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Parents: P1 - G17723; P2 - G23956; P3 - G20400; P4 - G18212; P5 - G16806; P6 - G51158

Рис. 1. График зависимости W_r от V_r и ограничивающая парабола для количества бобов на растение (NPP) у овощной фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.). Родители: P1 - G17723; P2 - G23956; P3 - G20400; P4 - G18212; P5 - G16806; P6 - G51158

can also be confirmed by the $H_2/4H_1$ ratio. When evaluating the proportion of parents that are homozygous dominant or recessive, it is observed ($H_2/4H_1 = 0.15$) that there was no symmetry in the distribution of genes favorable and unfavorable to the increase of this trait among the parents.

The negative F value (-0.59) revealed that recessive genes were more frequent than dominant genes and were in a decreasing position, as confirmed by h^2 (-0.04) (see Table 2). The predominance of homozygous recessive forms was detected by analyzing the ratio of dominant to recessive genes in the studied parents ($K_D/K_R = 0.59$).

A positive correlation ($r = 0.55$) between the order of dominance of the parents ($W_r + V_r$) and their average value (Y_r) indicated that recessive genes increased the pod length trait (see Table 2). Figure 2 shows the distribution of parents, according to the proportion of dominant and recessive genes, as follows: parents 1 (G17723), 2 (G23956), and 6 (G51158) were located at the upper limit of the regression line, indicating that these parents have recessive genes for increasing pod length, and at the bottom of the line with the lowest pod length were parents 4 (G18212), 3 (G20400) and 5 (G16806) with the highest number of dominant genes.

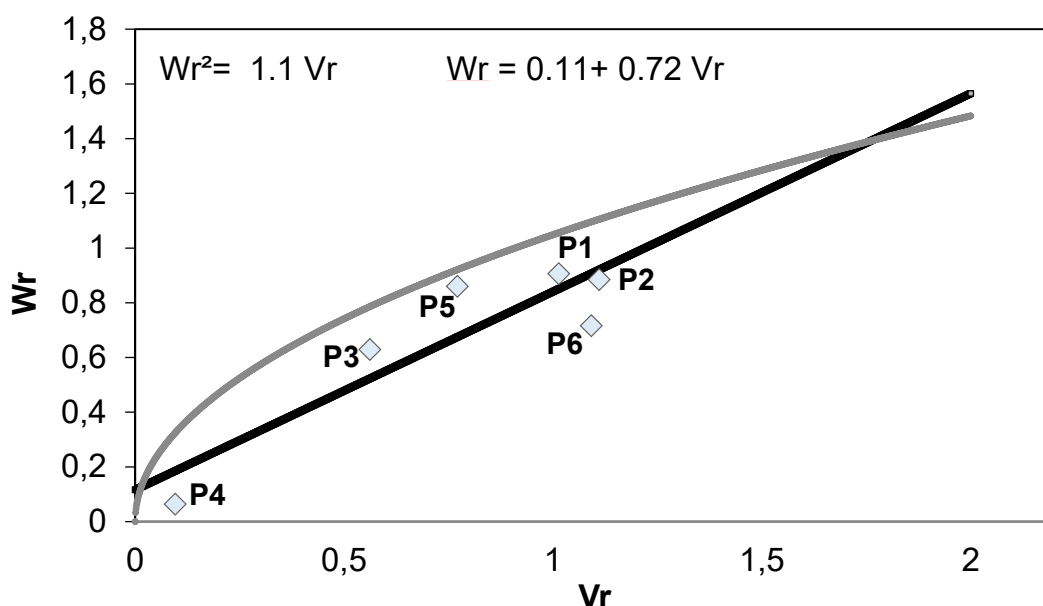


Fig. 2. Regression between W_r vs. V_r and limiting parabola for pod length (PL) in green bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Parents: P1 - G17723; P2 - G23956; P3 - G20400; P4 - G18212; P5 - G16806; P6 - G51158

Рис. 2. График зависимости W_r от V_r и ограничивающая парабола для длины боба (PL) у овощной фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.). Родители: P1 - G17723; P2 - G23956; P3 - G20400; P4 - G18212; P5 - G16806; P6 - G51158

Mean pod weight (MPW)

The additive genetic component ($D = 0.12$) and the component related to dominant gene action with positive effects ($H_1 = 0.21$) indicated that both additive and dominant gene deviations contributed to the expression of mean pod weight, although variation due to dominance deviations had a much greater contribution to the expression of this trait (see Table 2). Similar results were obtained by W. Krause et al. (2012) and E. V. Rodrigues et al. (2018). The value of H_1 was higher than the value of H_2 , indicating unequal gene frequency in the parents, and this was also supported by the ratio of $H_2/4H_1$ ($0.06 < 0.25$). The environmental component E was significant and its magnitude was higher than the respective value of D and H_1 (Table 2), indicating a higher environmental effect in the trait's expression.

Negative values of F (-0.30) and h^2 (-0.05) indicated that recessive genes were more frequent than dominant genes with the increasing position. The overall dominance effects of heterozygous loci (h^2) were found to be nonsignificant, indicating that dominance was due to homozygosity. Estimation of the number of h^2/H_2 genes with dominance could not be performed because h^2 was not significantly different from zero.

The ratio of dominant to recessive genes in the K_D/K_R parents (0.05) was less than one, indicating that recessive genes drove them. Significant environmental effects (E) were found, indicating the influence of the environment on this trait. The negative value of $D-H_1$ (-0.09), indicated overdominance, which could be confirmed by the $(H_1/D)^{1/2} = 1.31$ value. The heritability value ($h^2_e = 0.68$) indicated some selection possibilities in the segregating generations (see Table 2).

The correlation r ($Y_r, W_r + V_r$) (0.43) was positive, indicating that genes increasing the trait "mean pod weight" were predominantly recessive (see Table 2). The relative ranking of

the parents in terms of the proportions of dominant and recessive genes is presented in Figure 3, suggesting two clearly defined groups: parents 1 (G17723), 2 (G23956) and 6 (G51158) carry the highest proportion of recessive genes for increasing mean pod weight and are therefore located at the upper end of the regression line, while at the lower end near the origin point of the line for lower mean pod weight were parents 4 (G18212), 3 (G20400) and 5 (G16806) with the highest proportion of dominant genes.

Conclusions

Both additive and non-additive genetic effects were involved in the inheritance of the following traits in hybrids obtained from diallel crosses among six genotypes of *P. vulgaris*: the number of pods per plant, mean pod weight, and pod length. However, for the traits "number of pods per plant", "pod length", and "mean pod weight", the non-additive genetic effect was the major contributor to the expression of the traits. The number of pods per plant is determined by dominant alleles, while the mean pod weight and pod length characters are determined by recessive alleles. The parents P1 (G17723); P2 (G23956) and P6 (G51158) showed higher concentration of alleles favorable for increasing the pod length and mean pod weight characters, and the parents P2 (G23956), P5 (G16806) and P6 (G51158) for the number of pods per plant. The heritability, in the narrow sense (h^2_e), was low for the trait "number of pods per plant"; consequently, management of segregating populations should be accomplished by the single-seeded descent method. With the high magnitude of narrow-sense heritability (h^2_e) for the pod length and mean pod weight characters, it can be inferred that the most appropriate selection method is the pedigree method.

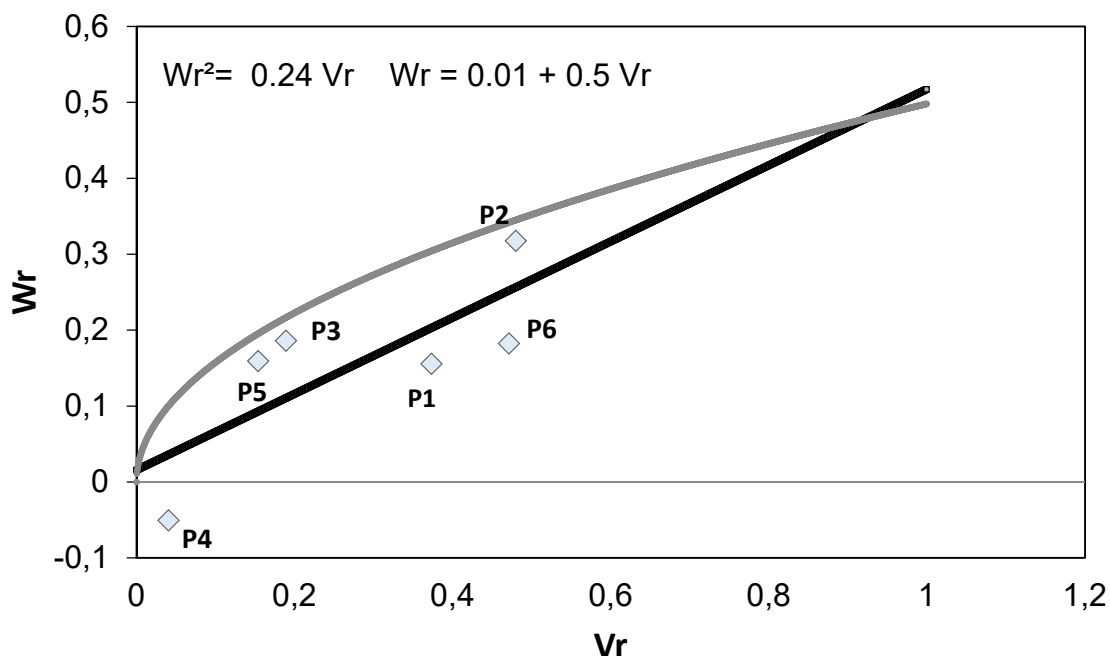


Fig. 3. Regression between W_r vs. V_r and limiting parabola for mean pod weight (MPW) in green bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Parents: P1 – G17723; P2 – G23956; P3 – G20400; P4 – G18212; P5 – G16806; P6 – G51158

Рис. 3. График зависимости W_r от V_r и ограничивающая парабола для среднего веса боба (MPW) у овощной фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.). Родители: P1 – G17723; P2 – G23956; P3 – G20400; P4 – G18212; P5 – G16806; P6 – G51158

References / Литература

- Agronet. Estadísticas agrícolas nacionales. 2020. [in Spanish] Available from: www.agronet.gov.co [accessed Dec. 11, 2022].
- Arunga E.E., Van Rheenen H.A., Owuochi J.O. Diallel analysis of Snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) varieties for important traits. *African Journal of Agricultural Research*. 2010;5(15):1951-1957.
- Barelli M.A.A., Vidigal M.C.G., do Amaral Júnior A.T., Vidigal Filho P.S., Silvério L. Genetic control on number of days to flowering and yield components in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Acta Scientiarum. Agronomy*. 1999;21(3):423-427. DOI: 10.4025/actasciagron.v21i0.4252
- Chung J.H., Stevenson E. Diallel analysis of the genetic variation in some quantitative traits in dry beans. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 1973;16(2):223-231. DOI: 10.1080/00288233.1973.10421139
- Cruz C.D. Programa GENES. Aplicativo Computacional em Genética e Estatística. Universidade Federal de Viçosa; 2020. [in Portuguese] Available from: www.ufv.br/dbg/genes/genes.htm [accessed Feb. 05, 2021].
- Cruz C.D., Regazzi A.J., Carneiro P.C.S. Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético. 3rd ed. Viçosa: UFV; 2004. [in Portuguese]
- Cruz C.D., Regazzi A.J., Carneiro P.C.S. Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético. 4th ed. Viçosa: UFV; 2012. [in Portuguese]
- Da Silva M.P., do Amaral Júnior A.T., Rodrigues R., Pereira M.G., Viana A.P. Genetic control on morphoagronomic traits in snap bean. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2004;47(6):855-862. DOI: 10.1590/S1516-89132004000600004
- Fabbri A.D.T., Crosby G.A. A review of the impact of preparation and cooking on the nutritional quality of vegetables and legumes. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2016;3:2-11. DOI: 10.1016/j.ijgfs.2015.11.001
- Gangadhara K., Yadav L.P., Kumar R., Apparao V.V., Selvakumar R. Genetic analysis for growth and yield parameters in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2019;8(6):1550-1555. DOI: 10.20546/ijcmas.2019.806.186
- Gardner C.O., Eberhart S.A. Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related populations. *Biometrics*. 1966;22(3):439-452. DOI: 10.2307/2528181
- Griffing B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences*. 1956;9(4):463-493. DOI: 10.1071/B19560463
- Hayman B.I. The analysis of variance of diallel tables. *Biometrics*. 1954a;10(2):235-244. DOI: 10.2307/3001877
- Hayman B.I. The theory and analysis of diallel crosses. *Genetics*. 1954b;39(6):789-809. DOI: 10.1093/genetics/39.6.789
- Hayman B.I. The theory and analysis of diallel crosses. III. *Genetics*. 1960;45(2):155-172. DOI: 10.1093/genetics/45.2.155
- Iqbal A.M., Nehvi F.A., Wani S.A., Henna Q., Dar Z.A., Lone A.A. Genetic studies in relation to yield and quality traits in rajmash (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 2011;3(1):8-13. DOI: 10.5897/JPBCS.9000064
- Islam A.K., Jahan M.M., Newaz M.A. Diallel analysis for gene action in dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Bangladesh Journal of Plant Breeding and Genetics*. 2006;19(2):07-14.
- Krause W., Rodrigues R., Leal N.R. Capacidade combinatória para características agronômicas em feijão-de-vagem. *Revista Ciência Agronômica*. 2012;43(3):522-531. [in Portuguese] DOI: 10.1590/S1806-66902012000300015
- Mather K., Jinks J.L. Biometrical genetics, the study of continuous variation. 3rd ed. London; New York, NY: Chapman and Hall; 1982.
- Nayak N.J., Maurya P.K., Maji A., Mandal A.R., Chattopadhyay A. Combining ability and genetic control of pod yield and component traits in dolichos bean. *International Journal of Vegetable Science*. 2018;24(4):390-403. DOI: 10.1080/19315260.2018.1423598
- Ortiz S., Valdés-Restrepo M.P., Vallejo F.A. Efecto de la endocría sobre habilidad combinatoria del rendimiento y calidad en zapallo (*Cucurbita moschata* Duchesne). *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*. 2020;23(1):1-10. [in Spanish] DOI: 10.31910/rudca.v23.n1.2020.1176
- Owusu E.Y., Mohammed H., Manigben K.A., Adjebeng-Danquah J., Kusi F., Karikari B. et al. Diallel analysis and heritability of grain yield, yield components, and maturity traits in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). *The Scientific World Journal*. 2020;2020:9390287. DOI: 10.1155/2020/9390287
- Rocha F.D., Stingham J.C., Gemeli M.S., Coimbra J.L.M., Guidolin A.F. Diallel analysis as a tool when selecting parents for beans. *Revista Ciência Agronômica*. 2014;45(1):74-81. DOI: 10.1590/S1806-66902014000100010
- Rodrigues E.V., Damasceno-Silva K.J., Rocha M., Bastos E.A., Dos Santos A. Diallel analysis of tolerance to drought in cowpea genotypes. *Revista Caatinga*. 2018;31(1):40-47. DOI: 10.1590/1983-21252018v31n105rc
- Rodrigues E.V., Damasceno-Silva K.J., Rocha M.M., Bastos E.A. Diallelic analysis to obtain cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) populations tolerant to water deficit. *Genetics and Molecular Research*. 2016;15(2):15027996. DOI: 10.4238/gmr.15027996
- Rodrigues R., Leal N.R., Pereira M.G. Análise dialélica de seis características agronômicas em *Phaseolus vulgaris* L. *Bragantia*. 1998;57(2):241-250. [in Portuguese] DOI: 10.1590/S0006-87051998000200005
- Singh R.K., Chaudhary B.D. Biometrical methods in quantitative genetic analysis. New Delhi; 1999.
- Vallejo F.A., Estrada E.I. Mejoramiento genético de plantas. 2nd ed. Santiago de Cali: Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira; 2013. [in Spanish]
- Vencovsky R., Barriga P. *Genética biométrica no fitomelhoramento*. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética; 1992. [in Portuguese]

Information about the authors

Mayra Contreras-Rojas, PhD (Agric. Sci.), Universidad Francisco de Paula Santander, 12E-96 Avenida Gran Colombia, San José de Cúcuta, Norte de Santander 540003, Colombia, mayracontreras@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6343-8806>

Dilmer Gabriel Guerra Guzmán, MSc (Agric. Sci.), Universidad Nacional de Agricultura, Km. 6, Catacamas, Olancho 16201, Honduras, dguerrag@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4727-491X>

Seir Antonio Salazar Mercado, Researcher, Universidad Francisco de Paula Santander, 12E-96 Avenida Gran Colombia, San José de Cúcuta, Norte de Santander 540003, Colombia, seirantonio@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-3287-703X>

Информация об авторах

Майра Контрерас-Рохас, доктор сельскохозяйственных наук, Университет Франсиско де Паула Сантандер, 540003 Колумбия, Сев. Сантандер, Сан-Хосе де Кукута, Авенида Гран Колумбия, 12E-96, mayracontreras@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-6343-8806>

Дилмер Габриэль Гуэрра Гусман, магистр сельскохозяйственных наук, Национальный сельскохозяйственный университет, 16201 Гондурас, Оланчо, Катакамас, 7-й км, dguerrag@unal.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4727-491X>

Сеир Антонио Саласар Меркадо, научный сотрудник, Университет Франсиско де Паула Сантандер, 540003 Колумбия, Сев. Сантандер, Сан-Хосе де Кукута, Авенида Гран Колумбия, 12E-96, seirantonio@ufps.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-3287-703X>

Contribution of the authors: Contreras-Rojas M., Guzmán D.G.G. – idea; experimental design; statistical processing of the data obtained; writing (preparation of the original draft). Contreras-Rojas M., Guzmán D.G.G., Salazar Mercado S.A. – writing (revising); editing; approval of the final version of the article.

Вклад авторов: Контрерас-Рохас М., Гусман Д.Г.Г. – идея; дизайн эксперимента; статистическая обработка полученных данных; написание статьи (подготовка первоначального варианта). Контрерас-Рохас М., Гусман Д.Г.Г., Саласар Меркадо С.А. – написание статьи (переработка текста); редактирование; утверждение окончательного варианта статьи.

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 03.03.2023; approved after reviewing on 25.04.2023; accepted for publication on 04.09.2023. Статья поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 25.04.2023; принята к публикации 04.09.2023.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 633.81:631.52:58.02
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-125-134



Сравнительное экологическое испытание сортов тысячелистника обыкновенного в Подмоскowie

И. Н. Коротких¹, Н. В. Невкрытая², Т. В. Платонова²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, Москва, Россия*

² *Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Ирина Николаевна Коротких, slavnica241270@yandex.ru

Актуальность. Результаты экологического испытания сортов являются основанием для районирования новых сортов и расширения зоны возделывания существующих сортов. Объектами экологического испытания в 2018–2020 гг. в Московском регионе были сорта тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium* L.) ‘Эней’ и ‘Миллениум’ селекции НИИСХ Крыма и ‘Васюринский’ селекции Северо-Кавказского филиала ВИЛАР.

Методы. Питомник заложен посадочным материалом вегетативного происхождения. Оценка фенологических, морфометрических параметров, показателей продуктивности сырья и структуры урожая проведена в фазе «массовое цветение» с использованием стандартных методик.

Результаты. Высота растений сорта ‘Васюринский’ – от 72 до 106 см, ‘Эней’ – от 43 до 56 см, ‘Миллениум’ – от 38 до 42 см. Урожайность сырья достигает 8,8–10,3 т/га свежей зеленой массы у крымских сортов, у сорта ‘Васюринский’ – 18,2 т/га. По урожайности зеленой и воздушно-сухой массы сорт ‘Васюринский’ превосходит сорта ‘Эней’ и ‘Миллениум’ в 1,7–2,9 и 1,5–2,6 раза соответственно. Содержание эфирного масла у сорта ‘Эней’ – 4,74% от абсолютно сухой массы сырья, что выше в 1,6–3,5 раза, чем у сортов ‘Миллениум’ (2,99%) и ‘Васюринский’ (1,35%). Содержание хамазулена в эфирном масле крымских сортов в 10–12 раз, кариофиллена и гермакрена D – в 2,5–3,1 раза выше, чем в эфирном масле сорта ‘Васюринский’.

Заключение. Все изученные сорта тысячелистника обыкновенного рекомендуются для промышленного возделывания в Центральном регионе Нечерноземной зоны РФ: для получения лекарственного сырья – сорт ‘Васюринский’, для получения эфирного масла – сорта ‘Эней’ и ‘Миллениум’.

Ключевые слова: лекарственные и эфиромасличные культуры, сорт, урожайность, эфиромасличное сырье, эфирное масло

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по научным проектам № EUG-2019-0007/122012700385-3 и № FNZW-2022-0007/1021032425046-6.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Коротких И.Н., Невкрытая Н.В., Платонова Т.В. Сравнительное экологическое испытание сортов тысячелистника обыкновенного в Подмоскowie. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):125-134. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-125-134

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-125-134

Comparative ecological testing of *Achillea millefolium* (L.) cultivars in Moscow ProvinceIrina N. Korotkikh¹, Natalia V. Nevkrytaya², Tatyana V. Platonova²¹All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russia²Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia**Corresponding author:** Irina N. Korotkikh, slavnica241270@yandex.ru**Background.** The cultivars of *Achillea millefolium* L.: 'Eney' and 'Millennium' (Research Institute of Agriculture of Crimea), and

'Vasyurinsky' (North-Caucasian Branch of VILAR), were the objects of the ecological testing in 2018–2020 in Moscow Province.

Methods. A nursery was established with planting material of vegetative origin. Phenological and morphometric parameters, indicators of raw matter productivity, and crop structure components were assessed in the phase of mass flowering.**Results.** For cv. 'Vasyurinsky', the start of growing and subsequent phenological phases occurred 14–25 days earlier than for 'Eney' and 'Millennium' whose growing season was 15–20 days longer. The plant height varied from 72 to 106 cm for cv. 'Vasyurinsky', 43 to 56 cm for 'Eney', and 38 to 42 cm for 'Millennium'. The yield of fresh green biomass reached 8.8–10.3 t/ha for the Crimean cultivars, and 18.2 t/ha for 'Vasyurinsky'. The latter exceeded cvs. 'Eney' and 'Millennium' in the yield of green biomass and air-dry matter (1.7–2.9 and 1.5–2.6 times, respectively). Essential oil content in 'Eney' was 4.74% of the absolute dry weight, being 1.6–3.5 times higher than in 'Millennium' (2.99%) and 'Vasyurinsky' (1.35%). Chamazulene content in the essential oil of the Crimean cultivars was 10–12 times higher, and the content of caryophyllene and germacrene D 2.5–3.1 times higher than in the essential oil of cv. 'Vasyurinsky'.**Conclusion.** All the studied cultivars of *A. millefolium* can be recommended for commercial cultivation in Moscow Province.**Keywords:** medicinal and essential oil crops, cultivar, yield, essential oil raw material, essential oil**Acknowledgements:** the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under scientific projects No. EUG-2019-0007/122012700385-3 and No. FNZW-2022-0007/1021032425046-6.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Korotkikh I.N., Nevkrytaya N.V., Platonova T.V. Comparative ecological testing of *Achillea millefolium* (L.) cultivars in Moscow Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):125-134. DOI:10.30901/2227-8834-2023-3-125-134

Введение

Тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* L. – многолетнее травянистое растение семейства Астровые (Asteraceae) (Sidelnikov, 2021). Широко распространенный в Европе и Азии вид, занесен также и на другие континенты. В России встречается практически во всех регионах. Используется как лекарственное, пряное, декоративное и медоносное растение. Для использования в качестве лекарственного сырья заготавливают два вида сырья – отдельно цветки (соцветия) тысячелистника (*Flores Millefolii*) и траву (*Herba Millefolii*) (FS.2.5.0101.18..., 2018). Надземная часть растения в период цветения содержит флавоноиды, алкалоид ахиллеин, кумарины, аконитовую кислоту, горькие и дубильные вещества, смолы, органические кислоты, инулин, аспарагин, минеральные соли, аскорбиновую кислоту, филлохинон, каротин, холин. Из сырья тысячелистника обыкновенного получают эфирное масло, содержание которого составляет 0,2–0,8% (Voitkevich, 1999; Pashtetskiy et al., 2021). В состав эфирного масла входят α - и β -пинены, борнилацетат, камфора, лимонен, туйон, борнеол, 1,8-цинеол, азулен, β -кариофиллен, кислоты, сесквитерпены и сесквитерпеновые спирты и др., но наиболее ценным компонентом является хамазулен, количество которого весьма непостоянно, от 6 до 25% (Voitkevich, 1999; Rabotyagov et al., 2017). Содержание компонентов эфирного масла зависит от качества растительного сырья, почвенно-климатических условий региона выращивания, технологии получения (Voitkevich, 1999; Alyakin et al., 2009; Danileiko et al., 2012). При заготовке лекарственного сырья необходимо учитывать экологические условия, степень загрязненности урбо- и агробиоценоза (Дуакова, 2020).

Эфирное масло и экстрактивные вещества, получаемые из тысячелистника обыкновенного, обладают ранозаживляющим и противовоспалительным эффектами, антиоксидантной, антирадикальной активностью (Vardanyan et al., 2018; Solovyeva et al., 2015; Efremov, Zyukova, 2021). Растение широко используется в медицине различных стран как кровоостанавливающее (при носовых, маточных, легочных, геморроидальных и других кровотечениях), при колите, различных заболеваниях желудочно-кишечного тракта, язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки, воспалительных заболеваниях мочевыводящих путей; обладает бактерицидными свойствами. Клинически подтверждена его эффективность при бронхолегочных заболеваниях: бронхиальной астме, бронхитах, пневмониях, туберкулезе легких, ОРВИ, гриппе. Тысячелистник обыкновенный является компонентом сборов, применяемых при простудных заболеваниях, особенно у часто и длительно болеющих детей (Chusovitina, Karpukhin, 2019). Применяется в виде настоев, отваров, экстрактов, входит в состав желудочных и аппетитных сборов (сбор противогеморроидальный; сбор слабительный № 1; сборы желчегонные № 2-3; сбор для возбуждения аппетита; «Мирфазин», сбор гипогликемический; «Гербафоль»; сбор Здренко). Тысячелистника экстракт жидкий – кровоостанавливающее средство. Экстракт травы тысячелистника входит в состав комплексных лекарственных средств («Ротокан», «Лив.52», «Тонзилгон Н», «Фарингал», «Холафлукс» и др.). Водно-спиртовое извлечение входит в состав общеукрепляющих бальзамов («Московия», «Панта-Форте») и эликсиров («Виватон», «Эвалар», «Демидовский») и др.

Приведенная информация убедительно свидетельствует о высокой ценности тысячелистника обыкновен-

ного и необходимости выращивания его с целью удовлетворения потребности в сырье для разных направлений использования. В настоящее время в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию, зарегистрировано три сорта тысячелистника обыкновенного – ‘Васюринский’ селекции Всероссийского научно-исследовательского института лекарственных и ароматических растений (ВИЛАР) и сорта селекции Научно-исследовательского института сельского хозяйства Крыма (НИИСХ Крыма) ‘Эней’ и ‘Миллиум’ (State Register..., 2021). Поскольку селекционные исследования проводятся в условиях конкретного региона, весьма актуальными являются экологические испытания созданных сортов с целью выявления регионов, наиболее благоприятных по своим условиям для их производственного возделывания.

В 2017–2020 гг. сотрудниками НИИСХ Крыма, ВИЛАР и Северо-Кавказского филиала ВИЛАР (СКФ ВИЛАР) проведено экологическое испытание сортов, созданных в этих учреждениях. В трех регионах – Предгорная зона Крыма, Центральный регион (Подмосковье) и Западное Предкавказье – оценили влияние особенностей климатических факторов и сезонных метеорологических условий на рост и развитие растений, формирование урожая и качество сырья сортов эфиромасличных культур (душицы обыкновенной, Melissa лекарственной, шалфея лекарственного, тысячелистника обыкновенного, аниса пахучего, укропа пахучего, фенхеля обыкновенного). Оценивали также сортовые различия и стабильность сортовых показателей в связи с изменением климатических и сезонных метеорологических условий при переносе сортов в другой регион. Результаты исследований показали, что стабильно высокими показателями продуктивности и качества сырья в условиях конкретного региона обладают сорта исследованных культур, либо созданные, либо прошедшие многолетнюю акклиматизацию в данном регионе (Nevkrytaya et al., 2021; Nevkrytaya et al., 2022). Анализ урожайности сырья, содержания и компонентного состава эфирного масла сортов фенхеля обыкновенного и аниса обыкновенного выявил значительные различия сортовых показателей в зависимости от погодно-климатических особенностей региона исследования. Это позволило сделать соответствующие рекомендации по выбору сорта для конкретного региона (Zolotilova et al., 2020a; Zolotilova et al., 2020b). При проведении сравнительного изучения сортов Melissa лекарственной и шалфея лекарственного выявлены различия в соотношении компонентов эфирного масла в зависимости от метеорологических условий региона возделывания (Nevkrytaya et al., 2020; Nevkrytaya et al., 2021). Результаты аналогичного исследования сортов тысячелистника обыкновенного приведены в данной публикации.

Поскольку при регистрации новых сортов лекарственных и эфиромасличных культур экологическое испытание не предусмотрено, сорта зачастую необоснованно рекомендуются для возделывания в ряде регионов с совершенно разными почвенно-климатическими условиями. Поэтому экологическое испытание сортов в разных регионах является весьма актуальным и ценным для практики.

Цель исследования – сравнительное экологическое испытание сортов тысячелистника обыкновенного ‘Васюринский’, ‘Эней’ и ‘Миллиум’ в условиях Подмосковья для выявления целесообразности их промышленного возделывания в данном регионе.

Материалы и методы

Сравнительное изучение сортов тысячелистника обыкновенного 'Эней', 'Миллениум' (НИИСХ Крыма) и 'Васюринский' (ВИЛАР) по комплексу признаков проведено в 2018–2020 гг. в условиях Подмосковья (Московская обл., Центральный регион Нечерноземной зоны РФ).

Методика полевого опыта

Питомник на опытном участке ВИЛАР заложен 15 мая 2018 г. посадочным материалом, полученным делением корневищ многолетних растений. Делянки трехрядковые, длина ряда – 5 м. Схема посадки: 0,3 × 0,6 м. Площадь делянки – 9,0 м² по каждому сорту. В ряду размещается 16 растений. Учетных растений – по 16 в трех повторениях у каждого сорта.

Оценка фенологических, морфометрических параметров и показателей продуктивности проведена на стадии цветения растений в соответствии с методическими рекомендациями для эфиромасличных культур (Aginshyteyn, 1977). Выполнена статистическая обработка полученных данных по Б. А. Доспехову с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2010 (Dospikhov, 2012).

Определение содержания и состава эфирного масла

Содержание эфирного масла в воздушно-сухом сырье определяли методом гидродистилляции по Гинзбергу (Karpacheva, 1972). Компонентный состав эфирного масла определяли методом газовой хроматографии на приборе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором при следующих технических условиях: газ-носитель – гелий марки А; тип детектора – пламенно-ионизационный; колонка капиллярная CR-WAXms размером 30 м × 0,32 мм; толщина слоя неподвижной фазы – 0,5 мкм; температура детектора – 250°C; температура испарителя – 230°C. Программирование температуры: начальная температура колонки 75°C с выдержкой в 1 минуту; скорость нагрева 4°C/мин; конечная температура колонки 220°C без выдержки; длительность анализа – 37,3 мин; деление потока – 1 : 20. Идентификация компонентов прове-

дена путем сравнения их индексов удерживания по Ковачу с литературными данными. Индексы удерживания Ковача определялись по отношению к гомологическому ряду n-алканов (C₈ – C₄₀) в тех же рабочих условиях.

Выполнена статистическая обработка полученных данных по Б. А. Доспехову с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2010 (Dospikhov, 2012).

Почвенно-климатические условия региона

Почвенный покров опытного участка представлен дерново-подзолистыми средне оподзоленными пылеватыми суглинками (мощностью 80–100 см), подстилаемыми моренными отложениями. Пахотный горизонт мощностью 22–23 см, буровато-серой окраски, мелкокомковатый или комковатый, по гранулометрическому составу почва среднесуглинистая. Агрохимические показатели почвы: содержание гумуса – 2,1%, рН (по KCl) – 5,5, содержание подвижного фосфора P₂O₅ (по Кирсанову) – 52 мг/кг, обменного калия K₂O – 87 мг/кг. В годы проведения исследования минеральные удобрения не вносили по условиям опыта.

Московская область входит во второй агроклиматический район (Agro-climatic guide..., 1967). Климат умеренно континентальный, с хорошо выраженными переходными сезонами, теплым летом, умеренно холодной зимой и устойчивым снежным покровом. Суммарная солнечная радиация составляет 87–89 ккал/см в год. Средняя температура самого холодного месяца (январь): –11°C, самого теплого месяца (июль): +17°C. Период со среднесуточной температурой выше +10 длится в среднем 206–216 (до 220) дней. Средняя многолетняя сумма эффективных температур составляет 1371°C. Регион относится к зоне достаточного увлажнения: гидротермический коэффициент увлажнения (по Г. К. Селянинову) – 1,4. Годовая сумма осадков достигает 550–560 мм при невысокой испаряемости с поверхности (420 мм), осадки в виде дождя преимущественно выпадают в июле – августе.

Метеоусловия в годы проведения исследования имели ряд отличий, что позволяет достаточно объективно судить о показателях продуктивности сравниваемых сортов в данном регионе (рис. 1, 2).

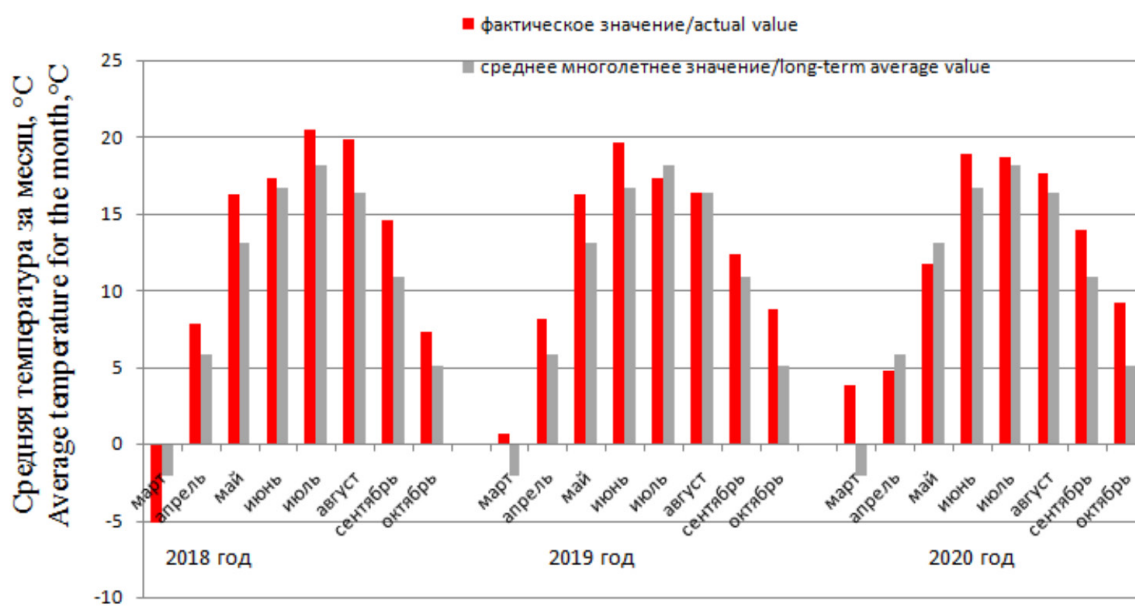


Рис. 1. Температурный режим вегетационных сезонов 2018–2020 гг., Московская обл.

Fig. 1. Temperature regimes of the 2018–2020 growing seasons in Moscow Province

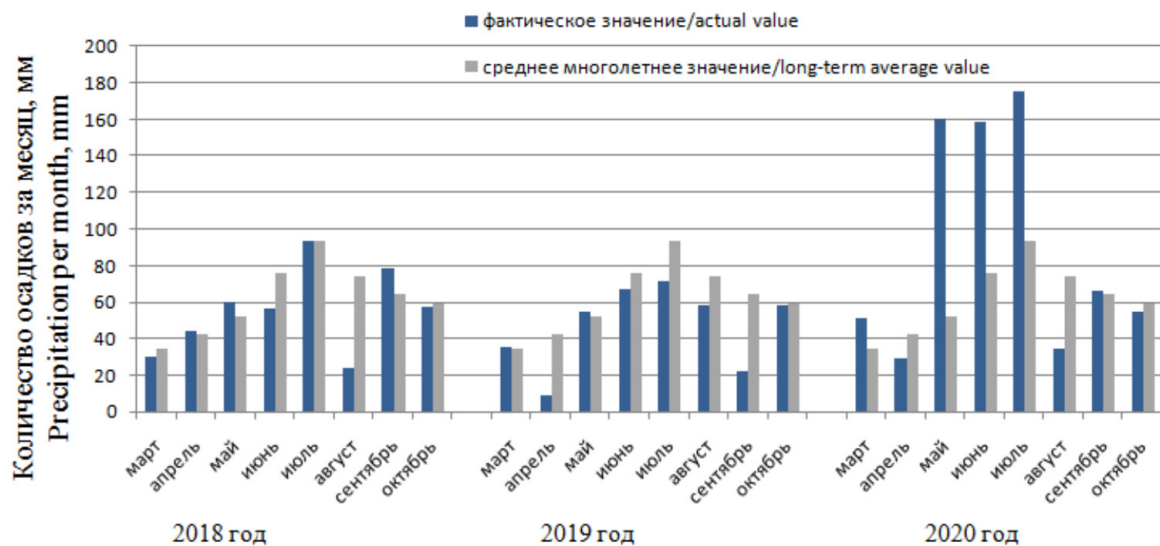


Рис. 2. Режим осадков вегетационных сезонов 2018–2020 гг., Московская обл.

Fig. 2. Precipitation regimes of the 2018–2020 growing seasons in Moscow Province

В течение вегетационного сезона 2018 г. не отмечено резких колебаний температуры: среднемесячные температуры соответствовали норме с небольшим превышением в 2–3°C вплоть до октября. Количество осадков в отдельные месяцы (май и сентябрь) превышало многолетнюю норму на 15 и 21% соответственно. В 2019 г. снежный покров в течение всех зимних месяцев практически отсутствовал, при этом почва промерзала поверхностно (на 0,5–1,5 см). Среднемесячные температуры превышали среднемноголетние значения на 2–3°C, при этом наблюдался выраженный дефицит влаги в конце весны и начале лета (в апреле 19% и в июне 88% от нормы при неравномерном выпадении осадков). В 2020 г. температурный фон весенних и летних месяцев был крайне неустойчивым: минимальные температуры чередовались с максимальными. Избыточное количество осадков выпало в мае – июле (в 2–3 раза выше нормы)

при умеренных температурах. В апреле – мае дефицит тепла составлял 1–1,4°C. В летние месяцы средние температуры были выше на 0,5–2,2°C, в осенние месяцы – выше на 3–4°C средних многолетних показателей.

Результаты и обсуждение

Наблюдение за развитием растений сравниваемых сортов тысячелистника обыкновенного показало отсутствие различий по устойчивости к условиям зимнего периода. Начало вегетации и последующие фенологические фазы у сорта 'Васюринский' в условиях Подмосковья наступали на 14–25 дней раньше по сравнению с сортами 'Эней' и 'Миллениум' (табл. 1). Цветение началось у сорта 'Васюринский' в июне, у крымских сортов – со второй половины июля. Продолжительность цветения крымских сортов на 15–20 дней больше. Различия общей

Таблица 1. Сроки наступления и продолжительность фенофаз у сортов *Achillea millefolium* L. (Московская обл., 2018–2020 гг.)

Table 1. Onset timing and duration of phenophases for the *Achillea millefolium* L. cultivars (Moscow Province, 2018–2020)

Фенофаза / Phenophase	'Эней' / 'Eney'	'Миллениум' / 'Millenium'	'Васюринский' / 'Vasyurinsky'
Сроки наступления фенофаз / Phenophase onset timing			
начало отрастания / beginning of growing	12.05 – 20.05	16.05 – 20.05	05.05 – 12.05
начало стеблевания / beginning of stemming	21.05 – 19.06	27.05 – 01.07	15.05 – 1.06
массовое цветение / mass flowering	16.07 – 31.08	28.07 – 21.09	01.07 – 27.07
Продолжительность межфазных периодов, дней / Duration of interphase periods, days			
начало отрастания – начало цветения / beginning of growing – beginning of flowering	57,3 ± 2,0	66,0 ± 9,5	51,3 ± 2,6
начало цветения – окончание цветения / beginning of flowering – end of flowering	49,3 ± 4,8	53,3 ± 7,5	31,3 ± 1,7
начало отрастания – окончание плодоношения / beginning of growing – end of fruiting	134,3 ± 5,9	139,7 ± 3,8	129,0 ± 4,6

продолжительности вегетационного периода у сравниваемых сортов не существенны для процесса их выращивания на сырье.

Следует отметить, что при создании сорта 'Васюринский' основное внимание селекционеров было направлено прежде всего на высокую урожайность сырья. Главной задачей при выведении сортов 'Эней' и 'Миллениум' было получение сырья с высоким содержанием эфирного масла, характеризующегося ценным компонентным составом. Различие в направлении селекционных исследований четко проявилось при сопоставлении сортов по изучаемому комплексу признаков.

Высота растений сорта 'Васюринский' существенно возрастала ежегодно и на третий год вегетации увеличилась по сравнению с первым годом вдвое (табл. 2, рис. 3).

У крымских сортов этот показатель был более стабильным. Так, у сорта 'Миллениум' различие по высоте растений 1–3-го года вегетации находилось в среднем в пределах 3–5 см, а у сорта 'Эней' – 3–13 см. По диаметру надземной части растения крымских сортов на 2–3-й год вегетации достоверно превосходили сорт 'Васюринский'.

У всех сортов отмечена сходная возрастная динамика побегообразования: число побегов за три года увеличивается в 8–9 раз. Прирост надземной массы у крымских сортов происходил только за счет увеличения числа побегов и исчерпывался к третьему году при смыкании корневых рядков. У сорта 'Васюринский' прирост про-

исходит за счет увеличения высоты растений, числа и массы генеративных побегов вплоть до третьего года вегетации. Масса побегов сорта 'Васюринский' формируется за счет облиственности и размера соцветий (в 2,5–3 раза больших, чем у крымских сортов). У всех сортов масса воздушно-сухого сырья втрое меньше массы свежего сырья. Две трети обоих видов сырья составляют соцветия и листья. По урожайности зеленой и воздушно-сухой массы сорт 'Васюринский', начиная со второго года вегетации, существенно превосходит сорта 'Эней' и 'Миллениум' – соответственно в 1,7–2,9 и 1,5–2,6 раза (табл. 3).

Самым высоким накоплением эфирного масла в сырье характеризовался сорт 'Эней'. По этому показателю он превышал сорта 'Миллениум' и 'Васюринский' в 1,6 и 3,5 раза соответственно. Содержание эфирного масла в сырье увеличивается с возрастом растений независимо от различий погодных условий по годам. По сбору эфирного масла сорт 'Васюринский' лишь на третий год достигает уровня крымских сортов, что связано с его высокой урожайностью. Однако переработка большего объема сырья этого сорта требует значительных дополнительных затрат.

Проведен хроматографический анализ компонентного состава эфирного масла всех изученных сортов тысячелистника обыкновенного (табл. 4). Основным и наиболее ценным компонентом эфирного масла тысячелистника обыкновенного является хамазулен, регламентиру-

Таблица 2. Характеристика морфологических показателей и структуры урожая сортов *Achillea millefolium* L.

Table 2. Description of morphological indicators and crop structure components for the *Achillea millefolium* L. cultivars

Сорт / Cultivar	Год / Year	Высота растения, см / Plant height, cm	Диаметр надземной части, см / Aboveground part diameter, cm	Отношение воздушно- сухой массы сырья к массе свежего сырья, % / Ratio of air-dry raw material to fresh raw material, %	Доля соцветий и листьев в общей массе, % / Proportion of inflorescences and leaves in the total biomass, %	
					свежего сырья / of fresh raw material	воздушно- сухого сырья / of air-dry raw material
Васюринский / Vasyurinsky	2018	54,5 ± 1,4	38,1 ± 0,1	29,4 ± 0,1	63,3 ± 0,6	62,0 ± 0,2
	2019	72,5 ± 0,7	45,4 ± 0,3	35,8 ± 0,6	66,1 ± 0,8	66,4 ± 1,6
	2020	106,4 ± 1,0	42,3 ± 1,1	36,8 ± 2,5	53,0 ± 0,1	48,6 ± 1,3
	среднее / mean ± SE	77,8 ± 15,2	41,9 ± 2,1	34,0 ± 2,3	60,8 ± 4,0	59,0 ± 5,4
Миллениум / Millenium	2018	38,5 ± 0,1	37,5 ± 1,5	28,3 ± 0,54	66,5 ± 0,6	66,2 ± 0,6
	2019	35,8 ± 0,4	57,5 ± 0,6	31,1 ± 0,1	62,3 ± 0,5	62,8 ± 1,3
	2020	42,3 ± 1,1	49,9 ± 0,1	36,5 ± 0,8	58,6 ± 0,3	55,0 ± 0,6
	среднее / mean ± SE	38,9 ± 1,9	48,3 ± 5,8	32,0 ± 2,4	62,5 ± 2,3	61,3 ± 3,3
Эней / Eney	2018	37,4 ± 0,7	37,0 ± 0,5	30,1 ± 0,7	62,7 ± 0,4	61,5 ± 0,5
	2019	43,7 ± 1,4	53,4 ± 0,8	34,8 ± 0,5	61,7 ± 0,2	60,2 ± 0,6
	2020	56,1 ± 1,7	58,7 ± 0,5	32,5 ± 1,3	59,0 ± 0,6	55,3 ± 0,3
	среднее / mean ± SE	45,7 ± 5,5	49,7 ± 6,5	32,4 ± 1,3	61,1 ± 1,1	59,0 ± 1,9



Рис. 3. Морфология сортовых растений *Achillea millefolium* L.: 1 – ‘Васюринский’, 2 – ‘Эней’, 3 – ‘Миллениум’
Fig. 3. Morphology of the *Achillea millefolium* L. cultivar plants: 1 – ‘Vasyurinsky’, 2 – ‘Eney’, 3 – ‘Millenium’

Таблица 3. Показатели продуктивности сырья сортов *Achillea millefolium* L.
Table 3. Raw material productivity of the *Achillea millefolium* L. cultivars

Сорт / Cultivar	Год / Year	Урожайность зеленой массы, т/га / Green biomass yield, t/ha		Массовая доля эфирного масла, % / Essential oil content, %		Сбор эфирного масла, кг/га / Essential oil harvest, kg/ha
		свежее сырье / fresh raw material	воздушно- сухое сырье / air-dry raw material	в абсолютно сухом сырье / in absolute dry raw material	в воздушно- сухом сырье / in air-dry raw material	из воздушно- сухого сырья / from air-dry raw material
Васюринский / Vasyurinsky	2018	7,4 ± 0,18	2,2 ± 0,07	-	0,15 ± 0,00	3,3 ± 0,20
	2019	18,0 ± 0,29	6,2 ± 0,20	0,83 ± 0,06	0,18 ± 0,01	10,9 ± 0,40
	2020	29,3 ± 2,14	10,6 ± 0,10	1,87 ± 0,17	0,20 ± 0,01	21,3 ± 0,20
	среднее mean ± SE	18,2 ± 6,30	6,3 ± 2,40	1,35 ± 0,52	0,18 ± 0,01	11,8 ± 5,20
Миллениум / Millenium	2018	7,2 ± 0,08	2,04 ± 0,03	-	0,30 ± 0,00	6,1 ± 0,20
	2019	12,7 ± 0,50	4,0 ± 0,20	2,09 ± 0,20	0,42 ± 0,04	16,4 ± 2,70
	2020	11,0 ± 0,19	4,0 ± 0,10	3,89 ± 0,82	0,37 ± 0,07	15,0 ± 0,30
	среднее mean ± SE	10,3 ± 1,60	3,4 ± 0,60	2,99 ± 0,90	0,36 ± 0,03	12,5 ± 3,20
Эней / Eney	2018	5,4 ± 0,10	1,6 ± 0,01	-	0,43 ± 0,01	7,3 ± 0,20
	2019	10,3 ± 0,30	3,7 ± 0,20	3,55 ± 0,51	0,55 ± 0,08	19,1 ± 1,90
	2020	10,2 ± 0,10	3,3 ± 0,06	5,93 ± 0,32	0,58 ± 0,03	19,3 ± 0,40
	среднее mean ± SE	8,9 ± 1,60	2,9 ± 0,6	4,74 ± 1,19	0,52 ± 0,05	15,2 ± 4,00

Таблица 4. Компонентный состав эфирного масла сортов *Achillea millefolium* L.**Table 4. Essential oil component composition of the *Achillea millefolium* L. cultivars**

Сорт / Cultivar	Год / Year	Содержание основных компонентов, % / Content of main components, %		
		Хамазулен / Chamazulene	Гермакрен D / Germacrene D	Кариофиллен / Caryophyllene
Васюринский / Vasyurinsky	2018*	-	-	-
	2019	1,7	5,0	3,8
	2020	4,4	4,0	2,4
	среднее / mean ± SE	3,1 ± 1,4	4,5 ± 0,5	3,1 ± 0,7
Миллениум / Millenium	2018	37,8	18,1	7,6
	2019	22,3	11,2	8,1
	2020	37,1	10,9	7,4
	среднее / mean ± SE	32,4 ± 5,1	13,4 ± 2,4	7,7 ± 0,2
Эней / Eney	2018	54,8	16,1	7,1
	2019	18,3	12,2	9,2
	2020	37,5	13,8	7,0
	среднее / mean ± SE	36,9 ± 10,5	14,0 ± 1,1	7,8 ± 0,7

Примечание: * – в связи с недостаточным количеством эфирного масла анализ компонентного состава не проводили

Note: * – the analysis of the component composition was not accomplished due to an insufficient amount of essential oil

ющий, согласно ГОСТ 31791-2017, качество цветочно-травянистого эфиромасличного сырья и эфирных масел (ГОСТ 31791-2017..., 2018). Установлено, что содержание хамазулена в сортах 'Эней' и 'Миллениум' составляло в среднем $32,4 \pm 5,1$ и $36,9 \pm 10,5\%$ соответственно. В составе эфирного масла также выделяются по содержанию гермакрен D и кариофиллен. Сравнительный анализ состава эфирного масла трех сортов показал, что содержание этих компонентов в масле сорта 'Васюринский' значительно ниже, чем у сортов 'Миллениум' и 'Эней': хамазулена – в 10 и 12 раз, кариофиллена и гермакрена D – в 2,5 и 3,1 раза соответственно.

Заключение

Экологическое испытание крымских сортов тысячелистника 'Эней' и 'Миллениум' (селекции НИИСХ Крыма) в сравнении с сортом 'Васюринский' (селекции ВИЛАР) показало возможность эффективного их возделывания в условиях Подмоскovie (Центральный регион Нечерноземной зоны РФ).

Не выявлено существенных различий в устойчивости растений к условиям зимнего сезона и в фенологии сортов. Растения всех сортов в течение вегетационного периода, продолжительностью от 129 до 140 дней, прошли все стадии развития. Начало вегетации и наступление основных фаз развития у крымских сортов наблюдались на 14–25 дней позже, а цветение продолжалось на 15–25 дней дольше, чем у сорта 'Васюринский'. Продуктивность надземной массы формировалась у сортов 'Эней' и 'Миллениум' за счет увеличения числа побегов без изменения их массы, у сорта 'Васюринский' – за счет высоты, числа, массы и облиственности побегов. По урожайности сырья сорт 'Васюринский' значительно пре-

восходит сорта 'Миллениум' и 'Эней' – в среднем соответственно в 1,8 и 2,2 раза. Содержание эфирного масла в сырье сорта 'Васюринский' в среднем в 2,2–3,5 ниже, чем у сортов 'Миллениум' и 'Эней'. Эфирное масло этого сорта по содержанию основных компонентов (хамазулен, гермакрен D, кариофиллен) существенно уступает таковому крымских сортов. Так, хамазулена в эфирных маслах крымских сортов в 10–12 раз, кариофиллена и гермакрена D – в 2,5–3,1 раза больше, чем в эфирном масле сорта 'Васюринский'.

Таким образом, на основании полученных данных можно рекомендовать все изученные сорта тысячелистника обыкновенного для промышленного возделывания в Центральном регионе Нечерноземной зоны РФ. При этом для получения лекарственного сырья более эффективно использовать сорт 'Васюринский', характеризующийся высокой урожайностью, а для получения эфирного масла – сорта 'Эней' и 'Миллениум'.

References / Литература

- Agroclimatic guide to Moscow Province (Agroklimaticheskij spravochnik po Moskovskoy oblasti). Moscow: Moskovskij Rabochij; 1967. [in Russian] (Агроклиматический справочник по Московской области. Москва: Московский рабочий; 1967).
- Alyakin A.A., Efremov A.A., Kachin S.V., Strukova E.G. Dynamics of isolation and component composition of common yarrow essential oil in the suburban area of Krasnoyarsk (Dinamika vydeleniya i komponentny sostav efirnogo masla tysyachelistnika obyknovennogo prigoroda Krasnoyarska). *Chemistry of Plant Raw Material*. 2009;(4):73-78. [in Russian] (Алякин А.А., Ефремов А.А., Качин С.В., Струкова Е.Г. Динамика выделения и компонентный

- состав эфирного масла тысячелистника обыкновенного пригорода Красноярска. *Химия растительного сырья*. 2009;(4):73-78).
- Airinshteyn A.I. (ed.). Breeding of essential oil crops: (guidelines) (Seleksiya efiromaslichnykh kultur: [metodicheskiye ukazaniya]). Simferopol; 1977. [in Russian] (Селекция эфиромасличных культур: (методические указания) / под ред. А.И. Аринштейн. Симферополь; 1977).
- Chusovitina K.A., Karpukhin M.Yu. Pharmacological features of yarrow (*Achillea millefolium* L.) (Farmakologicheskiye osobennosti tysyachelistnika obyknovennogo [*Achillea millefolium* L.]). *Agrarian Education and Science*. 2019;(4):31-35. [in Russian] (Чусовитина К.А., Карпукhin М.Ю. Фармакологические особенности тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium* L.). *Аграрное образование и наука*. 2019;(4):31-35).
- Danileiko I.R., Apykhtin N.N., Plemenkov V.V. The maintenance of guaiazulene in the essence of common yarrow growing on different soils. *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University*. 2012;(7)7:33-37. [in Russian] (Данилейко И.Р., Апыкhtин Н.Н., Племенков В.В. Содержание хамазулена в эфирном масле тысячелистника обыкновенного, произрастающего на различных почвах. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта*. 2012;(7):33-37).
- 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: Kniga po trebovaniyu; 2012. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. Москва: Книга по требованию; 2012).
- Dyakova N.A. Peculiarities of accumulation of heavy metals and arsenic in medicinal plant raw materials of plain thousand, collected in urban and agrobiocenoses of the Voronezh region. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2020;28(3):213-224. [in Russian] (Дьякова Н.А. Особенности накопления тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье тысячелистника обыкновенного, собранного в урбо- и агробиоценозах Воронежской области. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2020;28(3):213-224). DOI: 10.22363/2313-2310-2020-28-3-213-224
- Efremov A.A., Zyкова I.D. Antiradical activity of extractives from the *Achillea millefolium* L. of the Siberian region. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2021;(2):129-135. [in Russian] (Ефремов А.А., Зыкова И.Д. Антирадикальная активность экстрактивных веществ тысячелистника Сибирского региона. *Химия растительного сырья*. 2021;(2):129-135). DOI: 10.14258/jcprp.2021028888
- FS.2.5.0101.18. Common yarrow herb. In: *State Pharmacopoeia of the Russian Federation (Gosudarstvennaya farmakopeya Rossiyskoy Federatsii)*. XIV ed. Moscow: 2018. [in Russian] (ФС.2.5.0101.18. Тысячелистника обыкновенного трава. В кн.: *Государственная фармакопея Российской Федерации*. XIV изд. 2018). URL: <https://zdravmedinform.ru/farmakopeia/fs.2.5.0101.18.html> [дата обращения 14.04.2022].
- GOST 31791-2017. Interstate standard. Essential oils and floral-herbaceous aromatic raw materials. Specifications. Moscow: Standartinform; 2018. [in Russian] (ГОСТ 31791-2017. Эфирные масла и цветочно-травянистое эфиромасличное сырье. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2018). URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293740/4293740246.pdf> [дата обращения: 14.05.2022].
- Karpacheva A.N. (ed.). Biochemical methods in the analysis of essential oil plants and essential oils: (Collection of scientific papers) (Biokhimicheskiye metody analiza efiromaslichnykh rasteniy i efirnykh masel: [Sbornik nauchnykh trudov]). Simferopol; 1972. [in Russian] (Биохимические методы анализа эфиромасличных растений и эфирных масел: (Сборник науч. трудов) / под ред. А.Н. Карпачевой. Симферополь; 1972).
- Nevkrytaya N., Novikov I., Soboleva E., Kashirina N., Radchenko L. Manifestation features of the productivity potential of *Salvia officinalis* L. in the condition of the Crimea foothills. *E3S Web of Conferences*. 2021;254:01006. DOI: 10.1051/e3sconf/202125401006
- Nevkrytaya N.V., Ametova E.D., Novikov I.A., Grunina E.N., Korotkikh I.N., Anikina A.Yu. Comparative ecological studies of two *Melissa officinalis* L. varieties. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2022;1(29):90-102. [in Russian] (Невкрытая Н.В., Аметова Э.Д., Новиков И.А., Грунина Е.Н., Коротких И.Н., Аникина А.Ю. Сравнительное экологическое испытание двух сортов Melissa лекарственной. *Таврический вестник аграрной науки*. 2022;1(29):90-102.).
- Nevkrytaya N.V., Pashtetskiy V.S., Novikov I.A., Korotkikh I.N., Tkhananov R.R. Variability of component composition of *Melissa officinalis* L. essential oil depending on the climatic conditions of the region of cultivation. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2020;(1):257-263. [in Russian] (Невкрытая Н.В., Паштецкий В.С., Новиков И.А., Коротких И.Н., Тхананов Р.Р. Изменчивость компонентного состава эфирного масла *Melissa officinalis* L. в зависимости от особенностей климатических условий региона возделывания. *Химия растительного сырья*. 2020;(1):257-263). DOI: 10.14258/jcprp.2020016397
- Pashtetskiy V.S., Timasheva L.A., Pekhova O.A., Danilova I.L., Serebryakova O.A. Essential oils and their quality (Efirnye masla i ikh kachestvo). Simferopol: Arial; 2021. [in Russian] (Паштецкий В.С., Тимашева Л.А., Пехова О.А., Данилова И.Л., Серебрякова О.А. Эфирные масла и их качество. Симферополь: Ариал; 2021). DOI: 10.33952/2542-0720-978-5-907506-16-9
- Rabotyagov V.D., Paliy A.E., Kurdyukova O.N. Essential oils of aromatic plants: monograph (Efirnye masla aromatischeeskikh rasteniy: monografiya). Simferopol: Arial; 2017. [in Russian] (Работягов В.Д., Палий А.Е., Курдюкова О.Н. Эфирные масла ароматических растений: монография. Симферополь: Ариал; 2017).
- Sidelnikov N.I. (ed.). Atlas of medicinal plants in Russia (Atlas lekarstvennykh rasteniy Rossii). 2nd ed. Moscow: Nauka; 2021. [in Russian] (Атлас лекарственных растений России. 2-е изд. / под ред. Н.И. Сидельникова. Москва: Наука; 2021).
- Solovyeva N.A., Khizhnyak S.D., Pakhomov P.M. The research of the quality composition and antioxidant activity of yarrow phenolic compounds under conditions of Tver's industrial pollution. *Herald of Tver State University. Series: Chemistry*. 2015;(4):102-111. [in Russian] (Соловьева Н.А., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Исследование качественного состава и антиоксидантной активности фенольных соединений тысячелистника обыкновенного в условиях промышленного загрязнения города Твери. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. 2015;(4):102-111).
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1. "Plant varieties" (official publica-

- tion). Moscow; Rosinformagrotekh; 2021. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2021). URL: <https://gossortrf.ru/wp-content/uploads/2021/04/Итоговый-реестр-2021.pdf> [дата обращения: 15.05.2022].
- Vardanyan L.R., Atabekyan L.V., Hayrapetyan S.A., Vardanyan R.L. Antioxidant activity of the ethyl acetate extract of different types of the thousand (*Achillea* L.). *Chemistry of Plant Raw Material*. 2018;(3):61-68. [in Russian] (Варданян Л.Р., Атабекян Л.В., Айрапетян С.А., Варданян Р.Л. Антиоксидантная активность этилацетатного экстракта разных видов тысячелистника (*Achillea* L.). *Химия растительного сырья*. 2018;(3):61-68). DOI: 10.14258/jcprm.2018033697
- Voitkevich S.A. Essential oils for perfumery and aromatherapy (Efirnye masla dlya parfumerii i aromaterapii). Moscow: Food Industry; 1999. [in Russian] (Войткевич С.А. Эфирные масла для парфюмерии и ароматерапии. Москва: Пищевая промышленность; 1999).
- Zolotilova O.M., Nevkrytaya N.V., Korotkikh I.N., Anikina A.Yu. Comparative assessment of *Foeniculum vulgare* variety 'Oksamyt Kryma' in different ecological zones. In: V.S. Pash-tetskiy (ed.). *Current State, Problems and Development Prospects of Agricultural Science. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference (Sovremennoye sostoyaniye, problemy i perspektivy razvitiya agrarnoy nauki. Materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii)*. Simferopol; 2020a. p.125-127. [in Russian] (Золотилова О.М., Невкрытая Н.В., Коротких И.Н., Аникина А.Ю. Сравнительное испытание фенхеля обыкновенного сорта Оксамит Крыма в разных экологических зонах. В кн.: *Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки. Материалы V международной научно-практической конференции* / под ред. В.С. Паштецкого. Симферополь; 2020а. С.125-127). DOI: 10.33952/2542-0720-20205-9-10-61
- Zolotilova O.M., Nevkrytaya N.V., Zolotilov V.A., Korotkikh I.N., Anikina A.Yu. Environmental testing of *Anisum vulgare* variety 'Artek' in different regions of the Russian Federation. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2020b;2(22):57-65. [in Russian] (Золотилова О.М., Невкрытая Н.В., Золотилев В.А., Коротких И.Н., Аникина А.Ю. Экологическое испытание аниса обыкновенного сорта Артек в разных регионах России. *Таврический вестник аграрной науки*. 2020b;2(22):57-65). DOI: 10.33952/2542-0720-2020-2-22-57-65

Сведения об авторах

Ирина Николаевна Коротких, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений, 117216 Россия, Москва, ул. Грина, 7, slavnica241270@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0954-9353>

Наталья Владимировна Невкрытая, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, 295043 Россия, Республика Крым, Симферополь, ул. Киевская, 150, nevkritaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1783-2199>

Татьяна Витальевна Платонова, научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, 295043 Россия, Республика Крым, Симферополь, ул. Киевская, 150, tatplat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7241-1146>

Information about the authors

Irina N. Korotkikh, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, 7 Grina St., Moscow 117216, Russia, slavnica241270@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0954-9353>

Natalia V. Nevkrytaya, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Research Institute of Agriculture of Crimea, 150 Kievskaya St., Simferopol 295493, Russia, nevkritaya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1783-2199>

Tatyana V. Platonova, Researcher, Research Institute of Agriculture of Crimea, 150 Kievskaya St., Simferopol 295493, Russia, tatplat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7241-1146>

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 10.06.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 10.06.2022; approved after reviewing on 25.07.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 631.52: 634.11: 575.22
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-135-145



Маркер-опосредованный отбор в создании селекционных образцов и комплексных доноров яблони с устойчивостью к парше и повышенным потенциалом лежкоспособности плодов

И. И. Супрун, Е. А. Егоров, А. И. Насонов, Е. В. Лободина, С. В. Токмаков, И. В. Степанов

Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Краснодар, Россия

Автор, ответственный за переписку: Иван Иванович Супрун, supruni@mail.ru

Актуальность. Возделывание сортов яблони, обладающих устойчивостью к парше и высоким уровнем лежкости плодов при хранении, повышает экономическую эффективность и экологичность садоводства. Очевидно, что создание таких сортов является актуальной задачей.

Материал и методы. Материалом для исследований послужили 646 гибридных растений, полученных в шести гибридных комбинациях: Ренет Симиренко/Моди, Ренет Симиренко/Смеральда, Ренет Симиренко/Ренуар, Ренет Симиренко/Фуджион, Ренуар/Гренни Смит и Моди/Гренни Смит. Фенотипическую оценку устойчивости к парше проводили на естественном инфекционном фоне в течение двух лет с использованием количественной шкалы. Для идентификации гена *Rvi6* проводили ПЦР-анализ с праймерной парой VfC1+VfC2, для гена *Md-ACS1* использовали известный SCAR-ДНК-маркер. Критерий хи-квадрат использовали для статистической оценки достоверности данных.

Результаты. На основании ДНК-маркерного анализа идентифицировали 328 растений, несущих доминантный аллель гена *Rvi6*. Молекулярно-генетический анализ по гену *Md-ACS1* позволил выявить 190, 322 и 126 растений, несущих аллельные варианты *Md-ACS1-2/2*, *Md-ACS1-1/2* и *Md-ACS1-1/1* соответственно. Среди образцов с доминантным аллелем гена устойчивости к парше *Rvi6* идентифицировали 92 образца, обладающих селекционно приоритетным аллелем в гомозиготе (*Md-ACS1-2/2*), и 143 образца, являющихся гетерозиготными (*Md-ACS1-1/2*), которые также представляют ценность для селекции.

Заключение. В результате выполнения работы был получен широкий перечень образцов яблони, несущих селекционно ценные аллели гена устойчивости к парше *Rvi6* и гена *Md-ACS1*. Наличие гибридных форм, несущих приоритетные аллели одновременно двух генов хозяйственно важных признаков, позволит усилить селекционную работу по созданию устойчивых к парше сортов яблони с повышенной лежкоспособностью плодов. Образцы с наилучшими сочетаниями аллелей целевых генов, наряду с использованием в селекционном процессе, представляют также ценность как комплексные доноры.

Ключевые слова: генофонд, селекция, *Rvi6*, *Md-ACS1*, ДНК-маркеры

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России «Национальная сетевая коллекция генетических ресурсов растений для эффективного научно-технологического развития РФ в сфере генетических технологий» по соглашению № 075-15-2021-1050 от 28.09.2021 г.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Супрун И.И., Егоров Е.А., Насонов А.И., Лободина Е.В., Токмаков С.В., Степанов И.В. Маркер-опосредованный отбор в создании селекционных образцов и комплексных доноров яблони с устойчивостью к парше и повышенным потенциалом лежкоспособности плодов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023; 184(3):135-145. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-135-145

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-135-145

Marker-assisted selection in the development of advanced apple-tree forms and donors combining scab resistance with increased fruit storability

Ivan I. Suprun, Evgeniy A. Egorov, Andrey I. Nasonov, Elena V. Lobodina, Sergey V. Tokmakov, Ilya V. Stepanov

*North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Krasnodar, Russia***Corresponding author:** Ivan I. Suprun, supruni@mail.ru

Background. Cultivation of scab-resistant apple cultivars with better fruit storability increases the economic efficiency and environmental friendliness of horticulture. Hence, the development of such cultivars is an important task in modern apple-tree breeding.

Materials and methods. A set of 646 hybrid plants obtained in six cross combinations (Renet Simirenko/Modi, Renet Simirenko/Smeralda, Renet Simirenko/Renoir, Renet Simirenko/Fujion, Renoir/Granny Smith, and Modi/Granny Smith) was studied. Their scab resistance was assessed under natural infection pressure for two years using a quantitative scale. The *Rvi6* gene was identified using the PCR analysis with the primer pair VFC1+VfC. The *Md-ACS1* gene alleles were detected with a known SCAR DNA marker. The chi-square test was applied for statistical confirmation of the data.

Results. Based on the DNA marker analysis, 328 plants carrying the dominant allele of the *Rvi6* gene were identified. The results of the phenotypic resistance assessment confirmed the correspondence of the resistant phenotype / dominant allele of the gene for most plants. Molecular genetics analysis of the *Md-ACS1* gene disclosed its allelic combinations. A total of 190, 322, and 126 plants carrying allelic variants of *Md-ACS1-2/2*, *Md-ACS1-1/2*, and *Md-ACS1-1/1*, respectively, were identified. Among the plants with the dominant allele of the scab resistance *Rvi6* gene, 92 plant forms were identified with *Md-ACS1-2/2*, and 143 heterozygous ones (*Md-ACS1-1/2*), also valuable for breeders.

Conclusion. A wide range of apple breeding forms carrying valuable alleles of the *Rvi6* and *Md-ACS1* genes were selected. Hybrid forms with target alleles of both genes responsible for important agronomic traits would contribute to the intensification of breeding efforts aimed at producing scab-resistant apple cultivars with increased fruit storability. They can also be used for breeding purposes as complex donors.

Keywords: gene pool, breeding, *Rvi6*, *Md-ACS1*, DNA markers

Acknowledgements: this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2021-1050 dated September 28, 2021, entitled "National network collection of plant genetic resources for effective scientific and technical development of the Russian Federation in the sphere of genetic technologies". The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Suprun I.I., Egorov E.A., Nasonov A.I., Lobodina E.V., Tokmakov S.V., Stepanov I.V. Marker-assisted selection in the development of advanced apple-tree forms and donors combining scab resistance with increased fruit storability. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):135-145. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-135-145

Введение

Яблоки являются одними из самых потребляемых фруктов во всем мире; их производство постоянно увеличивается. Россия входит в топ-десять стран – производителей плодов яблони с показателем производства около 2 млн тонн в 2020 г. (<http://faostat.fao.org/>). Интенсификация производства плодов яблони и важность вопроса экологизации садоводства актуализирует создание устойчивых к патогенам сортов, в то время как растущая мировая конкуренция в данной отрасли обуславливает высокий уровень важности признаков качества плодов.

Важным направлением в селекции на устойчивость к патогенам при этом является создание сортов, устойчивых к парше – наиболее значимому микозу этой садовой культуры, вызываемому аскомицетом *Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter (Sedov et al., 2020). Заболевание является причиной существенного ухудшения качества плодов и снижения продуктивности садового агроценоза (Yakuba, 2013).

Наиболее востребованными стратегиями в снижении развития данного заболевания являются контроль с применением химических средств и использование устойчивых сортов яблони в промышленном садоводстве, что позволяет повысить экологичность производства.

Ген устойчивости *Rvi6*, впервые выявленный у образца *Malus floribunda* 821, обеспечивает устойчивость к широкому спектру рас возбудителя парши и является одним из наиболее востребованных при создании устойчивых сортов, обеспечивая устойчивость для рас с первой по пятую (Pikunova, Sedov, 2019). Для данного гена выполнено картирование на геноме яблони и установлен ряд ДНК-маркеров, с ним косегрегирующих (Afuniyan et al., 2004). Селекционные программы и работы по фенотипической оценке устойчивости и молекулярно-генетическому скринингу генофонда на наличие генетических детерминант устойчивости к парше, включая ген *Rvi-6*, выполняются во многих странах с развитой культурой возделывания яблони, в том числе и в России (Sedov et al., 2020; Ulyanovskaya et al., 2019; Lyzhin, Savel'eva, 2021; Papp et al., 2020; Höfer et al., 2021).

Наряду с устойчивостью к парше, важное место в селекции яблони занимают признаки качества плодов. Комплекс показателей качества плодов включает группы таких характеристик, как внешний вид, вкус плодов, структура мякоти, биохимический состав, лежкоспособность и транспортабельность. Условно показатели качества могут быть разделены на потребительские и технологические характеристики. Одним из наиболее важных признаков, влияющим одновременно как на потребительские, так и технологические качества, является лежкоспособность плодов, которая в значительной степени обеспечивается сохранением плотности мякоти плода на высоком уровне при длительном хранении. Следует отметить, что плотность мякоти плодов яблони и ее сохранение на высоком уровне – это сложный полигенный признак, обусловленный влиянием нескольких биохимических процессов в клетках плода (Ji, Wang, 2021; Longhi et al., 2013; Costa et al., 2008).

Одним из наиболее важных факторов, влияющих на сохранность плотности мякоти плода при хранении, является уровень синтеза эндогенного этилена в плодах. Плоды с низким уровнем синтеза способны к длительному хранению без снижения плотности и разрыхления мякоти (Tokmakov et al., 2015).

Известно, что одним из ключевых генов, контролирующих эндогенный синтез этилена в плодах яблони, является ген аминокцил-циклопропан-синтазы – *Md-ACS1*. Сорта, гомозиготные по аллелю 2 данного гена (*Md-ACS1-2/2*), имеют плоды со сниженным уровнем синтеза этилена при хранении и, соответственно, повышенную лежкоспособность. Данный аллельный вариант является наиболее селекционно ценным. При этом аллельная комбинация *Md-ACS1-1/1* обуславливает, как правило, высокий уровень синтеза этилена, в то время как аллельная комбинация *Md-ACS1-1/2* – средний (Harada et al., 2000; Costa et al., 2005). Анализ нуклеотидных последовательностей аллелей гена *Md-ACS1* позволил выявить вставку ретротранспозона (около 160 пар нуклеотидов (пн) в последовательности *Md-ACS1-2* (Nybom et al., 2013). На основании данного сайта инсерции ретротранспозона был разработан ДНК-маркер, позволяющий проводить молекулярно-генетическую идентификацию аллелей: 655 пн для аллеля *Md-ACS1-2* и 489 пн для *Md-ACS1-1* (Harada et al., 2000). С применением ДНК-маркерного анализа выполнен широкий перечень работ по молекулярно-генетической идентификации аллелей данного гена в мировом генофонде яблони (Zhu, Barritt, 2008; Nybom et al., 2013).

Наряду с геном *Md-ACS1*, установлен вклад в генетический контроль признака плотности мякоти и изменения ее структуры при хранении для таких генов, как *Md-ACO1* (Zhu, Barritt, 2008), *Md-Exp7* (Costa et al., 2008), *Md-PG1* (Longhi et al., 2013), *Md-ACS3a* (Bai et al., 2012), и выполнен широкий перечень исследований, направленных на валидацию и анализ степени их вклада в фенотипическое проявление признака, а также генов *MdERF3* и *MdERF118* (Wu et al., 2021), выявленных в результате исследования генетического контроля сохранения плотности мякоти с использованием гибридной популяции, полученной от межвидового скрещивания (*Malus domestica* × *M. asiatica*), однако для них на сегодняшний день отсутствуют данные о взаимосвязи генотип / фенотип, полученные на широкой выборке образцов яблони домашней. При этом в ряде работ, направленных на оценку вклада гена *Md-ACS1*, установлено значимое влияние данного гена на формирование фенотипического проявления признака. Так, в работе по сравнительной оценке степени влияния генов *Md-ACS1* и *Md-ACS3a* на уровень синтеза этилена и степень лежкости плодов был выявлен более высокий уровень влияния гена *Md-ACS1* (Dougherty et al., 2016). В исследованиях по разработке SNP-чипа для MAS-селекции и его валидации наибольшая связь с фенотипическим проявлением целевого признака была установлена для SNP-маркеров генов *Md-PG1* и *Md-ACS1* (Chagné et al., 2019).

Стоит отметить, что в российской генплазме яблони селекционно ценный аллель *Md-ACS1-2* в гомозиготном состоянии встречается очень редко. При этом его комбинация с геном *Rvi-6* не выявлена (Shamshin et al., 2020; Suprun, Tokmakov, 2013).

Одним из важных факторов эффективного решения селекционных задач является наличие генетических ресурсов, позволяющих получить селекционный материал с заданными свойствами. Поэтому вопрос мобилизации генофонда, его всесторонней оценки и создания комплексных доноров целевых генов хозяйственно ценных признаков в связи с этим является актуальным и одним из приоритетных в генетических исследованиях растений. Наличие образцов, несущих целевые аллели генов «интереса», необходимо для решения селекционных за-

дач. Наглядным может быть пример с геном *Rvi-6*. Обнаружение данного гена, его интрогрессия в культурную генплазму из вида *Malus floribunda* Siebold ex Van Houtte (King et al., 1999) и создание устойчивых к парше форм на основе культурных сортов позволили в последующем создать широкий перечень устойчивых сортов нового поколения в разных регионах возделывания яблони в мире (Sedov et al., 2020; Ulyanovskaya et al., 2019; Papp et al., 2020; Höfer et al., 2021). Несмотря на то что устойчивость данного гена была преодолена, данный ген широко задействован в селекции в настоящее время, так как обеспечивает устойчивость к большинству известных рас патогена при том, что в случае поражения паршой сорта, несущие данный ген, проявляют балл поражения не более 1-2. Расы *Venturia inaequalis*, преодолевающие устойчивость, детерминируемую данным геном, не распространены повсеместно в мире. При этом на территории России нет прецедентов преодоления устойчивости, детерминируемой данным геном (Pikunova, Sedov, 2019; Sedov et al., 2020; Ulyanovskaya et al., 2019).

В России интродукция образца «Сеянец 814» (*M. floribunda* 821 × Голден Делишес), являющегося донором гена *Rvi-6*, позволила начать выполнение крупномасштабной селекционной программы по созданию иммунных к парше сортов яблони под общим руководством академика РАН Е. Н. Седова (Sedov, Zhdanov, 1983). Был создан ряд устойчивых сортов, которые как послужили донорами гена для создания сортов нового поколения в различных профильных научных организациях РФ, так и были напрямую использованы в производстве (Sedov et al., 2020; Ulyanovskaya et al., 2019).

Очевидно, что создание генотипов, несущих селекционно ценные аллели одновременно нескольких генов, детерминирующих хозяйственно ценные признаки, обладает наиболее высоким уровнем актуальности и значимости, так как позволяет сформировать генофонд, являющийся основой для ускорения селекции и получения сортов нового поколения, конкурентных на мировом уровне. В связи с этим нами была поставлена задача создания селекционных образцов яблони, несущих приоритетные аллели гена устойчивости яблони к парше *Rvi6* и гена *Md-ACS-1*, контролирующего синтез энодгенного этилена в плодах, на основе востребованных в производстве сортов, имеющих длительную историю культивирования в Северо-Кавказском регионе – регионе с наибольшим уровнем развития садоводства в России.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в 2017–2021 гг. на вегетационной площадке и в селекционно-биотехнологической лаборатории Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ). Объектом являлись шесть гибридных популяций, полученных в результате скрещивания сортов позднего срока созревания, имеющих длительную историю культивирования в регионе и востребованных в садоводстве региона – ‘Ренет Симиренко’ (*rvi-6rvi-6*, *Md-ACS-1/2*) и ‘Гренни Смит’ (*rvi-6rvi-6*, *Md-ACS-1/2*), но восприимчивых к парше, и сортов нового поколения итальянской селекции, несущих ген *Rvi6* (*Vf*): ‘Моди’ (*Md-ACS-1/2*), ‘Ренуар’ (*Md-ACS-1/2*), ‘Смеральда’ (*Md-ACS-2/2*), ‘Фуджион’ (*Md-ACS-2/2*), обладающих потребительской привлекательностью и высоким качеством плодов: Ренет Симиренко/Моди (2016-1), Ренет Симиренко/Смеральда (2016-2), Ренет Симиренко/Ренуар (2016-3), Ре-

нет Симиренко/Фуджион (2016-4), Ренуар/Гренни Смит (2016-5), Моди/Гренни Смит (2016-6).

Фитопатологическое тестирование сеянцев проводили в условиях естественного инфекционного фона возбудителя парши яблони на вегетационной площадке СКФНЦСВВ в 2018–2019 гг. Источник фона – насаждение высоковосприимчивого сорта ‘Айдаред’, в котором не проводились санитарные мероприятия.

На формирование инфекционного фона оказали влияние погодно-климатические особенности года. Метеоусловия 2018 г. характеризовались повышенными относительно климатической нормы среднемесячными значениями температуры и сниженными показателями увлажнения и количества осадков, что привело к замедлению накопления вторичной инфекции и, как следствие, депрессивному развитию парши. В 2019 г. наблюдалось эпифитотийное развитие болезни. Относительно невысокая температура мая в совокупности с количеством осадков, превышающим на 30% норму, способствовали первичному заражению яблони и интенсивному развитию патогена.

Оценку пораженности гибридных сеянцев *V. inaequalis* проводили в начале июля с использованием количественной шкалы. Она предполагала 6 градаций развития симптомов болезни от 0 до 5, различающихся долей покрытия поражениями парши листовой пластинки (Sedov, Zhdanov, 1983).

Препараты ДНК получали из свежих верхушечных молодых листьев сеянцев с использованием метода СТАВ (Murray, Thompson, 1980).

Для молекулярно-генетической идентификации гена *Md-ACS1* использовали SCAR-ДНК-маркер (Harada et al., 2000). ПЦР проводили по следующей программе: 2 мин при 94°C; следующие 35 циклов: 45 с при 94°C, 45 с при 58°C, 2 мин синтез при 72°C; финальный цикл синтеза 5 мин при 72°C. Для проведения идентификации гена устойчивости к парше *Rvi6* использовали молекулярный маркер *VfC1+VfC2* (Afunian et al., 2004). ПЦР проводили по следующей программе: денатурация 3 мин при 94°C; далее 35 циклов: 10 с при 94°C – денатурация, 45 с при 60°C – отжиг праймеров, 45 с при 72°C – элонгация; завершающий цикл элонгации – 5 мин при 72°C.

При этом использовали следующие концентрации компонентов реакционной смеси (идентичные для ДНК-маркеров целевых генов): 0,05 мМ дезоксирибонуклеотидтрифосфатов, 0,3 мкМ каждого праймера, 2,5 мкл ПЦР-буфера (600 мМ Tris-HCl (pH 8.5 при 25°C); 15 мМ MgCl₂; 250 мМ KCl; 100 мМ 2-меркаптоэтанол; 1% Тритон X-100) и 1 ед. Taq ДНК-полимеразы (ООО «СибЭнзим», кат. № E331), 50 нг ДНК. ПЦР проводили в общем объеме 25 мкл.

Для анализа размеров продуктов ПЦР использовали электрофорез в 2-процентном агарозном геле на основе 0,5-кратного трис-боратного буфера с последующей визуализацией в ультрафиолете после окрашивания гелевых пластин в 1-процентном растворе бромистого этидия.

Анализ достоверности соотношения растений с разным типом реакции устойчивости к парше, а также с различными аллельными вариантами целевых генов, проводили согласно общепринятым методам расчета (Lobashev, 1969).

Результаты исследований

Оценка устойчивости гибридных сеянцев к парше на естественном инфекционном фоне позволила нам разде-

лить экспериментальную выборку гибридных растений на устойчивые и восприимчивые (табл. 1).

Как видно из таблицы 1, наблюдалось варьирование числа устойчивых и восприимчивых образцов в разные годы. Суммарно в 2018 г. было идентифицировано 371 устойчивое растение и 357 растений в 2019 г. Одна из основных причин такого варьирования могла заключаться в более оптимальных погодных условиях для развития инфекции в 2019 г. Это согласуется с тем фактом, что количество пораженных на 3–5 баллов сеянцев в 2019 г. было в 1,4 раза больше, чем в 2018 г. Для большинства гибридных популяций было выявлено соотношение устойчивых и восприимчивых растений, соответствующее ожидаемому 1 : 1, характерному для моногенного наследования признака, за исключением гибридной популяции 2016-6. В данной комбинации скрещивания (Моди/Гренни Смит) по результатам фитопатологического тестирования в 2018 и в 2019 г. наблюдалось смещение соотношения устойчивых и восприимчивых растений в сторону увеличения устойчивых растений, которые составили около 68% от общего количества в данной гибридной комбинации.

На следующем этапе работы для всех экспериментальных растений, независимо от фенотипического проявления устойчивости, провели молекулярно-генетическую идентификацию гена *Rvi6*. Это позволило сопоставить данные о фенотипе устойчивости и наличии доминантного аллеля гена, определяющего устойчивость

к патогену, для подтверждения эффективности фитопатологической оценки в условиях естественного инфекционного фона, проведенной в ходе работы и последующего формирования оптимального алгоритма MAS – отбора по устойчивости к парше. На рисунке 1 приведен пример ДНК-маркерной идентификации целевого аллеля гена *Rvi6*.

Образцы 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 13 и 16 имеют продукт ПЦР с размером 286 пн, который отмечен стрелкой у сорта-контроля ('Флорина'). Он соответствует наличию доминантного аллеля. Суммарно при анализе растений, входящих в шесть изученных гибридных популяций, было выявлено 328 растений, несущих доминантный аллель искомого гена, и 295 растений с рецессивным аллелем (табл. 2).

Соотношение растений с доминантным и рецессивным аллелем варьировало, но для всех гибридных комбинаций, за исключением 2016-6, соответствовало распределению 1 : 1, которое характерно для моногенного наследования устойчивости и гетерозиготности локуса у сортов-доноров гена. Подтвержденное при молекулярно-генетической идентификации нарушение соотношения 1 : 1 в гибридной популяции 2016-6 показывает, что это отклонение обусловлено не недостаточностью силы инфекционного фона, а иными причинами.

С учетом того факта, что селекционно ценный аллель *Md-ACS1-2* в гомозиготном состоянии достаточно редко распространен в российской генплазме яблони, молеку-

Таблица 1. Фенотипическая реакция гибридных растений на естественный инфекционный фон парши яблони в 2018 и 2019 г.

Table 1. Phenotypic response of apple-tree hybrid plants to natural scab infection pressure in 2018 and 2019

Семья / Cross combination	Устойчивые / Resistant		Восприимчивые / Susceptible		χ^2 (1 : 1)*	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019
2016-1	116	110	92	98	2,77	0,69
2016-2	65	63	58	60	0,40	0,07
2016-3	52	50	50	52	0,04	0,04
2016-4	24	23	22	23	0,09	0,00
2016-5	13	11	7	9	1,80	0,20
2016-6	101	100	46	47	20,58**	18,52**
Всего	371	357	275	289		

Примечание: * χ^2 крит. = 3,8 (0,05, 1); ** χ^2 факт. $\geq \chi^2$ крит.

Notes: * χ^2 crit. = 3.8 (0.05, 1); ** χ^2 fact. $\geq \chi^2$ crit.

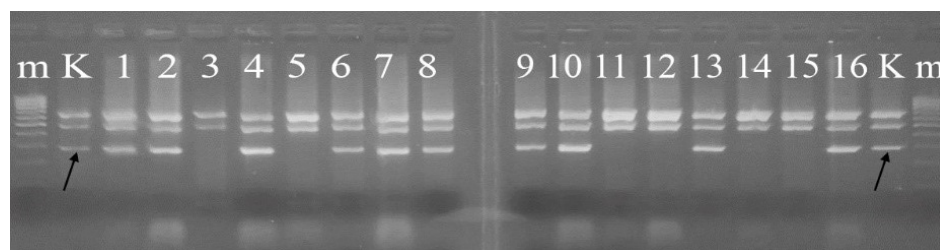


Рис. 1. Электрофоретическое разделение продуктов ПЦР с ДНК-маркером гена *Rvi6* (гибридные образцы, полученные в комбинации скрещиваний 2016-6): m – маркер молекулярной массы ДНК; K – сорт-контроль 'Флорина' (*Rvi6+*); 1–16 – гибридные образцы

Fig. 1. Results of PCR-assisted identification of the *Rvi6* gene (hybrid forms obtained in the 2016-6 cross combination): m – DNA molecular weight marker; K – cv. 'Florina' (control) (*Rvi6+*); 1–16 – hybrid forms

Таблица 2. Молекулярно-генетическая идентификация гена *Rvi6*Table 2. Molecular genetic identification of the *Rvi6* gene

Семья / Cross combination	<i>Rvi6rvi6</i>	<i>rvi6rvi6</i>	Нет данных*** / No data***	$\chi^2 (1 : 1)^*$
2016-1	105	103	0	0,02
2016-2	60	57	6	0,03
2016-3	41	53	8	1,53
2016-4	22	24	0	0,09
2016-5	13	7	0	1,80
2016-6	87	51	9	8,81**
Всего	328	295	23	

Примечание: * χ^2 крит. = 3,8 (0,05; 1); ** χ^2 факт. $\geq \chi^2$ крит.; *** ПЦР не была проведена

Note: * χ^2 crit. = 3.8 (0.05; 1); ** χ^2 fact. $\geq \chi^2$ crit.; ***PCR was not performed

лярно-генетическая идентификация аллелей гена *Md-ACS1* была выполнена для всех гибридных растений, независимо от наличия гена *Rvi6*. На представленной электрофореграмме (рис. 2) наличие двух фрагментов, соответствующее гетерозиготности локуса гена *Md-ACS1*, идентифицируется у наибольшего количества образцов (2, 4, 7, 8, 9–14 и 16). Селекционно ценный аллель 2 (ПЦР-

продукт 655 пн) в гомозиготном состоянии выявлен у образца № 5, а наименее приоритетный для селекции аллель 1 – у образцов № 1, 3, 6 и 15.

Суммарно в изученной выборке растений было выявлено 190 образцов, несущих аллель 2 в гомозиготе, 322 образца, гетерозиготных по локусу гена *Md-ACS1*, и 126 образцов, гомозиготных по аллелю 1 (табл. 3).

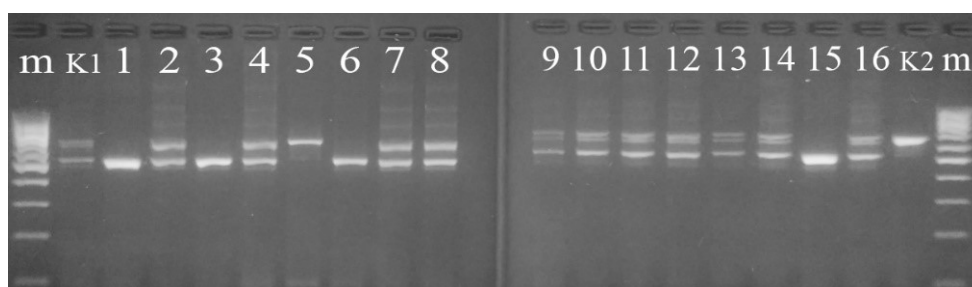


Рис. 2. Электрофоретическое разделение продуктов ПЦР с ДНК-маркером гена *Md-ACS1* (гибридные образцы, полученные в комбинации скрещиваний 2016- 3): m – маркер молекулярной массы ДНК; K1 – сорт-контроль ‘Ренет Симиренко’ (*Md-ACS1-1/2*), K2 – сорт-контроль ‘Фуджи’ (*Md-ACS1-2/2*); 1–16 – гибридные образцы

Fig. 2. Results of PCR-assisted identification of the *Md-ACS1* gene alleles (hybrid forms obtained in the 2016-3 cross combination): m – DNA molecular weight marker; K1 – cv. ‘Renet Simirenko’ (control) (*Md-ACS1-1/2*); K2 – cv. ‘Fuji’ (control) (*Md-ACS1-2/2*); 1–16 – hybrid forms

Таблица 3. Молекулярно-генетическая идентификация аллелей гена *Md-ACS1*Table 3. Molecular genetic identification of the *Md-ACS1* gene alleles

Семья / Cross combination	<i>Md-ACS1-2/2</i>	<i>Md-ACS1-1/2</i>	<i>Md-ACS1-1/1</i>	χ^{2*} (расщепление) / χ^{2*} (segregation)
2016-1	47	96	65	4,840 (1 : 2 : 1)
2016-2	61	62	0	0,008 (1 : 1)
2016-3	22	59	21	2,500 (1 : 2 : 1)
2016-4	22	24	0	0,087 (1 : 1)
2016-5	5	13	2	2,700 (1 : 2 : 1)
2016-6	34	72	41	0,730 (1 : 2 : 1)
Всего	191	326	129	

Примечание: * χ^2 крит. = 3,8 (0,05; 1); χ^2 крит. = 6,0 (0,05; 2)

Note: * χ^2 crit. = 3.8 (0.05; 1); χ^2 crit. = 6.0 (0.05; 2)

В гибридных семьях 2016-2 и 2016-4 образцы, несущие аллель 1 в гомозиготе, отсутствовали. В данных выборках растений было выявлено статистически достоверное соотношение 1 : 1 между группами образцов с аллелем 2 в гомозиготе и группой образцов, гетерозиготных по локусу *Md-ACS1*. В остальных гибридных семьях наблюдалось статистически достоверное распределение по типу 1 : 2 : 1.

Обсуждение результатов

Очевидно, что для отбора образцов яблони, устойчивых к парше, на основе фенотипической оценки необходимо успешное протекание процесса инфицирования растения-хозяина патогеном. Это может быть обеспечено наличием условий, оптимальных для развития заболевания, что приобретает особую актуальность при использовании естественного инфекционного фона (Sedov, Zhdanov, 1983, Gashchenko, Kozlovskaya, 2008) в связи с отсутствием возможности контроля влажностно-температурного режима. Отмеченные различия в количестве здоровых и инфицированных семян в разные годы оценки признака были обусловлены более благоприятными погодно-климатическими условиями для развития *V. inaequalis*, так как 2019 год в сравнении с предыдущим характеризовался более низкой температурой и большим количеством осадков, особенно в период начала развития инфекции.

Статистический анализ характера расщепления по фенотипу устойчивости к парше показал соответствие моногенному характеру наследования и гетерозиготность (*Rvi6rvi6*) по локусу целевого гена во всех гибридных популяциях, за исключением 2016-6 (Моди/Гренни Смит). По двум годам наблюдений выявлено повышенное количество устойчивых растений по отношению к восприимчивым (см. табл. 1). По результатам ДНК-маркерного анализа в выборке растений из данной гибридной комбинации также было выявлено отклонение от соотношения 1 : 1 количества растений в группах с идентифицированным доминантным аллелем и без такового (см. табл. 2). Нарушение стандартного соотношения 1 : 1 при анализе устойчивости, детерминируемой геном *Rvi6*, – в определенной степени распространенное явление и выявлялось ранее как отечественными (Sedov, Zhdanov, 1983), так и зарубежными исследователями (Gardiner et al., 2007). Так, по многолетним данным В. В. Жданова и Е. Н. Седова, снижение (до 32–45%) или повышение (до 54–66%) выхода устойчивых гибридных семян зависело от комбинации скрещиваний (Sedov, Zhdanov, 1983). Аналогичные данные приводятся в работе Т. А. Гашенко и З. А. Козловской, в исследованиях которых минимальный выход устойчивых семян составил 34%, а максимальный – 73%, в зависимости от гибридной комбинации (Gashchenko, Kozlovskaya, 2008). В качестве главной причины данного явления можно назвать наличие серии сублетальных генов *sl1*, *sl2*, *sl3*, из которых *sl1* и *sl2* сцеплены с геном *Rvi6*. При этом для экспрессии *sl1* необходимо наличие рецессивного аллеля *sl3* в гомозиготе. Данные гены определяют карликовость и значительное снижение силы роста семян в течение первых трех месяцев их развития после прорастания и в большем числе случаев последующую их гибель. Отмечено, что чаще всего действие данных генов обуславливает снижение выхода гибридных семян с геном *Rvi6*, но в некоторых гибридных комбинациях наблюдается увеличение числа устойчивых гибридов (Gao, van de Weg, 2006).

Сопоставление данных ДНК-маркерной идентификации и фенотипического проявления устойчивости позволило в большинстве случаев подтвердить наличие искомого гена у устойчивых растений и его отсутствие у восприимчивых. Ожидаемыми были два варианта сочетания характеристик: гетерозигота по гену устойчивости и реакция устойчивости при инфицировании патогеном, а также гомозигота по рецессивному аллелю гена *Rvi6* в сочетании с восприимчивой реакцией семян. Кроме этого, имели место варианты, проявившие восприимчивую реакцию в отношении патогена, но несущие доминантный аллель гена устойчивости, а также устойчивые семена, имевшие рецессивный аллель в гомозиготе.

Самым распространенным артефактным вариантом было сочетание фенотипа «устойчивости» с отсутствием гена устойчивости, но не более 7% встречаемости, которая была отмечена для самой крупной гибридной семьи 2016-1. В целом для всех гибридных семей вместе такой вариант встречался у 1,4% семян. Причиной этого артефакта был, вероятнее всего, недостаточный уровень инфекционного фона, создавший менее оптимальные условия для развития заболевания, так как в 2019 г. количество таких совпадений было меньше чем в 2018 г.

Вариант «*Rvi6rvi6* / восприимчивые» встречался реже и был представлен только в популяциях семян 2016-1 (около 4% случаев) и 2016-6 (1%). Выявление семян с сочетаниями «ген+ / восприимчивый», когда ген устойчивости присутствовал, а фенотип проявлялся как восприимчивый, отчасти может быть обусловлено сложностью в интерпретации качественных проявлений реакций устойчивости. Но наиболее вероятно, что присутствие такого варианта (*Rvi6rvi6* / восприимчивый) может быть объяснено наличием генетических детерминант-«модификаторов» – количественных локусов (QTL) с малым вкладом в фенотипическое проявление признака устойчивости, локализованных на одной группе сцепления с геном *Rvi6*. Было выявлено наличие нескольких QTL, которые, обладая аддитивным эффектом, модифицируют фенотипическую реакцию, детерминируемую геном *Rvi6*. При этом экспрессия части этих QTL идентифицируется только при наличии данного гена, а другие экспрессируются независимо от него (Gessler et al., 2006). Это является причиной и того, что при скрещивании двух гетерозиготных растений гомозиготы по локусу данного гена проявляют более высокий уровень устойчивости, нежели гетерозиготное потомство. Тот факт, что в нашем исследовании образцы, несущие ген, но проявившие восприимчивость, присутствовали в двух гибридных популяциях из шести, а не наблюдались во всех комбинациях, согласуется с генетической детерминированностью этого явления и комплексностью его контроля.

В рамках работы по маркер-опосредованному отбору генотипов, обладающих комплексом хозяйственно ценных генов, анализ результатов, полученных при ДНК-маркерной идентификации гена *Md-ACS1*, выявил различное соотношение аллельных вариантов в гибридных популяциях в зависимости от комбинации скрещивания. Распределение аллельных вариантов 1 : 2 : 1, характерное для комбинаций скрещиваний 2016-1, 2016-3, 2016-5, 2016-6 и 1 : 1, выявленное в комбинациях 2016-2 и 2016-4, согласуется с аллельными вариантами данного гена, идентифицированными на начальном этапе работы у родительских форм. Сорты 'Фуджион' и 'Смеральда' имеют аллель 2 в гомозиготе (вариант *Md-ACS1-2/2*), в то время

как у всех остальных сортов, использовавшихся в качестве родительских форм, было выявлено гетерозиготное состояние локуса данного гена – *Md-ACS1-1/2*.

Проведенное сопоставление результатов молекулярно-генетического маркирования по гену устойчивости *Rvi6* и гену *Md-ACS1* позволило выявить селекционно ценные сочетания аллелей искомым генов во всех гибридных популяциях (табл. 4).

Таблица 4. Комбинации селекционно ценных аллелей генов *Rvi6* и *Md-ACS1* у гибридных образцов яблони
Table 4. Allelic combinations of the *Rvi6* and *Md-ACS1* genes in apple-tree hybrid forms

Семья / Cross combination	<i>Rvi6</i> + <i>Md-ACS1-2/2</i>		<i>Rvi6</i> + <i>ACS1-1/2</i>	
	Количество / Number	%	Количество / Number	%
2016-1	18	8,69	40	19,32
2016-2	33	27,5	27	22,5
2016-3	4	7,69	20	38,46
2016-4	12	26,09	10	21,74
2016-5	1	5,00	6	30,00
2016-6	24	17,14	40	28,57
Итого	92		143	

Наибольший процент семян с сочетанием доминантного аллеля гена *Rvi6* и гомозиготой по аллелю 2 гена *Md-ACS1*, наиболее ценной для селекции, был обнаружен в комбинациях 2016-2 (Ренет Симиренко/Смеральда) – 27,5% и 2016-4 (Ренет Симиренко/Фуджион) – 26,09%. Это соответствует наибольшему выходу гибридов с аллельным вариантом *Md-ACS1-2/2* по причине наличия аллеля 2 в гомозиготном состоянии у одного из родительских сортов в данных комбинациях скрещиваний (сорта ‘Смеральда’ и ‘Фуджион’).

Полученные нами гибридные образцы, несущие комбинацию аллелей целевых генов *Rvi6+Md-ACS1-2/2*, представляют наиболее высокую ценность как для дальнейшего использования в селекции, так и в качестве комплексных доноров селекционно ценных аллелей. Их наличие позволит ускорить решение селекционных задач по созданию сортов яблони, имеющих устойчивость к парше и повышенную лежкоспособность плодов. Не менее важным направлением использования полученного гибридного фонда является уточнение фенотипического вклада всех известных генетических детерминант признаков, связанных с плотностью мякоти и ее сохранением при хранении, а также валидация известных ДНК-маркеров этих генов.

Работы, направленные на объединение селекционно ценных аллелей в одном генотипе и создание комплексных доноров, проводятся в ведущих профильных научных центрах в мире. Так, в результате выполнения программы международного коллектива из Швейцарии и Германии с применением технологии маркер-опосредованного отбора был создан набор элитных линий яблони с пирамидированными генами устойчивости к парше, мучнистой росе и бактериальному ожогу (Baumgartner et al., 2015). Данные линии позиционируются как важный источник комплекса генов селекционно ценных признаков для дальнейшей селекционной работы. В работе, выполненной в период с 2011 по 2017 г. в Италии, осуществляли пирамидирование пяти генов

устойчивости к парше *Rvi2*, *Rvi4*, *Rvi5*, *Rvi6* и *Rvi13*, а также гена устойчивости к тле *Dp-fl* в различных комбинациях (Bertra et al., 2017). Очевидно, что создание образцов, обладающих одновременно несколькими генами хозяйственно ценных признаков, – принципиальный вопрос для ускоренного решения задач селекции. Это позволяет более эффективно в ходе последующего селекционного отбора создавать новые сорта, а также использовать об-

разцы, несущие приоритетные аллели одновременно нескольких «селекционно ценных» генов в качестве комплексных доноров при выполнении программ скрещиваний.

Заключение

В результате выполнения работы с использованием маркер-опосредованного отбора был получен широкий перечень селекционных образцов яблони, несущих селекционно ценные аллели гена устойчивости к парше *Rvi6* и гена *Md-ACS1*, детерминирующего эндогенный синтез этилена в плодах. Из общей выборки объемом 646 гибридных растений, полученных в шести гибридных комбинациях, с использованием фитопатологической оценки и маркер-опосредованного отбора было выявлено 328 растений, несущих доминантный аллель гена *Rvi6*, и 517 образцов с аллельными комбинациями гена *Md-ACS1*, представляющими ценность для селекции: *Md-ACS1-2/2* – 190 шт., *Md-ACS1-1/2* – 322 шт. При этом идентифицирован значительный объем гибридов, обладающих одновременно доминантным аллелем гена *Rvi6* и приоритетным аллелем гена *Md-ACS1*, среди которых наибольшую ценность, как для селекции, так и для последующего использования в качестве комплексных доноров, представляют образцы, сочетающие аллельный вариант *Md-ACS1-2/2* и доминантный аллель гена *Rvi6*. Такая комбинация была выявлена у 92 растений.

Наличие полученных в результате работы гибридных форм яблони, несущих приоритетные аллели одновременно двух генов хозяйственно важных признаков, позволит усилить селекционную работу по созданию устойчивых к парше сортов яблони с повышенной лежкоспособностью плодов. Гибридные образцы с наилучшими аллельными комбинациями генов *Md-ACS1* и *Rvi6*, наряду с прямым использованием в селекционном процессе, представляют также ценность как комплексные доноры данных генов.

References / Литература

- Afunian M.R., Goodwin P.H., Hunter D.M. Linkage of *Vfa4* in *Malus × domestica* and *Malus floribunda* with *Vf* resistance to the apple scab pathogen *Venturia inaequalis*. *Plant Pathology*. 2004;53(4):461-467. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2004.01047.x
- Bai S., Wang A., Igarashi M., Kon T., Fukasawa-Akada T., Li T. et al. Distribution of *MdACS3* null alleles in apple (*Malus × domestica* Borkh.) and its relevance to the fruit ripening characters. *Breeding Science*. 2012;62(1):46-52. DOI: 10.1270/jsbbs.62.46
- Baumgartner I.O., Patocchi A., Frey J.E., Peil A., Kellerhals M. Breeding elite lines of apple carrying pyramided homozygous resistance genes against apple scab and resistance against powdery mildew and fire blight. *Plant Molecular Biology*. 2015;33(5):1573-1583. DOI: 10.1007/s11105-015-0858-x
- Berra L., Tartarini S., Adami M. Nari D., Pellegrino S. Pyramiding of multiple resistances to disease and marker-assisted selection. In: S. Tartarini, H. Nybom, F. Laurens, L. Dondini (eds). *XIV EUCARPIA Symposium on Fruit Breeding and Genetics. Acta Horticulturae 1172*. Bologna; 2017. Article No. 10. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1172.10
- Chagné D., Vanderzande S., Kirk C., Profitt N., Weskett R., Gardiner S.E. et al. Validation of SNP markers for fruit quality and disease resistance loci in apple (*Malus × domestica* Borkh.) using the OpenArray® platform. *Horticultural Research*. 2019;6:30. DOI: 10.1038/s41438-018-0114-2
- Costa F., Stella S., van de Weg W.E., Guerra W., Cecchinell M., Dallavia J. et al. Role of the genes *Md-ACO1* and *Md-ACSI* 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
- Costa F., van de Weg W.E., Stella S., Dondini L., Pratesi D., Musacchi S. et al. Map position and functional allelic diversity of *Md-Exp7*, a new putative expansin gene associated with fruit softening in apple (*Malus × domestica* Borkh.) and pear (*Pyrus communis*). *Tree Genetics and Genomes*. 2008;4(3):575-586. DOI: 10.1007/s11295-008-0133-5
- Dougherty L., Zhu Y., Xu K. Assessing the allelotypic effect of two aminocyclopropane carboxylic acid synthase-encoding genes *MdACSI* and *MdACS3a* on fruit ethylene production and softening in *Malus*. *Horticultural Research*. 2016;3:16024. DOI: 10.1038/hortres.2016.24
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations: [website]. Available from: <http://faostat.fao.org/> [accessed Mar. 15, 2022].
- Gao Z.S., van de Weg W.E. The *Vf* gene for scab resistance in apple is linked to sub-lethal genes. *Euphytica*. 2006;151(1):123-132. DOI: 10.1007/s10681-005-9082-3
- Gardiner S.E., Bus V.G.M., Rusholme R.L., Chagné D., Rikkerink E.H.A. Apple. In: C. Kole (ed.). *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants. Vol. 4. Fruits and Nuts*. Berlin; Heidelberg: Springer; 2007. p.1-62. DOI: 10.1007/978-3-540-34533-6_1
- Gashchenko T.A., Kozlovskaya Z.A. Scab resistance in self-rooted apple seedlings (Ustoychivost k parshe kornesobstvennykh seyantsev yabloni). *Fruit Growing*. 2008;20:16-23. [in Russian] [Гашченко Т.А., Козловская З.А. Устойчивость к парше корнесобственных сеянцев яблони. *Плодоводство*. 2008;20:16-23].
- Gessler C., Patocchi A., Sansavini S., Tartarini S., Gianfranceschi L. *Venturia inaequalis* resistance in apple. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2006;25(6):473-503. DOI: 10.1080/07352680601015975
- Harada T., Sunako T., Wakasa Y., Soejima J., Satoh T., Niizeki M. An allele of the 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase gene (*Md-ACSI*) accounts for the low level of ethylene production in climacteric fruits of some apple cultivars. *Theoretical and Applied Genetics*. 2000;101(5):742-746. DOI: 10.1007/s001220051539
- Höfer M., Flachowsky H., Schröpfer S., Peil A. Evaluation of scab and mildew resistance in the gene bank collection of apples in Dresden-Pillnitz. *Plants*. 2021;10(6):1227. DOI: 10.3390/plants10061227
- Ji Y., Wang A. Recent advances in phytohormone regulation of apple-fruit ripening. *Plants*. 2021;10(10):2061. DOI: 10.3390/plants10102061
- King G.J., Tartarini S., Brown L., Gennari F., Sansavini S. Introgression of the *Vf* source of scab resistance and distribution of linked marker alleles within the *Malus* gene pool. *Theoretical and Applied Genetics*. 1999;99(6):1039-1046. DOI: 10.1007/s001220051412
- Lobashev M.E. Genetics (Genetika). Leningrad; 1969. [in Russian] [Лобашев М.Е. Генетика. Ленинград; 1969].
- Longhi S., Cappellin L., Guerra W., Costa F. Validation of a functional molecular marker suitable for marker-assisted breeding for fruit texture in apple (*Malus domestica* Borkh.). *Molecular Breeding*. 2013;32(4):841-852. DOI: 10.1007/s11032-013-9912-2
- Lyzhin A.S., Savel'eva N.N. Marker-assisted screening of scab resistant (*Rvi6+Rvi4*) apple genotypes. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2021;67(1):1-9. [in Russian] [Лыжин А.С., Савельева Н.Н. Маркер-опосредованный скрининг иммунных к парше (*Rvi6+Rvi4*) генотипов яблони. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2021;67(1):1-9]. DOI: 10.30679/2219-5335-2021-1-67-1-9
- Murray M.G., Thompson W.F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA. *Nucleic Acids Research*. 1980;8(19):4321-4325. DOI: 10.1093/nar/8.19.4321
- Nybom H., Ahmadi-Afzadi M., Sehic J., Hertog M. DNA marker-assisted evaluation of fruit firmness at harvest and post-harvest fruit softening in a diverse apple germplasm. *Tree Genetics and Genomes*. 2013;9(1):279-290. DOI: 10.1007/s11295-012-0554-z
- Papp D., Gao L., Thapa R., Olmstead D., Khan A. Field apple scab susceptibility of a diverse *Malus* germplasm collection identifies potential sources of resistance for apple breeding. *CABI Agriculture and Bioscience*. 2020;1(1):16. DOI: 10.1186/s43170-020-00017-4
- Pikunova A.V., Sedov E.N. The racial composition of *Venturia inaequalis* in environments of the Oryol region. *Mycology and Phytopathology*. 2019;53(5):293-300. DOI: 10.1134/S0026364819050040
- Sedov E.N., Yanchuk T.V., Korneeva S.A. Directions and summarized the apple selection. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2020;(3):8-12. [in Russian] [Седов Е.Н., Янчук Т.В., Корнеева С.А. Направления и краткие итоги селекции яблони. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2020;(3):8-12]. DOI: 10.30850/vrsn/2020/3/8-12
- Sedov E.N. Zhdanov V.V. Scab resistance (Ustoychivost yabloni k parshe). Orel; 1983. [in Russian] [Седов Е.Н. Жданов В.В. Устойчивость яблони к парше. Орел; 1983].
- 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 использова-

- нием молекулярных маркеров. *Аграрная наука Северо-Востока*. 2020;21(6):706-712. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.6.706-712
- Suprun I.I., Tokmakov S.V. Allelic diversity of ethylene biosynthesis-related *MD-ACSI* and *MD-ACO1* genes in Russian apple germplasm. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2013;17(2):202-206. [in Russian] (Супрун И.И., Токмаков С.В. Изучение аллельного разнообразия генов синтеза этилена *MD-ACSI* и *MD-ACO1* в отечественной геноплазме яблони. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2013;17(2):202-206).
- Tokmakov S.V., Suprun I.I., Ilnitskaya E.T. Advances in the study of molecular and genetic control of the apple-tree ethylene biosynthesis (*Malus domestica* Borkh.). *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2015;35(5):28-48. [in Russian] (Токмаков С.В., Супрун И.И., Ильницкая Е.Т. Достижения в изучении молекулярно-генетического контроля биосинтеза этилена у яблони (*Malus domestica* Borkh.). *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2015;35(5):28-48).
- Ulyanovskaya E.V., Suprun I.I., Tokmakov S.V., Atabiyev K.M., Belenko E.A. The use of genetic diversity in apple breeding for scab resistance. *Bulletin of the State Nikita Botanical Gardens*. 2019;(133):211-216. [in Russian] (Ульяновская Е.В., Супрун И.И., Токмаков С.В., Атабиев К.М., Беленко Е.А. Использование генетического разнообразия в селекции яблони на устойчивость к парше. *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2019;(133):211-216). DOI: 10.36305/0513-1634-2019-133-211-216
- Wu B., Shen F., Wang X., Zheng W.Y., Xiao C., Deng Y. et al. Role of *MdERF3* and *MdERF118* natural variations in apple flesh firmness/crispness retainability and development of QTL-based genomics-assisted prediction. *Plant Biotechnology Journal*. 2021;19(5):1022-1037. DOI: 10.1111/pbi.13527
- Yakuba G.V. Ecologized protection of apple trees from scab under climate change: a monograph (Ekologizirovannaya zashchita yabloni ot parshi v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy: monografiya). Krasnodar: North Caucasian FSC of Horticulture, Viticulture, Wine-making; 2013. [in Russian] (Якуба Г.В. Экологизированная защита яблони от парши в условиях климатических изменений: монография. Краснодар: СКЗНИИСиВ; 2013).
- Zhu Y., Barritt B.H. *Md-ACSI* 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

Иван Иванович Супрун, кандидат биологических наук, заведующий научным центром, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, supruni@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0355-8395>

Евгений Алексеевич Егоров, академик РАН, доктор экономических наук, директор, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, kubansad@kubannet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5330-0352>

Андрей Иванович Насонов, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, nasoan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4927-2192>

Елена Вадимовна Лободина, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, alyona2255@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-2316>

Сергей Вячеславович Токмаков, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ad-a-m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2092-7757>

Илья Владимирович Степанов, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ivstepanof@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6251-300X>

Information about the authors

Ivan I. Suprun, Cand. Sci. (Biology), Head of a Scientific Center, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, supruni@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0355-8395>

Evgeniy A. Egorov, Full Member (Academician) of the RAS, Dr. Sci. (Economics), Director, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, kubansad@kubannet.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5330-0352>

Andrey I. Nasonov, Cand. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, nasoan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4927-2192>

Elena V. Lobodina, Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, alyona2255@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3580-2316>

Sergey V. Tokmakov, Cand. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, Russia, ad-a-m@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2092-7757>

Ица V. Stepanov, Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, ivstepanof@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6251-300X>

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 07.07.2023; одобрена после рецензирования 25.08.2023; принята к публикации 04.09.2023.
The article was submitted on 07.07.2023; approved after reviewing on 25.08.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

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

Научная статья

УДК 57.577.21

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-146-160



Изучение генетической структуры коллекции сортов райграса (*Lolium*) с использованием SSR- и SCoT-маркеров

Ю. М. Мавлютов^{1,2}, Е. А. Вертикова², А. О. Шамустакимова¹, И. А. Клименко¹

¹ Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса, Московская область, Россия

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Юлиан Муратович Мавлютов, yulian92@mail.ru

Актуальность. С помощью современных молекулярно-генетических методов анализа можно существенно ускорить процесс создания новых сортов, упростить и повысить точность оценки исходного материала. В настоящей работе изучена эффективность использования техник SSR- и SCoT-маркирования для оценки генетической структуры коллекции образцов райграса пастбищного и однолетнего и определения набора сортоспецифичных маркеров для ДНК-идентификации.

Материалы и методы. Геномную ДНК выделяли из суммарной навески 30 проростков от каждого из 15 исследуемых образцов с помощью модифицированного SDS-метода. Для анализа сортов райграса использовали 20 SSR- и 22 SCoT-маркера. Определили показатели эффективности для информативных локусов. Генетические взаимосвязи между сортами оценили с помощью дендрограммы, составленной методом Neighbor-Joining (NJ), и путем анализа на основе байесовской модели.

Результаты. Для оценки генетического полиморфизма видов и сортов райграса были отобраны 7 SSR-локусов, для которых выявлено 110 аллельных вариантов (34 аллели оказались уникальными для отдельных сортов), и 9 SCoT-локусов, для которых выявлено 78 полиморфных фрагментов амплификации (28 из них являлись сортоспецифичными). Дендрограмма сходства и моделирование в программе Structure v.2.3.4 по результатам SSR- и SCoT-анализов распределили сорта согласно видовой принадлежности, уровню ploidy, происхождению и сходству по основным признакам. С помощью анализа главных координат (PCoA), проведенного на основе объединенных данных бинарных матриц, построена многомерная диаграмма генетических взаимосвязей между сортами райграса.

Заключение. Системы SSR- и SCoT-маркирования оказались достаточно эффективными для изучения генетического полиморфизма и различения видов и сортов райграса. Обнаружены уникальные ДНК-профили, которые можно использовать для генетической идентификации. Результаты исследования имеют практическую значимость при сортовой идентификации и в селекции сортов разного назначения.

Ключевые слова: райграс однолетний, райграс пастбищный, ДНК-полиморфизм, генетическая структура коллекции

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» по проекту № FGGW-2022-0007 «Использовать адаптированные методы молекулярно-генетического анализа кормовых культур для создания новых форм, сортов и гибридов с улучшенными хозяйственно ценными признаками».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Мавлютов Ю.М., Вертикова Е.А., Шамустакимова А.О., Клименко И.А. Изучение генетической структуры коллекции сортов райграса (*Lolium*) с использованием SSR- и SCoT-маркеров. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):146-160. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-146-160

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-146-160

Genetic structure of the collection of ryegrass (*Lolium*) cultivars: a study based on SSR and SCoT markers

Yulian M. Mavlyutov^{1,2}, Elena A. Vertikova², Anastasia O. Shamustakimova¹, Irina A. Klimenko¹

¹ Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Moscow Province, Russia

² Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Corresponding author: Yulian M. Mavlyutov, yulian92@mail.ru

Background. Current molecular and genetic approaches make it possible to accelerate ryegrass breeding, simplify source material evaluation, and increase its accuracy. The efficiency of PCR-based SSR and SCoT marker techniques was studied in the context of evaluating the genetic structure of annual and perennial ryegrass accessions and defining DNA-identifying markers.

Materials and methods. Genomic DNA was isolated from the aggregate sample of 30 seedlings from each of the 15 analyzed cultivars according to the modified SDS DNA extraction protocol. In total, 20 SSR and 22 SCoT markers were used to assess genetic polymorphism. Basic parameters of the markers' informative efficiency were identified. Genetic relationships among the studied cultivars were analyzed on the basis of the Neighbor-Joining dendrogram and Bayesian model.

Results. To assess the genetic polymorphism of ryegrass species and varieties, 7 SSR loci were selected, for which 110 allelic variants were identified (34 alleles were unique for individual cultivars), and 9 SCoT loci, for which 78 polymorphic amplification fragments were identified, with 28 being cultivar-specific. The dendrogram of genetic similarity and modeling in the Structure v2.3.4 program according to the results of SSR and SCoT analyses distributed the cultivars by their traits according to their species, ploidy level, origin, and similarity. Based on PCoA, carried out using summarized data of SSR and SCoT analyses, a multidimensional diagram of genetic relationships among ryegrass cultivars was constructed.

Conclusions. The systems of SSR and SCoT markers appeared to be an efficient tool to reveal genetic polymorphism and identify differences among ryegrass species and cultivars. We found unique DNA profiles that can be used for genetic identification. The results of the study have practical significance in cultivar-specific identification and selection of cultivars for various purposes.

Keywords: annual ryegrass, perennial ryegrass, DNA polymorphism, genetic structure of the collection

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Project No. FGGW-2022-0007 "Using adapted methods of molecular and genetic analysis of forage crops for the development of new forms, cultivars and hybrids with improved useful agronomic characteristics".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Mavlyutov Yu.M., Vertikova E.A., Shamustakimova A.O., Klimenko I.A. Genetic structure of the collection of ryegrass (*Lolium*) cultivars: a study based on SSR and SCoT markers. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):146-160. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-146-160

Введение

Важнейшим фактором устойчивого развития сельского хозяйства и наращивания производства полноценной животноводческой продукции для обеспечения потребностей населения является создание стабильных кормовых агроэкосистем, которые включают природные кормовые угодья и многолетние травы на пашне. Для лугового и полевого травосеяния России определяющее значение имеют злаковые травы. Они составляют более 90% рациона животных при кормлении на сенокосах и пастбищах, служат источником сырья при заготовке сена и силоса. В системе земледелия многолетние злаковые травы повышают плодородие почв, обогащая их органическими веществами, способствуют укреплению агроландшафтов и улучшению экологической обстановки. Некоторые виды широко используются при залужении откосов дорог, газонов и стадионов (Kosolapov et al., 2013b).

Одним из наиболее распространенных видов злаковых трав в зоне достаточного увлажнения является райграсс (*Lolium L.*). При создании культурных пастбищ и сенокосов в северо-западных, западных и центральных регионах России в травосмесях используются в основном райграсс пастбищный, или райграсс многолетний (*L. perenne L.*), и райграсс однолетний (вестервольдский) (*L. multiflorum Lam. var. westerwoldicum Wittm.*). Растения этих видов хорошо развиваются на умеренно влажных, плодородных суглинистых, глинистых и супесчаных почвах, при благоприятных условиях могут давать высокие урожаи сухого вещества (более 80 ц с 1 га), отличаются хорошей отавностью и ценными кормовыми свойствами. Селекционная работа с райграссом направлена на выведение высокопродуктивных долгодетных сортов с повышенной зимостойкостью и устойчивостью к болезням (Kosolapov et al., 2013a).

Существенно ускорить процесс создания новых сортов и в достаточной мере короткие сроки отследить наследование хозяйственно ценных признаков в потомстве позволяет применение в селекции современных молекулярно-биологических подходов. На основе методов ДНК-маркирования оптимизируют работу, связанную с поиском и рациональным использованием генетических ресурсов, проводят дифференциацию исходного материала, осуществляют подбор родительских форм и контроль результатов гибридизации (Klimenko et al., 2019). Широкое использование молекулярных маркеров в системе Государственного сортоиспытания поможет снизить затраты при оценке соответствия новых селекционных достижений критериям отличимости, однородности и стабильности (ООС-тест) (Kilchevsky, Khotyleva, 2012).

Особое значение методы ДНК-типирования приобретают в работе с перекрестноопыляемыми злаковыми культурами, характеризующимися высокой межсортовой и внутрисортовой гетерогенностью при значительной степени сходимости по морфологическим признакам (Loera-Sánchez et al., 2019). Однако для успешного выполнения задач исследования необходимо учитывать преимущества и недостатки маркеров различных типов, техническую сторону проведения анализа, финансовые затраты и особенности изучаемой культуры (Amag et al., 2011; Sukhareva, Kuluev, 2018).

Для генотипирования популяций и образцов разных видов райграсса применяются как доминантные (RAPD, AFLP, SRAP, ISSR), так и кодоминантные маркеры (SSR и SNP) (Kubik et al., 2001; Wang et al., 2009; Liu et al., 2018;

Pasquali et al., 2022). В нашей работе при оценке генетической изменчивости сортов пастбищного и однолетнего райграсса использовали полиморфные микросателлитные локусы (SSR – *Simple Sequence Repeats*) и относительно новую систему SCoT-маркеров (*SCoT – Start Codon Targeted Polymorphism*), разработанных на основе выявления различий в коротких консервативных участках, фланкирующих ATG-стартовый кодон в генах растений (Collard, Mackill, 2009). Выбор SSR-локусов обусловлен их кодоминантной природой, многочисленностью и равномерным распределением по геному, а также высоким уровнем выявляемого полиморфизма. Преимуществом мультилокусных SCoT-маркеров является способность маркировать ДНК, ассоциированную с кодирующими участками генома. Для этого, как и в случае применения RAPD-маркеров, используются одиночные праймеры. Отличительные особенности SCoT-маркеров – большая длина используемых праймеров (18 нуклеотидов), обеспечивающая высокую воспроизводимость результатов, а также простота выполнения и доступность анализа. Основным недостатком маркеров этой группы считается их доминантная природа. Несмотря на это, в последние годы SCoT-маркеры все чаще используются для ДНК-типирования злаковых культур (Zeng et al., 2014; Jiang et al., 2014; Yan et al., 2016).

Цель исследования заключалась в изучении полиморфизма и генетической структуры коллекции образцов райграсса и оценке эффективности SSR- и SCoT-маркеров в качестве инструмента ДНК-идентификации сортов и видов.

Материалы и методы

Растительный материал и выделение ДНК.

Объектом исследования служили 15 сортов пастбищного и однолетнего райграсса разного эколого-географического происхождения, переданные для исследования Центром коллективного пользования «Биологические коллекции кормовых растений» Федерального научного центра кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса» (ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса») (табл. 1). Геномную ДНК выделяли модифицированным SDS-методом из суммарной навески части растительной ткани («балк-образец») 30 семидневных проростков от каждого сорта (Klimenko et al., 2020). Конечная концентрация ДНК всех образцов была доведена до 30 нг/мкл.

SSR-анализ. Набор из 20 микросателлитных маркеров для генотипирования образцов райграсса составлен на основе анализа данных литературных источников (табл. 2).

В реакционной смеси для проведения ПЦР объемом 20 мкл содержалось: 3 мкл 10×Taq Turbo buffer, 0,4 мкл 50x dNTP mix (10 мМ каждого из дезоксирибонуклеотидов), 0,3 мкл Taq-ДНК полимеразы 5 е. а./мкл, 1 мкл образца ДНК 30 нг/мкл, а также по 1 мкл каждого праймера (10 мкМ) и 13,3 мкл деионизированной воды. Амплификацию матричной ДНК с праймерами осуществляли в термоциклере Bio-Rad T100 (Bio-Rad, США) по программам, предложенным в литературных источниках (см. табл. 2).

Размер полученных ПЦР-фрагментов предварительно определяли с использованием пакета программ Image Lab version 6.0.1 в сравнении с маркером молекулярного веса 100 bp Ladder GeneRuler (Thermo Fisher Scientific,

Таблица 1. Сорты райграса пастбищного и однолетнего, их происхождение и уровень плоидности
Table 1. The studied perennial and annual ryegrass cultivars, their origin, and ploidy level

Сорт / Cultivar	Вид / Species	Происхождение (оригинатор) / Origin (originator)	Плоидность / Ploidy level
Агат	Райграс пастбищный (<i>Lolium perenne</i> L.)	ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	4n*
Дуэт		ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	4n*
ВИК 66		ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	4n*
Карат		ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	4n*
Феникс		ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	4n*
ВИК 22		ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	2n*
Ленинградский 809		ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха»	-
Вея		Калининградский НИИСХ – филиал ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	-
Веймар		ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»	2n**
Выль		ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» ФИЦ Коми НЦ УрО РАН	4n**
Рапид	Райграс однолетний (вестервольдский) (<i>Lolium multiflorum</i> Lam. var. <i>westwoldicum</i> Wittm.)	ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	4n*
Московский 74		ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»	2n*
Roznovsky		Чехия	2n***
Sprint		Дания	2n****
Изорский		ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха»	2n*****

Примечание / Note: * Kosolapov et al., 2019; ** <https://reestr.gossortrf.ru>; *** Fojtík, 1994; **** Bostan et al., 2022; ***** Dyachenko et al., 2016

Таблица 2. SSR-маркеры для анализа сортов райграса
Table 2. SSR markers for the PCR analysis of ryegrass cultivars

Название SSR-маркера / SSR marker name	Последовательность праймеров (5'-3') F/R / Primer sequence (5'-3') F/R	Температура отжига праймеров (Tm), °C / Annealing temperature (Tm), °C	Ссылка на литературный источник / Reference
LPSSRh01h06	ATTGACTGGCTTCCGTGTT / CGCGATTGCAGATTCTTG	53,8	(Wang et al., 2009)
LPSSRh03b01	ACACTCCACTAGGATTTCT / CTGAATTTGGCTAGTATAAA	46,3	
LPSSRk12d11	GCAAGAGCTAGGTCTCGACAACAA / TGGGGAGGACAAGGCCATAAACAA	63,1	
LPSSRk02e08	TCTGAAAAGCCCGAGTGAGCG / CGACTGTGGCAGGGATGACG	61,8	
LPSSRk03b03	GGGAATCTGGCAGAAGTATCACGT / GAAGATCTGGCCAAGTCTAATCCG	62,0	
LPSSRk15h05	GGCACTTTATTGCTTTGGTTAGTC / AAATCCTTAGATTGGTCGGTCATG	58,9	

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

Название SSR-маркера / SSR marker name	Последовательность праймеров (5'-3') F/R / Primer sequence (5'-3') F/R	Температура отжига праймеров (T _m), °C / Annealing temperature (T _m), °C	Ссылка на литературный источник / Reference
G02_025	GAGTTTGAAGATCCCCGTGA/ GCCATGATGCAGAAGAAGGT	60	(Studer et al., 2008)
G03_039	GCTCCAGGACTTCTTCAACG/ GCTGCTCGTACTGCTCGTAG	60	
G03_089	TCACCAACACCACACTCCTC/ GCTGCTCGTACTGCTCGTAG	60	
G04_092	GGAAGTTCGAAAGTCAATCAGC/ CTCGAACTGGTTCCCGAATA	60	
G05_044	GACCGATTGGAACCAACAAC/ CGATGCTTTCAGCGGTTAAT	60	
G05_046	TACCTCCAGCAACAGCTTCA/ TTCTGAAACTGGCTGCAATG	60	
G07_058	AAGGAGCTCCAGCAAGATGA/ GGGGGAGAGGCTTCAATAAC	60	
G01_002	CAAGACCAAACCGAGAGAGG/ TCTCCTCCTCGACTTCCAGA	60	
AJ872206	GTGCAGCAGTTTGAATTGGA/ AGCATCGGGAGCTATGAATG	55	
AJ872214	AGGTGTCCTGTTGCTTTGGA/ TTTACCCCCAGGGATCAAAT	55	
AJ872228	CCAACTAGACAAAGGGGATTG/ GGAGAGCACCATTATCCAT	55	
AJ872232	CTTGTCTGTCCTTGTGGGAG/ ATATTCTGGATCGTGGCGTT	55	
LP165	CCATCACCTCCACTAT/ AGCTCGCAGTCTGTTG	55	(Kubik et al., 2001)
M4136	AGAGACCATCACCAAGCC/ TCTGGAAGATTTCCCTTG	55	

США) после электрофореза в 1,6-процентном агарозном геле (50 V в течение 2 часов). Для последующего анализа отобрали 7 пар праймеров, позволяющих выявлять отчетливые продукты амплификации со всеми исследуемыми образцами при наличии полиморфизма. Ампликоны, полученные с данными SSR-праймерами, разделяли с применением автоматической системы капиллярного электрофореза Qsep₁ Plus (BiOptic Inc., Тайвань) и анализировали с помощью программного обеспечения Q-Analyzer.

Анализ с использованием SCoT-маркеров. SCoT-маркеры для генотипирования образцов райграса были выбраны на основе данных литературных источников (табл. 3).

Общий объем ПЦР-смеси составлял 20 мкл и содержал 2 мкл 10×Taq Turbo buffer, 0,4 мкл 50x dNTP mix (10 mM каждого из дезоксинуклеотидов), 0,2 мкл Taq-ДНК полимеразы 5 е. а./мкл, 1 мкл ДНК (концентрации 30 нг/мкл), 1 мкл праймера (8 мкМ), 15,4 мкл деионизи-

рованной воды. ПЦР осуществлялась на приборе Bio-Rad T100 (Bio-Rad, США). Режим амплификации был следующий: 94°C - 3 мин; далее 35 циклов: 94°C - 1 мин, 50°C - 1 мин, 72°C - 1 мин; финальная элонгация при 72°C - 5 мин. Полученные ПЦР-продукты разделяли в 1,6-процентном агарозном геле при 50 V в течение 2 часов, а затем с помощью программного обеспечения Image Lab version 6.0.1 (Bio-Rad, США) определяли их размеры в сравнении с маркером молекулярного веса 1 kb DNA Ladder («Евроген», Россия).

Анализ данных. На основании полученных данных составляли бинарные матрицы, где присутствие фрагмента определенной длины обозначали как «1», а отсутствие - «0». В анализе учитывали только отчетливые и воспроизводимые ампликоны. Для вычисления значений эффективного числа аллелей (Ne) и показателя гетерозиготности, или генетического разнообразия по Нею (He), а также проведения PcoA-анализа применяли программное обеспечение GenAlEx 6.5 (Peakall, Smouse,

Таблица 3. SCoT-маркеры для ПЦР-анализа сортов райграса

Table 3. SCoT markers for the PCR analysis of ryegrass cultivars

Название / Marker name	Последовательность праймера (5'-3') / Primer sequence (5'-3')	Источник / Reference
SCoT 02	CAACAATGGCTACCACCC	(Collard, Mackill, 2009)
SCoT 20	ACCATGGCTACCACCGCG	
SCoT 23	CACCATGGCTACCACCAG	
SCoT 31	CCATGGCTACCACGCCT	
SCoT 06	CAACAATGGCTACCACGC	
SCoT 13	ACGACATGGCGACCATCG	
SCoT 21	ACGACATGGCGACCCACA	
SCoT 32	CCATGGCTACCACCGCAC	
SCoT 15	ACGACATGGCGACCGCGA	
SCoT 17	ACCATGGCTACCACCGAG	
SCoT 35	CATGGCTACCACCGGCC	
SCoT 22	AACCATGGCTACCACCAC	
SCoT 28	CCATGGCTACCACCGCCA	
SCoT 11	AAGCAATGGCTACCACCA	
SCoT 26	ACCATGGCTACCACCGTC	
SCoT 08	CAACAATGGCTACCACGT	
SCoT 07	CAACAATGGCTACCACGG	
SCoT 36	GCAACAATGGCTACCACC	(Jiang et al., 2014)
SCoT 63	ACCATGGCTACCACGGGC	
SCoT 60	ACAATGGCTACCACCACA	
SCoT 59	ACAATGGCTACCACCATC	(Safari et al., 2019)
SCoT 40	CAATGGCTACCACTACAG	

2006). Показатели информативности праймеров (PIC), разрешающей способности (Rp) и значения маркерного индекса (MI) определяли с использованием онлайн-ресурса IMEC (Amiryousefi et al., 2018). Дендрограмму на основе генетических дистанций между исследуемыми образцами составляли с помощью программы DARwin 6.0.21 (Perrier, Jacquemoud-Collet, 2006). Использовали оценку достоверности результатов посредством бутстреп-анализа на основании 10 000 реплик. Для оценки генетической структуры изучаемых сортов применяли программу STRUCTURE 2.3.4 (Pritchard et al., 2000; Falush et al., 2003) с установкой значений гипотетических популяций (K) от 1 до 10, а также вводом 10 000 повторов burn-in period и 10 000 итераций MCMC (Markov Chain Monte Carlo). По результатам анализа определяли оптимальное количество кластеров с помощью метода Evanno (Evanno et al., 2005) и онлайн-ресурса Structure Harvester (Earl, VonHoldt, 2012).

Результаты

SSR-анализ. Из 20 протестированных SSR-маркеров для последующего анализа отобрано семь информативных, с которыми были получены воспроизводимые продукты амплификации для всей коллекции образцов (табл. 4).

Для 7 наиболее полиморфных SSR-локусов выявлено 110 аллелей, из которых 34 (30,9%) оказались уникальными для отдельных сортов. При этом их размер варьировал от 140 до 652 пн. Наиболее полиморфным оказался локус G07_058, в нем выявлено 35 аллелей. Наименьшим полиморфизмом характеризовался локус LPSSRh01h06 (обнаружено 5 аллелей). С микросателлитным локусом – G07_058 – получили максимальное количество сортоспецифичных аллелей – 10, а с праймерами к маркерам LPSSRh01h06 и LPSSRk03b03 – минимальное (два).

Таблица 4. Информативные SSR-маркеры, отобранные для анализа сортов райграса**Table 4. List of informative SSR markers used for the analysis of ryegrass cultivars**

Название маркера / Marker name	Число полиморфных ПЦР-продуктов / Total number of polymorphic amplification fragments	Число уникальных фрагментов ДНК / Number of cultivar-specific fragments	Процент уникальных фрагментов, % / Ratio of cultivar-specific fragments (%)	Размер ПЦР-продуктов, пн / Size range of PCR products (bp)
G05_044	18	7	38,9	449–652
G07_058	35	10	28,6	279–431
G03_089	6	2	33,3	300–334
G04_092	19	4	21,1	188–249
AJ872206	15	7	46,7	143–263
LPSSRh01h06	5	2	40,0	140–188
LPSSRk03b03	12	2	16,7	264–351
Сумма Total	110	34	–	–
Среднее Mean	15,7	4,9	32,2	–

По результатам SSR-анализа сортов райграса пастбищного и однолетнего определены показатели генетической изменчивости (табл. 5). Значение эффективного числа аллелей находилось в диапазоне от 1,17 (для локуса G05_044) до 1,51 (для локуса G04_092) и в среднем составляло 1,35. Для локусов AJ872206 и G04_092 выявлен максимальный показатель генетического разнообразия по Нею (0,31), а для локуса G05_044 – минимальный (0,14).

Наибольшей величиной индекса полиморфизма (PIC) (0,37) характеризовался локус G03_089, наименьшей (0,20) – SSR-локус G05_044. При этом разрешающая способность была максимальной при использовании праймеров к локусу G07_058 и составляла 11,70, тогда

как минимальным значением данного показателя (2,10) характеризовался локус G03_089. Показатели маркерного индекса варьировали от 0,013 с использованием локуса G03_089 до 0,002 – для G05_044.

Для выявления генетических взаимосвязей между исследуемыми сортами и определения их генетической структуры составлена дендрограмма методом Neighbor-Joining (NJ) с помощью программы DARwin и осуществлен анализ на основе байесовской модели в программе Structure (рис. 1, а, б).

На дендрограмме (см. рис. 1, а), основанной на генетических дистанциях, наблюдается группировка изучаемых сортов по трем отчетливым кластерам. В первом кластере объединились сорта райграса пастбищного, где

Таблица 5. Показатели эффективности информативных SSR-маркеров, использованных для анализа сортов райграса пастбищного и однолетнего**Table 5. Parameters of the effectiveness of the informative SSR markers for analyzing annual and perennial ryegrass cultivars**

Название маркера / Marker name	Эффективное число аллелей (Ne) / Effective number of alleles (Ne)	Генетическое разнообразие по Нею (He) / Nei's gene diversity (He)	Показатель информативности праймеров (PIC) / Polymorphism information content (PIC)	Показатель разрешающей способности маркера (Rp) / Resolving power (Rp)	Маркерный индекс (MI) / Marker index (MI)
G05_044	1,17	0,14	0,20	6,40	0,002
G07_058	1,20	0,16	0,24	11,70	0,003
G03_089	1,45	0,28	0,37	2,50	0,013
G04_092	1,51	0,31	0,32	7,90	0,007
AJ872206	1,45	0,31	0,25	5,50	0,004
LPSSRh01h06	1,37	0,23	0,32	2,10	0,008
LPSSRk03b03	1,27	0,20	0,28	5,20	0,005
Среднее Mean	1,35	0,23	0,28	5,90	0,01

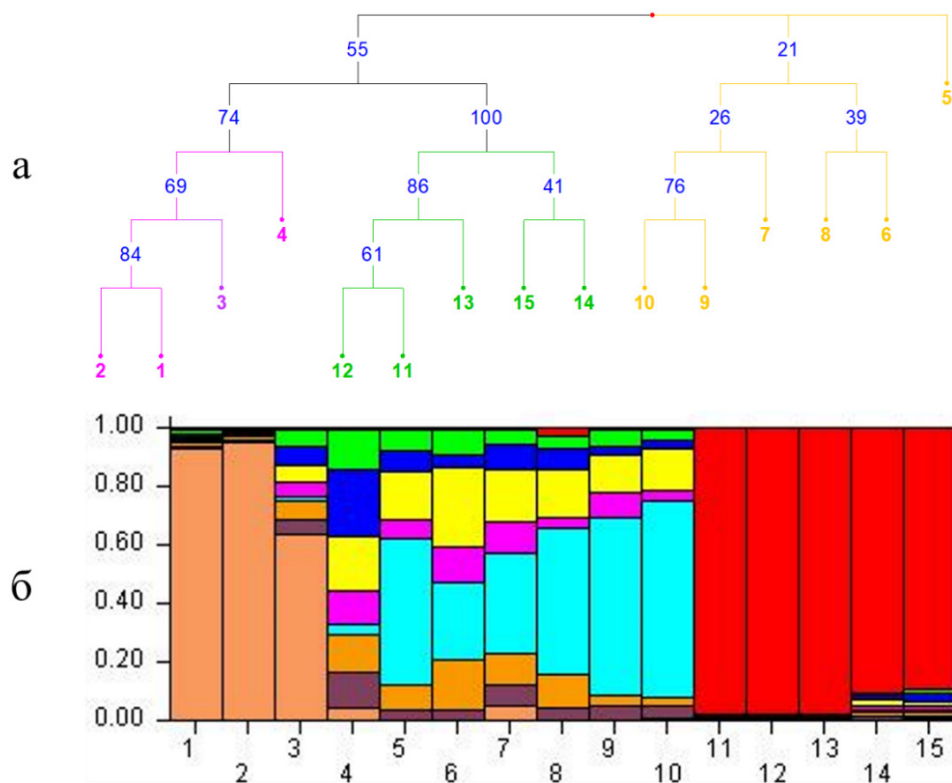


Рис. 1. Дендрограмма сходства (а) и генетическая структура (б) сортов райграса пастбищного и однолетнего по результатам SSR-анализа.

Цветовые коды соответствуют выявленным кластерам, цифровые – названиям сортов (см. табл. 1)

Fig. 1. Neighbor-Joining dendrogram (a) and genetic structure (b) of *Lolium perenne* L. and *L. multiflorum* Lam. var. *westerwoldicum* Wittm. cultivars based on the SSR analysis.

Color codes represent the identified clusters, and digital codes indicate the names of cultivars (see Table 1)

наиболее генетически близкими оказались 'Агат' и 'Дуэт' (84% уровень бутстреп-поддержки). В эту же группу вошли сорта 'ВИК 66' и 'Карат'.

Второй кластер состоит из сортов райграса однолетнего – 'Рапид', 'Московский 74' и 'Roznovsky' (с уровнем бутстреп-поддержки 86%), а также 'Изорский' и 'Sprint' (с бутстреп-поддержкой 37%).

В третьем кластере сгруппировались сорта райграса пастбищного, среди которых наибольшее сходство обнаружено между сортами 'Веймар' и 'Виль' (76-процентный уровень бутстреп-поддержки), а также 'ВИК 22' и 'Вея' (уровень бутстреп-поддержки – 39%). Обособленным положением на ветвях генеалогического дерева характеризовался сорт райграса пастбищного 'Феникс'.

Оценка генетической структуры коллекции сортов на основе байесовской модели методом Evanno выявила оптимальное количество кластеров ($K = 9$), характеризующее их филогенетические взаимосвязи (см. рис. 1, б). На графике распределения частот аллелей наблюдается соответствие группировки образцов результатам кластеризации с использованием NJ-дендрограммы. Однако выявлены и некоторые расхождения. Так, в составе коллекции райграса пастбищного выделяются сорта 'ВИК 66' и 'Карат'.

Анализ с использованием SCoT-маркеров. Из 22 праймеров на SCoT-маркеры, включенных в исследование, 9 оказались информативными, генерирующими отчетливые и воспроизводимые продукты амплификации (табл. 6).

Всего для 9 SCoT-маркеров удалось получить 78 полиморфных ПЦР-продуктов, из которых 28 (35,9%) являлись сортоспецифичными. Размер их варьировал от 424 до 2348 пн. Максимальным числом полиморфных фрагментов амплификации (14) отмечен маркер SCoT 35, с ним же выявлено наибольшее количество уникальных ампликонов. В среднем для одного SCoT-маркера получили 8 фрагментов полиморфной амплифицированной ДНК, из которых 3,1 являлись сортоспецифичными.

Показатель информативности праймеров находился в диапазоне от 0,28 (для маркера SCoT 06) до 0,37 (для маркеров SCoT 32, SCoT 02 и SCoT 20) (табл. 7). Максимальная разрешающая способность (5,6) определена для маркера SCoT 20, минимальная (1,07) – для SCoT 15. Средние значения эффективного числа аллелей и генного разнообразия по Нею составляли 1,38 и 0,23 соответственно.

Дендрограмма, составленная методом Neighbor-Joining, и результаты анализа генетической структуры исследуемых сортов, проведенного с использованием байесовской модели, приведены на рисунке 2, а, б.

В результате кластеризации (см. рис. 2, а) сортового материала выделены 2 отчетливые группы образцов с уровнем бутстреп-поддержки 44 и 61% соответственно. Первая группа – сорта райграса пастбищного ('Агат', 'Дуэт', 'ВИК 66', 'Феникс', 'Веймар', 'Виль', 'Карат'). Во втором кластере со 100-процентной бутстреп-поддержкой расположились сорта райграса однолетнего ('Рапид', 'Московский 74', 'Изорский', 'Roznovsky', 'Sprint') и образцы,

Таблица 6. Информативные SCoT-маркеры для анализа сортов райграса
Table 6. List of informative SCoT markers used for the analysis of ryegrass cultivars

Название маркера / Marker name	Число полиморфных фрагментов амплификации / Total number of polymorphic amplification fragments	Число уникальных фрагментов ДНК / Number of cultivar-specific fragments	Процент уникальных фрагментов, % / Ratio of cultivar-specific fragments (%)	Размер ПЦР-продуктов, пн / Size range of PCR products (bp)
SCoT 06	12	5	41,7	838-2336
SCoT 23	7	3	37,5	1334-2154
SCoT 13	5	3	50,0	1576-2348
SCoT 32	6	1	12,5	424-957
SCoT 35	14	6	42,9	502-1473
SCoT 15	6	4	57,1	783-1344
SCoT 02	6	0	0,0	847-1963
SCoT 17	11	3	27,3	989-2320
SCoT 20	11	3	25,0	889-2443
Сумма Total	78	28	-	-
Среднее Mean	8,7	3,1	32,7	-

Таблица 7. Показатели информативности SCoT-маркеров для анализа сортов райграса
Table 7. Parameters of the effectiveness of the informative SCoT markers for analyzing annual and perennial ryegrass cultivars

Название маркера / Marker name	Эффективное число аллелей (Ne) / Effective number of alleles (Ne)	Генетическое разнообразие по Нею (He) / Nei's gene diversity (He)	Показатель информативности праймеров (PIC) / Polymorphism information content (PIC)	Показатель разрешающей способности маркера (Rp) / Resolving power (Rp)	Маркерный индекс (MI) / Marker index (MI)
SCoT 06	1,27	0,19	0,28	4,40	0,005
SCoT 23	1,26	0,18	0,31	2,80	0,007
SCoT 13	1,36	0,20	0,36	1,60	0,012
SCoT 32	1,47	0,27	0,37	3,50	0,016
SCoT 35	1,38	0,23	0,31	4,90	0,007
SCoT 15	1,16	0,12	0,35	1,07	0,01
SCoT 02	1,63	0,34	0,37	3,60	0,02
SCoT 17	1,43	0,25	0,34	4,80	0,009
SCoT 20	1,46	0,27	0,37	5,60	0,014
Среднее Mean	1,38	0,23	0,34	3,59	0,01

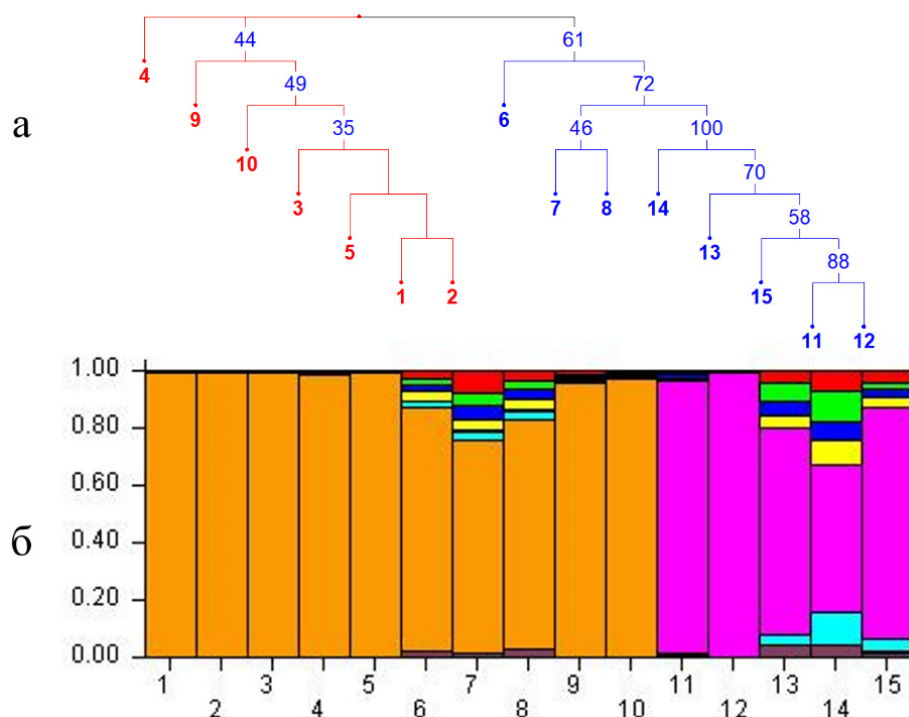


Рис. 2. NJ дендрограмма (а) и генетическая структура (б) сортов райграса пастбищного и однолетнего по результатам генотипирования с использованием SCoT-маркеров.

Цветовые коды соответствуют выявленным кластерам, цифровые – названиям сортов (см. табл. 1)

Fig. 2. Neighbor-Joining dendrogram (a) and genetic structure (б)

of *Lolium perenne* L. and *L. multiflorum* Lam. var. *westerwoldicum* Wittm. cultivars based on the SCoT analysis.

Color codes represent the identified clusters, and digital codes indicate the names of cultivars (see Table 1)

относящиеся к виду райграс многолетний ('ВИК 22', 'Ленинградский 809' и 'Вея').

Анализ результатов методом Evanno с помощью онлайн-ресурса Structure Harvester показал, что наиболее вероятным оказывается разделение исследуемой коллекции на 8 кластеров (см. рис. 2, б). Структура частот аллелей распределилась в основном в соответствии с видовой принадлежностью исследуемых сортов. При этом, как и при построении дендрограммы генетического сходства, в коллекции образцов райграса пастбищного

выделялись сорта 'ВИК 22', 'Ленинградский 809', 'Вея'. Внутри группы, состоящей из образцов райграса однолетнего, обнаружена разнородность генетической структуры сортов 'Roznovsky', 'Sprint' и 'Изорский'.

На основе общих данных бинарных матриц (скрининг с использованием SSR- и SCoT-маркеров) проведен анализ методом главных координат (PCoA-анализ), который позволил в графической форме с минимальным искажением визуализировать генетические взаимосвязи между образцами исследуемой коллекции (рис. 3).

Principal Coordinates (PCoA)

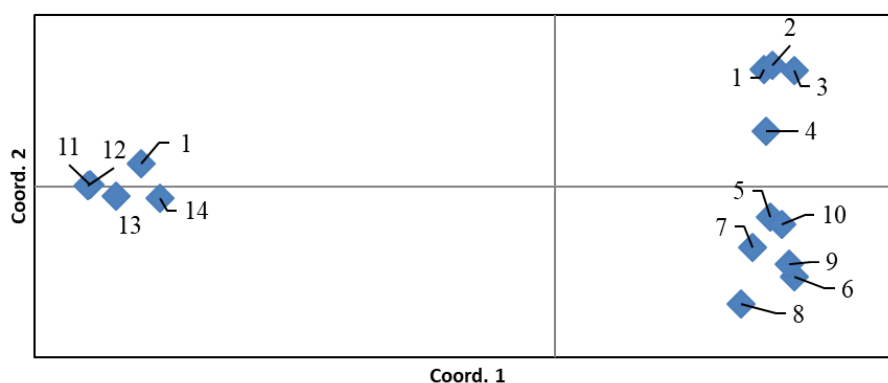


Рис. 3. Результаты PCoA-анализа сортов райграса на основе данных, полученных при генотипировании с использованием SSR- и SCoT-маркеров: 1 – 'Агат'; 2 – 'Дуэт'; 3 – 'ВИК 66'; 4 – 'Карат'; 5 – 'Феникс'; 6 – 'ВИК 22'; 7 – 'Ленинградский 809'; 8 – 'Вея 74'; 9 – 'Веймар'; 10 – 'Виль'; 11 – 'Рапид'; 12 – 'Московский 74'; 13 – 'Raznovsky'; 14 – 'Spirit'; 15 – 'Изорский'

Fig. 3. PCoA analysis of ryegrass cultivars based on using SSR and SCoT markers: 1 – 'Agat'; 2 – 'Duet'; 3 – 'VIK 66'; 4 – 'Karat'; 5 – 'Feniks'; 6 – 'VIK 22'; 7 – 'Leningradsky 809'; 8 – 'Veya'; 9 – 'Veymar'; 10 – 'Vyl'; 11 – 'Rapid'; 12 – 'Moskovsky 74'; 13 – 'Raznovsky'; 14 – 'Spirit'; 15 – 'Izorsky'

Значения первых двух координат многомерной диаграммы сходства составляли 44,4% и 10,2%. Таким образом, суммарно они объясняют 54,6% общей молекулярной вариации. По результатам PCoA-анализа изучаемые сорта разделились на три группы. Первая объединила сорта райграса однолетнего ('Рapid', 'Московский 74', 'Raznovsky', 'Spirit', 'Изорский'), что соответствовало результатам кластеризации при использовании SSR- и SCoT-маркеров по отдельности. Во второй группе оказались образцы райграса пастбищного с наименьшей генетической дистанцией между сортами 'Агат', 'Дуэт', 'ВИК 66'. Сорта 'Феникс', 'Виль', 'Веймар', 'ВИК 22', 'Ленинградский 809' и 'Вея' сгруппировались в обособленный кластер.

Обсуждение

Вследствие самонесовместимой перекрестноопыляемой природы райграса для его популяций характерен высокий уровень генетической гетерогенности (Huff, 1997; Forster et al., 2000; Guthridge, 2001; Kostenko et al., 2016). При проведении молекулярно-генетического анализа таких культур необходимо использовать достаточно репрезентативную выборку генотипов от каждого образца и маркерную систему, обладающую высоким дискриминационным потенциалом (Bolaric et al., 2005; Liu et al., 2018; Konarev, Perchuk, 2018).

В нашей работе при выделении ДНК для каждой повторности опыта использовали по 30 проростков от каждого сорта, что, по данным проведенных ранее исследований, в популяциях перекрестноопыляемых видов позволяет учесть аллели, встречающиеся с частотой не менее 10% (Crossa, 1989; Forster et al., 2001, Muylle et al., 2005; Liu et al., 2018).

При оценке межвидового и межсортового генетического разнообразия показателями, характеризующими эффективность маркера, могут служить выявляемые с его использованием число и частота встречаемости аллелей, ожидаемая гетерозиготность и индекс полиморфизма (PIC). Следует учитывать также меру воспроизводимости результатов и частоту возникающих при анализе ошибок генотипирования (Omasheva et al., 2013).

Среднее значение эффективного числа аллелей в нашем исследовании оказалось несколько выше для SCoT-праймеров и равнялось значению 1,38 (см. табл. 6). При этом показатель гетерозиготности в среднем по каждой из используемых систем приближался к 0,23, что оказалось значительно ниже значений, определенных в работе E. Pasquali с соавторами (Pasquali et al., 2022). Исследователи анализировали по 47 индивидуальных генотипов от каждого из 14 сортов райграса пастбищного с применением микросателлитных маркеров и обнаружили, что параметры эффективного числа аллелей и ожидаемой гетерозиготности составляли в среднем 19,9 и 0,65 соответственно. Вероятно, существенные различия в результатах анализа можно объяснить спецификой используемого в работе материала и особенностями применения «балк-стратегии», которая не всегда дает возможность учета редких аллелей, встречающихся в популяции (Sweeney, Danneberger, 1994; Kölliker et al., 2001).

Величина меры информационного полиморфизма, характеризующая способность маркера выявлять различия на генетическом уровне, оказалась выше для системы SCoT-маркирования и составила в среднем 0,34. При этом в работах по анализу генотипов *Dactylis glomerata* L. с помощью данной техники сообщается о значении меры информационного полиморфизма, равном

в среднем 0,904, что превышает показатели, полученные в нашей работе (Jiang et al., 2014).

Средние значения PIC, рассчитанные для SSR-маркеров в нашем исследовании, сопоставимы с величинами, определенными в работах других исследователей при генотипировании образцов злаковых трав. Так, Gang Nie с соавторами для оценки генетической изменчивости 6 сортов райграса однолетнего с использованием 29 микросателлитных маркеров определили среднее значение показателя информативности как 0,304 (Nie et al., 2019).

Показатель разрешающей способности праймеров, позволяющий выявлять полиморфизм у большого числа генотипов, оказался выше на 40% при использовании микросателлитных маркеров. Маркерный индекс, отражающий общую пригодность системы в качестве инструмента анализа конкретной культуры, был равнозначным у используемых маркеров (0,01), но значительно ниже значений этого показателя, приведенных в работе при анализе 24 генотипов овсяницы тростниковой с системой маркирования EST-SSR (Pirnajmedin et al., 2020).

Результаты кластерного анализа (см. рис. 1, а; 2, а) на основе генетических дистанций позволили распределить исследуемые сорта в соответствии с их видовой принадлежностью, уровнем пloidности и основными хозяйственно ценными признаками. При этом дендрограмма, полученная при использовании данных SSR-анализа, дифференцировала образцы по видам. Так, в отдельную подгруппу выделились сорта, относящиеся к райграсу однолетнему. Обособленной группой расположились тетраплоидные образцы райграса пастбищного селекции ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса» ('Агат', 'Дуэт', 'ВИК 66' и 'Карат'). В общий кластер объединились сорта этого же вида, из разных географических регионов страны – 'Веймар', 'Виль', 'Ленинградский 809'. Они характеризуются общим ценным признаком – повышенной зимостойкостью. В этой же группе оказались тетраплоидный образец 'Вея' и диплоидный 'ВИК 22'. Возможно, их генетическая близость обусловлена схожим географическим происхождением исходного материала, поскольку сорт 'Вея' получен в Калининградском НИИСХ, а для селекции сорта 'ВИК 22' использовались дикорастущие формы райграса из Прибалтики. Генетически удаленным от исследуемых образцов оказался тетраплоидный сорт райграса пастбищного 'Феникс', выведенный из сложного гибридных популяций методом отбора по признакам долголетия и зимостойкости.

На дендрограмме, построенной по результатам анализа с использованием SCoT-маркеров, наблюдались две отдаленно расположенные группы образцов (см. рис. 2, а). В первой объединились сорта райграса пастбищного, во второй – преимущественно однолетнего и три представителя другого вида. Среди них наиболее близкими с 46-процентной бутстреп-поддержкой оказались сорта 'Вея' и 'Ленинградский 809'. Вероятно, в исходном материале для селекции этих сортов присутствовали формы райграса однолетнего. В этом же кластере разместился диплоидный сорт 'ВИК 22' (бутстреп-поддержка 61%). При этом наиболее генетически близкими в группе райграса однолетнего оказались высокоурожайный сорт 'Рapid' и 'Московский 74' селекции ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса». Помимо них в данном подкластере присутствуют образцы зарубежной селекции 'Sprint' (Дания) и 'Raznovsky' (Чехия), а также отечественный диплоидный сорт 'Изорский'.

По итогам изучения генетической структуры сортового материала на основе байесовской модели и метода

Evanno определено наиболее вероятное число кластеров, которое при анализе с SSR-маркерами составило 9, а со SCoT-маркерами – 8 (см. рис. 1, б; 2, б). В обоих случаях наблюдалась четкая дифференциация сортов в зависимости от их видовой принадлежности. Микросателлитные маркеры выявляли большую гетерогенность сортов райграса пастбищного. Напротив, сорта, относящиеся к виду райграса однолетнего, выделялись на графике по результатам амплификации со SCoT-праймерами. Это, вероятно, объясняется принципом действия праймеров, маркирующих различные участки генома.

Многомерная диаграмма генетических взаимосвязей (PCoA), полученная на основе объединенных результатов анализа с SSR- и SCoT-маркерами, распределила исследуемый материал на три группы. На графике главных координат, как и в случае использования микросателлитных локусов, наблюдается четкая дифференциация сортов по видам. Так, в первой группе расположились сорта райграса однолетнего ('Рапид', 'Московский 74', 'Raznovsky', 'Spirit', 'Изорский'). Вторая группа объединила сорта вида райграса пастбищный, полученные селекционерами ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса ('Агат', 'Дуэт', 'ВИК 66', 'Карат'). В третьей группе наиболее генетически близкими оказались диплоидные сорта 'Веймар' и 'ВИК 22', а также тетраплоидные 'Феникс' и 'Выль'. Кроме них в данной группе расположились зимостойкие образцы 'Ленинградский 809' и 'Вей'.

При оценке эффективности используемых маркеров учитывалась их способность выявлять уникальные аллели для отдельных сортов. Максимальным числом сортоспецифичных аллелей – 34 (30,9%) – характеризовались микросателлитные локусы. Полученное соотношение общего количества аллелей к уникальным несколько превышало эти показатели, определенные по результатам других исследований (Jones et al., 2001; Guo et al., 2016; Nie et al., 2019). При этом для всех образцов райграса пастбищного и однолетнего удалось обнаружить уникальные наборы аллелей (ДНК-профили), позволяющие их идентифицировать.

Заключение

На основании результатов исследования можно заключить, что SSR- и SCoT-маркеры имеют достаточный дискриминационный потенциал для успешного использования при изучении генетического разнообразия сортов райграса пастбищного и однолетнего. Установлено, что по величине затрат, трудоемкости и сложности проведения анализа используемые техники равноценны. Более информативными в качестве инструмента идентификации сортов оказались микросателлитные маркеры. С их помощью удалось обнаружить уникальные аллели для 14-ти образцов райграса, тогда как со SCoT-маркерами сортоспецифичные аллели выявлены для шести образцов.

Дендрограмма, построенная методом ближайших соседей (Neighbor-Joining – NJ), и моделирование в программе Structure v.2.3.4 по результатам оценки полиморфизма с использованием обобщенных данных анализа на основе SSR- и SCoT-маркеров позволили уточнить филогенетические взаимоотношения между сортами райграса и определить генетическую структуру анализируемой коллекции.

Многомерная диаграмма сходства (PCoA) на основе объединенных бинарных матриц с применением двух систем маркирования визуализировала генетические

дистанции между образцами, которые разделились по трем группам согласно видовой принадлежности, уровню пloidности, происхождению и сходству по основным признакам.

Совместное применение ДНК-маркеров разных типов для молекулярно-генетического анализа позволяет увеличить охват различающихся по своей природе участков генома, повышает вероятность выявления полиморфизма и точность оценки филогенетических связей внутри анализируемой группы образцов. Результаты изучения генетической структуры коллекции образцов райграса имеют практическое значение для селекции, сохранения и рационального использования генофонда этой ценной злаковой культуры.

References / Литература

- Amar M.H., Biswas M.K., Zhang Z., Guo W.W. Exploitation of SSR, SRAP and CAPS-SNP markers for genetic diversity of *Citrus* germplasm collection. *Scientia Horticulturae*. 2011;128(3):220-227. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.01.021
- Amiryousefi A., Hyvönen J., Pocza P. iMEC: Online marker efficiency calculator. *Applications in Plant Sciences*. 2018;6(6):e01159. DOI: 10.1002/aps3.1159
- Bolaric S., Barth S., Melchinger A.E., Posselt U.K. Molecular genetic diversity within and among German ecotypes in comparison to European perennial ryegrass cultivars. *Plant Breeding*. 2005;124(3):257-262. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2005.01108.x
- Bostan C., Rechitean D., Istrate-Schiller C., Horablaga N.M., Bordean M.D., Bostan Pinisoara N. et al. Feed quality and productivity in some varieties of Italian ryegrass – *Lolium multiflorum* Lam. *Life Science and Sustainable Development*. 2022;3(2):107-113. DOI: 10.58509/lssd.v3i2.215
- Collard B.C.Y., Mackill D.J., Start codon targeted (Scot) polymorphism: a simple, novel DNA marker technique for generating gene-targeted markers in plants. *Plant Molecular Biology Reporter*. 2009;27(1):86-93. DOI: 10.1007/s11105-008-0060-5
- Crossa J. Methodologies for estimating the sample size required for genetic conservation of outbreeding crops. *Theoretical and Applied Genetics*. 1989;77:153-161. DOI: 10.1007/BF00266180
- Dyachenko O.V., Dronov A.V., Slezko E.I. Cultivation of perennial mixtures as an effective method of forage production in the Bryansk region. *VESTNIK of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2016;6(58):29-33. [in Russian] [Дьяченко О.В., Дронов А.В., Слэзко Е.И. Возделывание многолетних травосмесей как способ эффективного обеспечения кормопроизводства Брянской области. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016;6(58):29-33].
- Earl D.A., VonHoldt B.M. Structure Harvester: a website and program for visualizing STRUCTURE output and implementing the Evanno method. *Conservation Genetics Resources*. 2012;4(2):359-361. DOI: 10.1007/s12686-011-9548-7
- Evanno G., Regnaut S., Goudet J. Detecting the number of clusters of individuals using the software STRUCTURE: a simulation study. *Molecular Ecology*. 2005;14(8):2611-2620. DOI: 10.1111/j.1365-294X.2005.02553.x
- Falush D., Stephens M., Pritchard J.K. Inference of population structure using multilocus genotype data: linked loci and correlated allele frequencies. *Genetics*. 2003;164(4):1567-1587. DOI: 10.1093/genetics/164.4.1567

- Fojtík A. Methods of grass improvement used at the Plant Breeding Station Hladké Životice. *Genetica Polonica*. 1994;35(A):25-31.
- Forster J.W., Jones E.S., Kölliker R., Drayton M.C., Dumsday J.L., Dupal M.P. et al. Development and implementation of molecular markers for forage crop improvement. In: G. Spandenberg (ed.). *Molecular Breeding of Forage Crops: Developments in Plant Breeding. Vol. 10. Proceedings of the 2nd International Symposium, Lorne and Hamilton, Victoria, Australia, November 19–24, 2000*. Dordrecht: Springer; 2000. p.101-133. DOI: 10.1007/978-94-015-9700-5_6
- Forster J.W., Jones E.S., Kölliker R., Drayton M.C., Dupal M.P., Guthridge K.M. et al. Application of DNA profiling to an outbreeding forage species. In: R.J. Henry (ed.). *Plant Genotyping: the DNA Fingerprinting of Plants*. Oxford: CAB; 2001. p.299-320. DOI: 10.1079/9780851995151.0299
- Guo Z.H., Fu K.X., Zhang X.Q., Zhang C.L., Sun M., Huang T. et al. SSRs transferability and genetic diversity of three allogamous ryegrass species. *Comptes Rendus Biologies*. 2016;339(2):60-67. DOI: 10.1016/j.crvi.2015.12.004
- Guthridge K.M., Dupal M.P., Kölliker R., Jones E.S., Smith K.F., Forster J.W. AFLP analysis of genetic diversity within and between populations of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Euphytica*. 2001;122:191-201. DOI: 10.1023/A:1012658315290
- Huff D.R. RAPD characterization of heterogenous perennial ryegrass cultivars. *Crop Science*. 1997;37(2):557-564. DOI: 10.2135/cropsci1997.0011183X003700020041x
- Jiang L.F., Qi X., Zhang X.Q., Huang L.K., Ma X., Xie W.G. Analysis of diversity and relationships among orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) accessions using start codon-targeted markers. *Genetics and Molecular Research*. 2014;13(2):4406-4418. DOI: 10.4238/2014.June.11.4
- Jones E.S., Dupal M.P., Kölliker R., Drayton M.C., Forster J.W. Development and characterisation of simple sequence repeat (SSR) markers for perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 2001;102:405-415. DOI: 10.1007/s001220051661
- Kilchevsky A.V., Khotyleva L.V. (eds). Genetic foundations of plant breeding (Geneticheskiye osnovy seleksii rasteniy). Minsk: National Academy of Sciences of Belarus; 2012. [in Russian] [Генетические основы селекции растений / под ред. А.В. Кильчевского, Л.В. Хотылевой. Минск: Национальная академия наук Беларуси; 2012].
- Klimenko I.A., Kozlov N.N., Kostenko S.I., Shamustakimova A.O., Mavlyutov Y.M. Identification and certification of forage grasses (meadow clover, alfalfa, sowing and hop) based on DNA markers: guidelines. Lobnya: Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology; 2020. [in Russian] (Клименко И.А., Козлов Н.Н., Костенко С.И., Шамустакимова А.О., Мавлютов Ю.М. Идентификация и паспортизация сортов кормовых трав (клевера лугового, люцерны изменчивой, посевной и хмелевидной) на основе ДНК-маркеров: методические рекомендации. Лобня: Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса; 2020). DOI: 10.33814/978-5-6043194-9-9
- Klimenko I.A., Kozlov N.N., Shamustakimova A.O., Dushkin V.A. Investigation of forage crops genetic diversity using molecular DNA markers. *Adaptive Fodder Production*. 2019;(4):89-100. [in Russian] (Клименко И.А., Козлов Н.Н., Шамустакимова А.О., Душкин В.А. *Адаптивное кормопроизводство*. 2019;(4):89-100). DOI: 10.33814/AFP-2222-5366-2019-4-89-100
- Kölliker R., Jones E.S., Jahufer M.Z.Z., Forster J.W. Bulked AFLP analysis for the assessment of genetic diversity in white clover (*Trifolium repens* L.). *Euphytica*. 2001;121(3):305-315. DOI: 10.1023/A:1012048103585
- Konarev A.V., Perchuk I.N. Protein markers are an effective tool for assessing the state of *in situ* and *ex situ* genetic diversity, seed quality, as well as supporting the breeding process in cereal grasses (Belkovye markery – effektivnyy instrument otsenki sostoyaniya *in-situ* i *ex-situ*-geneticheskogo raznoobraziya, kachestva semenovodstva, a takzhe soprovozhdeniya selektsionnogo protsessu u zlakovykh trav). In: *The current state and prospects for development of meadow fodder production in the 21st century. Proceedings of the Scientific and Practical Conference (Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya lugovogo kormoproizvodstva v XXI veke. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii)*. St. Petersburg: St. Petersburg State Agrarian University; 2018. p.57-65. [in Russian] (Конарев А.В., Перчук И.Н. Белковые маркеры – эффективный инструмент оценки состояния *in-situ* и *ex-situ*-генетического разнообразия, качества семеноводства, а также сопровождения селекционного процесса у злаковых трав. Современное состояние и перспективы развития лугового кормопроизводства в XXI веке. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; 2018. С.57-65).
- Kosolapov V.M., Kostenko S.I., Pilipko S.V. Adaptive variety of food and herbs for extreme conditions of Russia. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2013a;(7):71-73. [in Russian] (Косолапов В.М., Костенко С.И., Пилипко С.В. Адаптивные сорта кормовых трав для экстремальных условий России. *Достижения науки и техники АПК*. 2013a;(7):71-73).
- Kosolapov V.M., Shamsutdinov Z.Sh., Kostenko S.I., Pilipko S.V., Tyurin Yu.S., Piskovatsky Yu.M., Novoselov M.Yu., Kozlov N.N., Perepravo N.I., Solozhentseva L.F., Stepanova G.V., Korovina V.L., Klochkova V.S., Drobysheva L.V., Zyatchina G.P., Piskovatskaya R.G., Starshinova O.A., Makaeva A.M., Shmatkova A.A., Volovik V.T., Sergeeva S.E., Zolotarev V.N., Shamsutdinova E.Z., Razgulyaeva N.V., Kostenko N.Yu., Putsa N.M., Korenev V.B., Ivanov I.S., Saprykina N.V., Truzina L.A., Chuykov V.A., Georgiadi N.I. Fodder crop cultivars bred at the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology (Sorta kormovykh kultur seleksii FGBNU “Federalny nauchnyy tsentr kormoproizvodstva i agroekologii imeni V.R. Vilyamsa”). Lobnya: Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology; 2019. [in Russian] (Косолапов В.М., Шамсутдинов З.Ш., Костенко С.И., Пилипко С.В., Тюрин Ю.С., Писковацкий Ю.М., Новоселов М.Ю., Козлов Н.Н., Переправо Н.И., Соложенцева Л.Ф., Степанова Г.В., Коровина В.Л., Ключкова В.С., Дробышева Л.В., Зятчина Г.П., Писковацкая Р.Г., Старшинова О.А., Макаева А.М., Шматкова А.А., Воловик В.Т., Сергеева С.Е., Золотарев В.Н., Шамсутдинова Э.З., Разгуляева Н.В., Костенко Н.Ю., Пуца Н.М., Корнев В.Б., Иванов И.С., Сапрыкина Н.В., Трузина Л.А., Чуйков В.А., Георгиади Н.И. Сорта кормовых культур селекции ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса»: монография. Лобня: Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса; 2019). URL: <https://www.vniikormov.ru/pdf/sorta-kormovykh-kultur-seleksii-vik.pdf> [дата обращения: 16.02.2023].
- Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S. Balanced development to forage production (Kormoproizvodstvu – sba-

- lansirovannoye razvitiye). *APK: Ekonomika, upravleniye = AIC: Economics, Management*. 2013b;(7):15-23. [in Russian] [Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С. Кормопроизводству – сбалансированное развитие. *АПК: Экономика, управление*. 2013b;(7):15-23].
- Kostenko S.I., Kosolapov V.M., Pilipko S.V., Kostenko E.S. Breeding perennial gramineous for adaptive forage production. *Fodder Production*. 2016;(8):35-39. [in Russian] [Костенко С.И., Косолапов В.М., Пилипко С.В., Костенко Е.С. Селекция многолетних злаковых трав для адаптивного кормопроизводства. *Кормопроизводство*. 2016;(8):35-39].
- Kubik C., Sawkins M., Meyer W.A., Gaut B.S. Genetic diversity in seven perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) cultivars based on SSR markers. *Crop Science*. 2001;41(5):1565-1572. DOI: 10.2135/cropsci2001.4151565x
- Lauvergeat V., Barre P., Bonnet M., Ghesquière M. Sixty simple sequence repeat markers for use in the *Festuca-Lolium* complex of grasses. *Molecular Ecology Notes*. 2005;5(2):401-405. DOI: 10.1111/j.1471-8286.2005.00941.x
- Liu S., Feuerstein U., Luesink W., Schulze S., Asp T., Studer B. et al. DArT, SNP, and SSR analyses of genetic diversity in *Lolium perenne* L. using bulk sampling. *BMC Genetics*. 2018;19(1):10. DOI: 10.1186/s12863-017-0589-0
- Loera-Sánchez M., Studer B., Kölliker R. DNA-based assessment of genetic diversity in grassland plant species: challenges, approaches, and applications. *Agronomy*. 2019;9(12):881. DOI: 10.3390/agronomy9120881
- Muyllé H., Baert J., Van Bockstaele E., Moerkerke B., Goetghebeur E., Roldán-Ruiz I. Identification of molecular markers linked with crown rust (*Puccinia coronata* f. sp. *lolii*) resistance in perennial ryegrass (*Lolium perenne*) using AFLP markers and a bulked segregant approach. *Euphytica*. 2005;143(1):135-144. DOI: 10.1007/s10681-005-3058-1
- Nie G., Huang T., Ma X., Huang L., Peng Y., Yan Y. et al. Genetic variability evaluation and cultivar identification of tetraploid annual ryegrass using SSR markers. *PeerJ*. 20019;7:e7742. DOI: 10.7717/peerj.7742
- Omasheva M.E., Aubakirova K.P., Ryabushkina N.A. Molecular markers. Causes and consequences of genotyping errors (Molekulyarnye markery. Prichiny i posledstviya oshibok genotipirovaniya). *Biotechnology. Theory and Practice*. 2013;(4):20-28. [in Russian] [Омашева М.Е., Аубакирова К.П., Рябушкина Н.А. Молекулярные маркеры. Причины и последствия ошибок генотипирования. *Биотехнология. Теория и практика*. 2013;(4):20-28]. DOI: 10.11134/btp.4.2013.3
- Pasquali E., Palumbo F., Barcaccia G. Assessment of the genetic distinctiveness and uniformity of pre-basic seed stocks of Italian ryegrass varieties. *Genes*. 2022;13(11):2097. DOI: 10.3390/genes13112097
- Peakall R., Smouse P.E. GenA1Ex 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
- Perrier X., Jacquemoud-Collet J.P. DARwin software. Paris: CIRAD; 2006. Available from: <https://darwin.cirad.fr/> [accessed Mar. 02, 2023].
- Pirnajmedin F., Majidi M.M., Barre P., Kölliker R., Saeidi G. Enhanced polycross breeding of tall fescue through marker-based paternity identification and estimation of combining ability. *Euphytica*. 2020;216(9):139. DOI: 10.1007/s10681-020-02671-1
- Pritchard J.K., Stephens M., Donnelly P. Inference of population structure using multilocus genotype data. *Genetics*. 2000;155(2):945-959. DOI: 10.1093/genetics/155.2.945
- Safari H., Zebajadi A., Kahrizi D., Jafari A.A. The study of inter-specific relationships of Bromus genus based on SCoT and ISSR molecular markers. *Molecular Biology Reports*. 2019;46(5):5209-5223. DOI: 10.1007/s11033-019-04978-2
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage: [website]. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию: [сайт]). URL: <https://reestr.gossortrf.ru> [дата обращения 01.02.2023].
- Studer B., Asp T., Frei U., Hentrup S., Meally H., Guillard A., et al. Expressed sequence tag-derived microsatellite markers of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Molecular Breeding*. 2008;21:533-548. DOI: 10.1007/s11032-007-9148-0
- Sukhareva A.S., Kuluev B.R. DNA markers for genetic analysis of crops. *Biomics*. 2018;10(1):69-84. [in Russian] [Сухарева А.С., Кулуев Б.Р. ДНК-маркеры для генетического анализа сортов культурных растений. *Биомика*. 2018;10(1):69-84]. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2018-15
- Sweeney P.M., Danneberger T.K. Random amplified polymorphic DNA in perennial ryegrass: A comparison of bulk samples vs. individuals. *Horticultural Science*. 1994;29(6):624-626. DOI: 10.21273/HORTSCI.29.6.624
- Wang J., Dobrowolski M.P., Cogan N.O., Forster J.W., Smith K.F. Assignment of individual genotypes to specific forage cultivars of perennial ryegrass based on SSR markers. *Crop Science*. 2009;49(1):49-58. DOI: 10.2135/cropsci2008.03.0177
- Yan H., Zhang Y., Zeng B., Yin G., Zhang X., Ji Y. et al. Genetic diversity and association of EST-SSR and SCoT markers with rust traits in orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.). *Molecules*. 2016;21(1):66. DOI: 10.3390/molecules21010066
- Zeng B., Zhang Y., Huang L.K., Jiang X.M., Luo D., Yin G. Genetic diversity of orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) germplasms with resistance to rust diseases revealed by Start Codon Targeted (SCoT) markers. *Biochemical Systematics and Ecology*. 2014;54(1):96-102. DOI: 10.1016/j.bse.2013.12.028

Информация об авторах

Юлиан Муратович Мавлютов, научный сотрудник, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса, 141055 Россия, Московская область, Лобня, Научный городок, корпус 1, аспирант, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550 Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 49, yulian92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5695-6242>

Елена Александровна Вертикова, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550 Россия, Москва, ул. Тимирязевская, 49, vertikova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2457-7253>

Анастасия Олеговна Шамустакимова, научный сотрудник, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса, 141055 Россия, Московская область, Лобня, Научный городок, корпус 1, nastja_sham@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3535-3108>

Ирина Александровна Клименко, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией, Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии им. В.Р. Вильямса, 141055 Россия, Московская область, Лобня, Научный городок, корпус 1, iaklimenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1850-3859>

Information about authors

Yulian M. Mavlyutov, Researcher, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Bldg. 1, Scientific Campus, Lobnya, Moscow Province 141055, Russia, Postgraduate Student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, yulian92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5695-6242>

Elena A. Vertikova, Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya St., Moscow 127550, Russia, vertikovaea@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2457-7253>

Anastasia O. Shamustakimova Researcher, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Bldg. 1, Scientific Campus, Lobnya, Moscow Province 141055, Russia, nastja_sham@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3535-3108>

Irina A. Klimenko, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology, Bldg. 1, Scientific Campus, Lobnya, Moscow Province 141055, Russia, iaklimenko@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1850-3859>

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 03.05.2023; одобрена после рецензирования 22.07.2023; принята к публикации 04.09.2023.
The article was submitted on 03.05.2023; approved after reviewing on 22.07.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 632.51:581.6:528.9(470)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-161-168



Структура сегетальной флоры полевых культур степной зоны Краснодарского края

Н. Н. Лунева, Т. Ю. Закота

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Наталья Николаевна Лунева, natalja.luneva2010@yandex.ru

Представлен сравнительный анализ видового состава сегетальной флоры обследованной территории степной зоны Краснодарского края и сегетальной флоры всего Краснодарского края, выявленной по материалам многочисленных научных публикаций. Основная часть флористических спектров обеих сегетальных флор совпадает по составу десяти ведущих семейств, что свидетельствует об их единстве. Лидирующие позиции в группе ведущих семейств занимают семейства Asteraceae Dumort., Poaceae Barnhart, Fabaceae Lindl. и Brassicaceae Burnett. Рассмотрена флористическая общность видового состава сорных растений между сегетальными флорами в посевах разных типов полевых культур. Кроме того, определены виды с высокой степенью постоянства в агроценозах каждой полевой культуры. Выявленные виды являются объектами фитосанитарного риска для целого ряда полевых культур или некоторых из них в степной зоне Краснодарского края. Наиболее распространенными сорными растениями в посевах всех обследованных культур являются вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.), амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.), бодяк щетинистый (*Cirsium setosum* (Willd.) Bess.), просо куриное (*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.). Информация о прогнозируемых широко распространенных видах в посевах определенной культуры позволит планировать объемы производства или закупки средств защиты, ориентируясь на группы доминирующих по распространению видов, предвидеть возможные изменения при реформировании структуры посевных площадей, нарушении мелиоративной системы и схем севооборотов и т. п.

Ключевые слова: сорные растения, флористический анализ, многолетний прогноз, флористическое сходство

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания согласно бюджетному проекту ВИЗР по теме № FGEU-2022-0002. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Лунева Н.Н., Закота Т.Ю. Структура сегетальной флоры полевых культур степной зоны Краснодарского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):161-168. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-161-168

SYSTEMATICS, PHYLOGENY AND GEOGRAPHY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-161-168

The structure of the segetal flora of field crops in the steppe zone of Krasnodar Territory

Natalya N. Luneva, Tatyana Yu. Zakota

All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Natalya N. Luneva, natalja.luneva2010@yandex.ru

A comparative analysis of the species composition of the segetal flora of the surveyed steppe zone and the segetal flora of the entire Krasnodar Territory based on the materials of numerous scientific publications is presented. The main part of the floristic spectra of both segetal floras coincides in the composition of the 10 leading families, which attests to their unity. The leading families in the compared lists are Asteraceae Dumort., Poaceae Barnhart, Fabaceae Lindl., and Brassicaceae Burnett. Floristic homogeneity of the weed species compositions between the segetal floras in the areas under different types of field crops is considered. Besides, species with a high degree of permanency in the agrocenoses of each field crop have been identified. These species are objects of phytosanitary risk for a number of field crops or some of them in the steppe zone of Krasnodar Territory. The most common weeds in the fields of all surveyed crops are field bindweed (*Convolvulus arvensis* L.), common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), bristly thistle (*Cirsium setosum* (Willd.) Bess.), and cockspur grass (*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.). Information about the predicted widespread species in the fields under a certain crop will make it possible to plan the volume of production or purchase of protective means focusing on groups of dominant species, and anticipate possible changes in the reformatting of the acreage structure, violations of the reclamation system and crop rotation schemes, etc.

Keywords: weeds, floristic analysis, long-term forecast, floristic similarity

Acknowledgements: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state task assigned to the All-Russian Institute of Plant Protection (Theme No. FGEU-2022-0002). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Luneva N.N., Zakota T.Yu. The structure of the segetal flora of field crops in the steppe zone of Krasnodar Territory. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):161-168. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-161-168

Введение

Подход к сорным растениям не только как к вредным объектам, а как к дикорастущим видам растений, приуроченным к вторичным (нарушенным) местообитаниям, начал разрабатываться еще в прошлом веке (Maltsev, 1932; Grossheim, 1948; Nikitin, 1983; Ulyanova, 1998), но окончательно сформировался лишь в начале XXI столетия (Luneva, 2018). На его основе строится понятие «сорной флоры» как территориальной совокупности видов растений, приуроченных к местообитаниям определенного типа, так называемого экологического элемента региональной флоры (Kamelin, 2017), которое впервые было использовано в исследованиях по фитосанитарному районированию сорных растений (Luneva, 2021).

Исследования в области защиты растений осуществляются главным образом на территории агроландшафтов, включающих кроме земель, предназначенных для получения сельскохозяйственной продукции, также земли, на которых осуществляется деятельность, способствующая получению этой продукции (Nikolaev, 1999). Поэтому сорные растения в отдельной агроэкосистеме, как экосистеме агроландшафта, формируют агроценозы на территориях мест возделывания сельскохозяйственных растений и фитоценозы на других вторичных местообитаниях (Mirkin et al., 2003). Распространенность сорных растений в пределах агроэкосистемы обусловлена разнообразием типов и степенью нарушенности этих местообитаний (Veselova, 2013), основными из которых являются сеgetальные (под возделываемыми сельскохозяйственными культурами) и рудеральные. Самые большие площади сельскохозяйственных угодий отводятся под полевые культуры. Общим фоновым признаком, объединяющим все местообитания, где выращиваются эти культуры, является ежегодное или периодическое (многолетние кормовые травы) нарушение растительного и почвенного покрова. Сеgetальные местообитания под выращиванием полевых культур подразделяются по типу нарушения почвенного и растительного покрова на две большие группы, формируемые технологиями возделывания двух основных типов полевых культур – сплошного сева и пропашных. Фоновым признаком, объединяющим местообитания под возделыванием культур сплошного сева в экотоп, является целостность почвенного и растительного покрова поля в период после посева и до уборки урожая, в отличие от полей под пропашными культурами, объединяемыми в экотоп на основе другого фонового признака – неоднократного нарушения почвенного и растительного покровов путем междурядных обработок в период между посевом и уборкой.

Совокупность сорных растений, приуроченных к определенному экотопу, образует флористический комплекс экотопа, или флору экотопа (Yurtsev, Kamelin, 1991), которую принято называть парциальной флорой (Yurtsev, Semkin, 1980). Следовательно, сорные растения, произрастающие в экотопе, объединяющем все сеgetальные местообитания агроэкосистемы, образуют парциальную сеgetальную флору, подразделяемую на парциальные флоры экотопов культур сплошного сева и пропашных. Фоновой характеристикой формирования местообитаний следующего уровня являются условия технологий возделывания определенной культуры: картофеля, сои, подсолнечника, кукурузы в группе пропашных, а в группе культур сплошного сева – ярового овса, озимой пшеницы (зерновые культуры) и люцерны (кормо-

вая культура), на которых происходит дальнейшая дифференциация сеgetальной флоры.

Поскольку «...практически любые полные территориальные совокупности видов растений, как и их части (комплексы видов), обусловлены экологически и исторически» (Yurtsev, Kamelin, 1991, p. 8), постольку видовой состав подразделений сорной флоры стабилен и, следовательно, прогнозируем.

Целью исследования является изучение структуры сеgetальной флоры полевых культур степной зоны Краснодарского края как основы многолетнего прогноза распространности комплексов видов сорных растений в посевах полевых культур, что имеет практическое значение для региональной системы защиты культивируемых растений от сорных.

Материалы и методы

Материалом для анализа послужили данные обследований агроценозов полевых культур в Славянском, Красноармейском, Каневском районах, расположенных в степной зоне Краснодарского края, осуществленных в 2012–2014 и 2016–2017 гг. Обследовано 290 полей, в том числе: пшеницы озимой – 59, овса – 27, кукурузы – 48, подсолнечника – 55, сои – 39, картофеля – 26, многолетних кормовых трав (люцерны) – 36.

Описания осуществлялись по методике, разработанной и много лет используемой во Всероссийском институте защиты растений (ВИЗР) (Luneva, 2009). Данные обследования полей вносились в БД (Mysnik et al., 2021), где формировались выборки для дальнейшего анализа и осмысления результатов.

Сравнительный анализ видового состава сеgetальной флоры обследованной территории и сеgetальной флоры всего Краснодарского края проведен с использованием массива данных из БД «Сорные растения Российской Федерации в научных источниках» (Luneva et al., 2018), где хранится информация из научных публикаций.

Для выявления флористической общности видового состава сорных растений разных выборок использовался коэффициент Жаккара (Jaccard, 1901), вычисляемый по формуле 1:

$$Kj = \frac{c}{a + b - c}, \quad (1)$$

где: c – общее количество видов в двух выборках;

a – количество видов в первой выборке;

b – количество видов во второй выборке.

Анализ подразделений сеgetальной флоры осуществлен путем сравнения головной части флористических спектров (Schmidt, 1980).

Названия видов сорных растений приведены по сводке, составленной гербологами ВИЗР по материалам научных публикаций классических ботаников, в которых эти названия упорядочены и систематизированы в соответствии с правилами современной ботанической номенклатуры (Luneva, Mysnik, 2018).

Результаты и обсуждение

Сеgetальная флора Краснодарского края, по данным многочисленных научных публикаций (Kosenko, Vasiliev, 1971; Devyatkin et al., 2013; Savva et al., 2017; Pikushova et al., 2020; Kidanova et al., 2021; Zelenskaya et al., 2021; etc.), включает 280 видов сорных растений, входящих в 48 семейств и 165 родов. Сеgetальная флора на обследованной территории

дованной территории степной зоны края включает 206 видов сорных растений, относящихся к 36 семействам, 145 родам.

Количественные различия обусловлены разными по величине территориями, занимаемыми этими флорами, и разным по длительности периодом их обследования. Тем не менее головная часть флористических спектров обеих сеgetальных флор совпадает по составу десяти ведущих семейств, что свидетельствует об их единстве (рисунки).

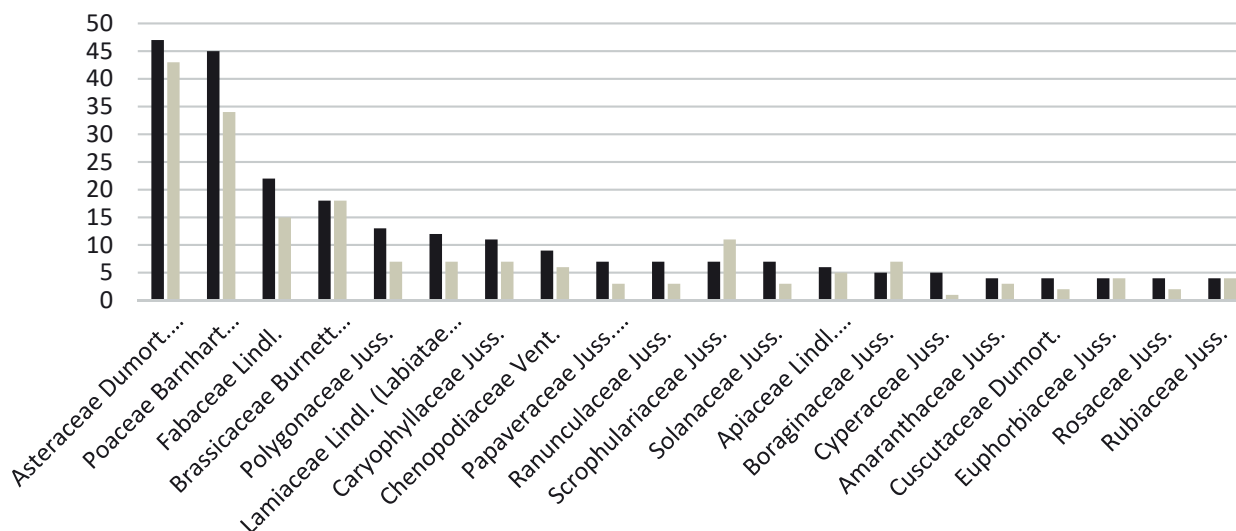


Рисунок. Головные части флористических спектров сеgetальной флоры Краснодарского края (1) по данным научных публикаций и обследованных районов степной зоны Краснодарского края (2) в 2012–2014 и 2016–2017 гг.

Figure. Head parts of floristic spectra in the segetal floras of Krasnodar Territory (1) according to scientific publications and the surveyed areas of the steppe zone of Krasnodar Territory (2) in 2012–2014, and 2016–2017

Из 206 видов сорных растений, входящих в состав сеgetальной флоры полевых культур, 127 видов являются общими для двух основных подразделений этой флоры: сеgetальных парциальных флор, формирующихся в посевах культур сплошного сева и пропашных (коэффициент Жаккара $K_j = 0,61$). При разделении посевов культур сплошного сева на посева зерновых и кормовых бобовых культур количество одинаковых видов в трех типах культур снижается почти вдвое (71 вид), сходство видового состава в посевах зерновых и пропашных культур остается на этом же уровне ($K_j = 60$), но их сходство с видовым составом в посевах кормовых бобовых трав заметно ниже ($K_j = 0,48-0,47$) (табл. 1).

Дальнейшая дифференциация видового состава растений сеgetальной флоры на подразделения, формирующиеся в посевах трех культур сплошного сева, характеризуется снижением флористического сходства: одинаковых видов – 58, $K_j = 0,44-0,53$.

Еще большие различия выявлены между видовым составом сорных растений в подразделениях сеgetальной флоры, формирующихся в посевах пропашных культур: одинаковых видов всего 26, а $K_j = 0,39-0,48$.

Более того, различия между парциальными сеgetальными флорами усугубляются тем, что одни и те же виды в их составе проявляют себя по-разному в каждой флоре: виды, относящиеся к высоким классам постоянства в одной парциальной флоре, то есть встречающиеся на подавляющем большинстве полей под определенной культурой, относятся к низким классам постоянства в парци-

альной флоре, формирующейся в посевах другой культуры (табл. 2).

Все виды, представленные в таблице 2, входят в состав обеих сеgetальных флор, указанных на рисунке, то есть распространены на территории Краснодарского края. Выявлено, что вьюнок полевой, амброзия полыннолистная, бодяк щетинистый, просо куриное – это виды, широко распространенные в посевах всех обследованных культур. Горец птичий, марь белая, щирица запрокинутая, встречаясь в посевах всех полевых культур, широ-

ко распространены лишь в некоторых. Канатник Теофраста, дурман обыкновенный, осот острый, дурнишник зобовидный, чина клубневая, паслен черный, щирица жминдовидная – это виды, более тяготеющие к сеgetальной флоре пропашных культур. Горец почечуйный и пырей ползучий тяготеют к сеgetальным флорам культур сплошного сева. Такие виды, как горчак розовый, трехреберник непахучий, мелкопестник канадский, лисохвост мышехвостниковый, одуванчик лекарственный, пастушья сумка обыкновенная, латук татарский, щетинник сизый, подмаренник цепкий, овес пустой и сокирки полевые, включены в состав всех или большинства рассматриваемых парциальных флор, но охватывают значительные территории только одной из них.

Заключение

Сеgetальная флора обследованной территории степной зоны Краснодарского края, является частью сеgetальной флоры всего края, что подтверждается сходством структуры головной части флористических спектров. Ее дифференциация на ряд парциальных флор, выделяемых на основе фоновых характеристик, показала, что видовые различия между парциальными флорами тем больше, чем больше количество фоновых характеристик лежит в основе выделения этих флор. Сходство парциальных флор, выделенных на основе одного фонового признака – общих различий в технологии возделывания культур сплошного сева и пропашных, заметно выше,

Таблица 1. Показатели флористического сходства подразделений сеgetальной флоры полевых культур (Краснодарский край; 2012–2014 и 2016–2017 гг.)**Table 1.** Indicators of floristic similarity between subdivisions of the segetal flora of field crops (Krasnodar Territory; 2012–2014, and 2016–2017)

Показатели флористического сходства между сеgetальными флорами, формирующимися в посевах разных типов полевых культур				
Тип культуры	Зерновые	Пропашные	Кормовые бобовые	
Количество видов	164	151	106	
Количество одинаковых видов в посевах трех типов культур – 71				
Зерновые	-	0,60	0,48	
Пропашные	116	-	0,47	
Кормовые	88	82	-	
Показатели флористического сходства между сеgetальными флорами, формирующимися в посевах культур сплошного сева				
Название культуры	Пшеница озимая	Овес (яровой)	Люцерна	
Количество видов	155	97	62	
Количество одинаковых видов в посевах трех культур сплошного сева – 58				
Пшеница озимая	-	0,53	0,48	
Овес (яровой)	87	-	0,44	
Люцерна	84	62	-	
Показатели флористического сходства между сеgetальными флорами, формирующимися в посевах разных пропашных культур				
Название культуры	Картофель	Кукуруза	Подсолнечник	Соя
Количество видов	73	88	91	85
Количество одинаковых видов в посевах четырех пропашных культур – 26				
Картофель	-	0,39	0,43	0,42
Кукуруза	45	-	0,44	0,43
Подсолнечник	49	55	-	0,48
Соя	47	52	57	-

Примечание: курсивом выделены показатели количества общих видов в сравниваемых выборках, полужирным текстом – показатели флористического сходства (Kj) сравниваемых выборок

Note: indicators of the number of the species common for the compared samples are italicized, and indicators of floristic similarity (Kj) between the compared samples are boldfaced

чем парциальных флор, формирующихся на основе ряда параметров, обусловленных биологическими особенностями и экологическими предпочтениями отдельных культур. Этим же обусловлены показанные выше различия: одни и те же виды сорных растений, входящие в состав всех парциальных флор, характеризуются разным уровнем охвата территорий отдельных парциальных флор.

Практическая значимость результатов исследования заключается в выявлении основных видов, представляющих собой объекты фитосанитарного риска для целого ряда полевых культур или некоторых из них в степной зоне Краснодарского края. Состав флор в значительной степени стабилен, следовательно его можно прогнозировать. Ранее было показано, что видовой состав сорных растений региона (области, края) эколого-географически обусловлен (Luneva, Mysnik, 2014), поэтому выявленный видовой состав сорных растений степной

зоны Краснодарского края при сохранении климатических условий не изменится в течение длительного времени, а при сохранении уровня технологий возделывания полевых культур широта распространения каждого отдельного вида в посевах отдельной культуры также не изменится.

Полученные результаты дают общую прогнозируемую картину распределения видов сорных растений по территориям парциальных сеgetальных флор, обусловленную фактом существования сеgetальных местообитаний и общих фоновых признаков, обусловленных технологиями возделывания отдельных культур. Безусловно, дальнейший уровень развития видов сорных растений на отдельных сеgetальных местообитаниях зависит от конкретных мероприятий, предпринимаемых в хозяйстве по выращиванию и защите культур.

Однако на региональном уровне полученные результаты являются основой для разработки стратегии

Таблица 2. Виды высоких классов постоянства в подразделениях сегетальной флоры полевых культур
(Краснодарский край; 2012–2014 и 2016–2017 гг.)**Table 2. Species of high-permanency classes in subdivisions of the segetal flora of field crops**
(Krasnodar Territory; 2012–2014, and 2016–2017)

Названия видов сорных растений	Подразделения сегетальной флоры*						
	Ка	Ку	По	Со	Лю	Пш	Ов
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	V	V	V	V	V	IV	V
<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	V	III	IV	V	V	V	V
<i>Cirsium setosum</i> (Willd.) Bess.	V	IV	III	V	V	IV	V
<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) Beauv.	V	V	IV	V	III	III	V
<i>Fallopia convolvulus</i> (L.) A. Loeve	IV	III	II	II	II	II	V
<i>Abutilon theophrasti</i> Medik.	V	IV	V	IV	I	II	V
<i>Datura stramonium</i> L.	V	I	–	–	I	I	–
<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill.	IV	–	I	I	I	I	II
<i>Xanthium strumarium</i> L.	V	III	I	IV	I	I	I
<i>Lathyrus tuberosus</i> L.	V	I	III	V	I	I	I
<i>Solanum nigrum</i> L.	V	–	I	II	I	I	I
<i>Cyperus rotundus</i> L.	–	–	I	IV	–	I	–
<i>Polygonum aviculare</i> L.	II	IV	II	II	II	III	IV
<i>Chenopodium album</i> L.	I	IV	V	III	III	III	IV
<i>Amaranthus blitoides</i> S. Wats.	–	IV	I	II	–	I	I
<i>Amaranthus retroflexus</i> L.	I	III	IV	V	III	III	IV
<i>Persicaria maculata</i> (Rafin.) A. Löve & D. Löve	III	II	III	V	IV	IV	V
<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	III	II	II	III	V	IV	V
<i>Acroptilon repens</i> L.		I	II	II	I	I	V
<i>Tripleurospermum perforatum</i> (Merat) M. Lainz	III	I	II	III	V	II	II
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Crong.	I	II	I	–	V	I	–
<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	–	II	–	I	V	I	II
<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	–	I	–	–	IV	II	–
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medik.	I	I	I	II	III	IV	I
<i>Lactuca tatarica</i> (L.) C.A. Mey.	II	II	II	I	II	II	IV
<i>Setaria pumila</i> (Poir.) Schult	I	III	I	II	–	II	V
<i>Galium aparine</i> L.	II	II	II	I	I	IV	III
<i>Avena fatua</i> L.	I	I	II	I	I	I	IV
<i>Consolida regalis</i> S.F. Grau	–	–	I	I	I	III	V

Примечание: * – приведенные ниже буквенные сочетания обозначают посеы и посадки культур, в которых встречаются подразделения сегетальной флоры: Ка – картофель; Ку – кукуруза; По – подсолнечник; Со – соя; Лю – люцерна; Пш – пшеница озимая; Ов – овес

Note: * – letter combinations below designate crop fields and plantings where the subdivisions of the segetal flora occur: Ка – potato; Ку – maize; По – sunflower; Со – soybean; Лю – alfalfa; Пш – winter wheat; Ов – oats

защиты культивируемых растений от вредного воздействия сорных. Информация о прогнозируемых широко распространенных видах в посевах определенной культуры позволит планировать объемы производства или закупки средств защиты, ориентируясь на группы доминирующих по распространению видов, предвидеть возможные изменения при реформировании структуры полевых площадей, нарушениях мелиоративной системы и схем севооборотов и т. п.

References / Литература

- Devyatkin A.M., Markova I.A., Belyi A.I. Pests, diseases and weeds of the alfalfa agrocenosis: monograph (Vrediteli, bolezni i sornyaki lyutsernovogo agrotsenoza). Krasnodar; 2013. [in Russian] (Девяткин А.М., Маркова И.А., Белый А.И. Вредители, болезни и сорняки люцернового агроценоза: монография. Краснодар; 2013). URL: <https://kubsau.ru/upload/iblock/79b/79bc2b58964bbaa73a9c24633add736.pdf> [дата обращения: 10.05.2022].
- Grossheim A.A. Vegetation of the Caucasus (Rastitelny pokrov Kavkaza). Moscow: Moscow Society of Naturalists; 1948. [in Russian] (Гроссгейм А.А. Растительный покров Кавказа. Москва: Московское общество испытателей природы; 1948).
- Jaccard P. Distribution de la flore alpine dans le Basin de Dranseset dans quelques regions voisines. *Bulletin de la Société Vaudoise de Sciences Naturelles*. 1901;37(140):241-272. [in French] DOI:10.5169/seals-266440
- Kamelin R.V. Flora of the North of European Russia (compared with adjacent territories) (Flora Severa yevropeyskoy Rossii [v sravnenii s blizlezhashchimi territoriyami]). St. Petersburg: VVM; 2017. [in Russian] (Камелин Р.В. Флора Севера европейской России (в сравнении с близлежащими территориями). Санкт-Петербург: ВВМ; 2017).
- Kidanova Yu.D., Dmitrenko A.I., Dmitrenko N.N. The effectiveness of herbicides in corn crops in the conditions of Ust-Labinsk district. In: *Scientific Potential of Youth Research. Collection of presentations at the V International Scientific and Practical Conference held on November 11, 2021, in Petrozavodsk (Nauchny potentsial molodezhnykh issledovaniy. Sbornik statey V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, sostoyavsheysya 11 noyabrya 2021 g. v g. Petrozavodske)*. Petrozavodsk: New Science; 2021. p.534-538. [in Russian] (Киданова Ю.Д., Дмитренко А.И., Дмитренко Н.Н. Эффективность применения гербицидов в посевах кукурузы в условиях Усть-Лабинского района. В кн.: *Научный потенциал молодежных исследований. Сборник статей V Международной научно-практической конференции, состоявшейся 11 ноября 2021 г. в г. Петрозаводске*. Петрозаводск: Новая наука; 2021. С.534-538). URL: <https://sciencen.org/assets/KOF-387.pdf> [дата обращения: 08.05.2022].
- Kosenko I.S., Vasiliev D.S. Weeds and weed control measures (Sornye rasteniya i borba s nimi). Krasnodar: Krasnodar Book Publishers; 1971. [in Russian] (Косенко И.С., Васильев Д.С. Сорные растения и борьба с ними. Краснодар: Краснодарское книжное издательство; 1971).
- Luneva N.N. Technological methods of accounting and monitoring of weeds in agroecosystems (Tekhnologichnye metody ucheta i monitoringa sornykh rasteniy v agroekosistemakh). In: I.Ya. Grechanov (ed.). *High-performance and high-precision technologies and methods of phytosanitary monitoring (Vysokoproizvoditelnye i vysokotochnye tekhnologii i metody fitosanitarnogo monitoringa)*. St. Petersburg: All-Russian Research Institute of Plant Protection; 2009. p.39-56. [in Russian] (Лунева Н.Н. Технологические методы учета и мониторинга сорных растений в агроэкосистемах. В кн.: *Высокопроизводительные и высокоточные технологии и методы фитосанитарного мониторинга* / под ред. И.Я. Гречанова. Санкт-Петербург: Всероссийский НИИ защиты растений; 2009. С.39-56).
- Luneva N.N. Weeds: origin and composition. *Plant Protection News*. 2018;1(95):26-32. [in Russian] (Лунева Н.Н. Сорные растения: происхождение и состав. *Вестник защиты растений*. 2018;1(95):26-32).
- Luneva N.N. Weeds and weed flora as the basis for phytosanitary zoning (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(2):139-150. [in Russian] (Лунева Н.Н. Сорные растения и сорная флора как основа фитосанитарного районирования (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(2):139-150). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-2-139-150
- Luneva N.N., Mysnik E.N. Ecological and geographical approach in predicting the species composition of weeds. *Journal of Plant Protection and Quarantine*. 2014;(8):20-23. [in Russian] (Лунева Н.Н., Мысник Е.Н. Эколого-географический подход в прогнозировании видового состава сорных растений. *Защита и карантин растений*. 2014;(8):20-23).
- Luneva N.N., Mysnik E.N. Modern botanical nomenclature of weed plant species of the Russian Federation. *Plant Protection News. Supplements*. 2018; Suppl 26:1-80. [in Russian] (Лунева Н.Н., Мысник Е.Н. Современная ботаническая номенклатура видов сорных растений Российской Федерации. *Вестник защиты растений. Приложение*. 2018; Приложение 26:1-80). URL: https://www.vizgrpnsuppl.com/Luneva_Mysnik_2018-s.pdf [дата обращения 10.01.2022].
- Luneva N.N., Mysnik E.N., Sokolova T.D., Nadtochiy I.N. Weeds of the Russian Federation in scientific sources (Sornye rasteniya Rossiyskoy Federatsii v nauchnykh istochnikakh). Russian Federation; patent number: 2018621407; 2018. [in Russian] (Лунева Н.Н., Мысник Е.Н., Соколова Т.Д., Надточий И.Н. Сорные растения Российской Федерации в научных источниках. Российская Федерация; патент № 2018621407; 2018).
- Maltsev A.I. Weed vegetation of the USSR and measures to combat it (Sornaya rastitelnost SSSR i меры борьбы s ney). 4th ed. Moscow; Leningrad: Selkhozgiz; 1962. [in Russian] (Мальцев А.И. Сорная растительность СССР и меры борьбы с ней. 4-е изд. Москва; Ленинград: Сельхозгиз; 1962).
- Mirkin B.M., Naumova L.G., Khaziakhmetov R.M. About role of biological diversity for enhancing of adaptivity in agricultural ecosystems. *Agricultural Biology*. 2003;38(5):83-92. [in Russian] (Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Хазиахметов Р.М. О роли биологического разнообразия в повышении адаптивности сельскохозяйственных экосистем. *Сельскохозяйственная биология*. 2003;38(5):83-92).
- Mysnik E.N., Luneva N.N., Sokolova T.D., Nadtochiy I.N. Weeds of the fields of the Russian Federation (Sornye rasteniya poley Rossiyskoy Federatsii). Russian Federation; patent number: 2021522847; 2021. [in Russian] (Мысник Е.Н., Лунева Н.Н., Соколова Т.Д., Надточий И.Н. Сорные растения полей Российской Федерации. Российская Федерация; патент № 2021522847; 2021).

- Nikitin V.V. Weedy species in the flora of the USSR (Sornye rasteniya flory SSSR). Leningrad: Nauka; 1983. [in Russian] (Никитин В.В. Сорные растения флоры СССР. Ленинград: Наука; 1983).
- Nikolaev V.A. Adaptive space-time structure of the agricultural landscape. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*. 1999;(1):22-26. [in Russian] (Николаев В.А. Адаптивная пространственно-временная структура агроландшафта. *Вестник МГУ. Сер. 5. География*. 1999;(1):22-26).
- Pikushova E.A., Vasilko V.P., Belyi A.I. Integrated security concept plants from harmful organisms (weed plants: malware, biodiversity, range of herbicides). Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2020. [in Russian] (Пикушова Э.А., Василько В.П., Белый А.И. Концепция интегрированной системы защиты растений от вредных организмов (сорные растения: вредоносность, биоразнообразие, биология, ассортимент гербицидов). Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2020). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_43049479_64598977.pdf [дата обращения: 15.05.2022].
- Savva A.P., Esipenko L.P., Telezhenko T.N., Kovalev S.S. Cayenne, new herbicide for fighting weeds in crops of winter wheat. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2017;(125):102-111. [in Russian] (Савва А.П., Есипенко Л.П., Тележенко Т.Н., Ковалев С.С. Новый гербицид Кайен, ВДГ для борьбы с сорняками в посевах пшеницы озимой. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2017;(125):102-111). DOI: 10.21515/1990-4665-125-004
- Schmidt V.M. Statistical methods in comparative floristics (Statisticheskiye metody v sravnitel'noy floristike). Leningrad: Leningrad State University; 1980. [in Russian] (Шмидт В.М. Статистические методы в сравнительной флористике. Ленинград: Ленинградский государственный университет; 1980).
- Ulyanova T.N. Weeds in the flora of Russia and other CIS countries (Sornye rasteniya vo flore Rossii i drugikh stran SNG). St. Petersburg: VIR; 1998. [in Russian] (Ульянова Т.Н. Сорные растения во флоре России и других стран СНГ. Санкт-Петербург: ВИР; 1998).
- Veselova P.V. Phytocoenotic confinedness of *Brassicaceae* species under technogenic impact in the north-east Pricaspian basin. *Rastitelnye resursy = Plant Resources*. 2013;49(3):360-370. [in Russian] (Веселова П.В. Особенности фитоценоотической приуроченности видов сем. *Brassicaceae* в условиях техногенного влияния в северо-восточном Прикаспии. *Растительные ресурсы*. 2013;49(3):360-370).
- Yurtsev B.A., Kamelin R.V. Basic concepts and terms of floristics: A manual for a special course (Osnovnye ponyatiya i terminy floristiki: uchebnoye posobiye po spetskursu). Perm: Perm University; 1991. [in Russian] (Юрцев Б.А., Камелин Р.В. Основные понятия и термины флористики: учебное пособие по спецкурсу. Пермь: Пермский университет; 1991).
- Yurtsev B.A., Semkin B.I. Studies of concrete and partial floras with the aid of mathematical methods. *Botanicheskii zhurnal = Botanical Journal*. 1980;65(12):1706-1718. [in Russian] (Юрцев Б.А., Семкин Б.И. Изучение конкретных и частичных флор с помощью математических методов. *Ботанический журнал*. 1980;65(12):1706-1718).
- Zelenskaya O.V., Moskvitin S.A., Shvydkaya N.V. Weedy plants of Polygonaceae Juss. family on rice irrigation systems of Krasnodar Region. *Rice Growing*. 2021;3(52):61-66. [in Russian] (Зеленская О.В., Москвитин С.А., Швыдкакая Н.В. Сорные растения семейства Polygonaceae Juss. на рисовых системах Краснодарского края. *Рисоводство*. 2021;3(52):61-66). DOI: 10.33775/1684-2464-2021-52-3-61-66

Информация об авторах

Наталья Николаевна Лунева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель сектора, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, natalja.luneva2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7972-6362>

Татьяна Юрьевна Закота, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, bagira036@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4176-9997>

Information about the authors

Natalya N. Luneva, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of a Sector, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, natalja.luneva2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7972-6362>

Tatyana Yu. Zakota, Associate Researcher, All-Russian Research Institute of Plant Protection, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, bagira036@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4176-9997>

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 30.05.2022; одобрена после рецензирования 21.03.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 30.05.2022; approved after reviewing on 21.03.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 582.675.1:575.21(571.1)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-169-177



Изменчивость фенологических и морфологических признаков *Caltha palustris* L. *in situ* и *ex situ* в условиях западносибирской лесостепи

Т. И. Фомина

Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Ивановна Фомина, fomina-ti@yandex.ru

Актуальность. *Caltha palustris* L. известна как лекарственное, пищевое, декоративное растение. Это циркумбореальный вид, гигрогелофит. Благодаря экологической специфике данный вид может быть использован для изучения реакции растений на резкую смену условий при переносе в культуру. Цель настоящей работы – оценка изменчивости фенологических и морфологических признаков *C. palustris* в условиях лесостепи Западной Сибири.

Материалы и методы. Исследованы фенотипические признаки местной популяции и образцов, привлеченных из Кемеровской области и Алтайского края. Фенологические наблюдения проведены по общепринятой методике для травянистых многолетников. Морфометрические данные обработаны в программе PAST с использованием статистических показателей: средняя арифметическая с ошибкой ($M \pm m_M$), минимальное и максимальное значения признака (lim), коэффициент вариации (C_v). Достоверность различий оценивали на 5-процентном уровне значимости по критерию Стьюдента (P), а для признаков, отклоняющихся от нормального распределения, – с помощью критерия Манна – Уитни (P_{MW}) по медианным значениям признака (Me) также на 5-процентном уровне значимости.

Результаты и выводы. Изученные образцы значительно различаются по срокам и длительности фенофаз. Растения местной популяции позже отрастают и продолжительно цветут из-за варьирования микроусловий. Растения в коллекции образуют вторую генерацию розеточных побегов, способны к длительной вегетации, при этом алтайский образец отличается поздним развитием и короткими фенофазами. По морфологическим признакам побега все образцы существенно различаются. При интродукции растения калужницы произрастают в неоптимальных для этого вида экологических условиях и потому уступают местной популяции (особенно алтайский образец) в высоте побега, размерах листьев, числе цветков. Ввиду высокой индивидуальной и межпопуляционной вариабельности признаков перспективна мобилизация *C. palustris* из разных природных популяций для отбора наиболее декоративных и устойчивых в культуре образцов.

Ключевые слова: калужница болотная, фенотипические признаки, интродукционные образцы, природная популяция, декоративный вид

Благодарности: исследование выполнено в рамках государственного задания по проекту АААА-А21-121011290025-2 «Оценка морфогенетического потенциала популяций растений Северной Азии экспериментальными методами». При подготовке статьи использовались материалы Биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН, УНУ «Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте» (USU 440534).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Фомина Т.И. Изменчивость фенологических и морфологических признаков *Caltha palustris* L. *in situ* и *ex situ* в условиях западносибирской лесостепи. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023;184(3):169-177. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-169-177

SYSTEMATICS, PHYLOGENY AND GEOGRAPHY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-169-177

In situ and *ex situ* variability of phenological and morphological features in *Caltha palustris* L. under the conditions of the West Siberian forest steppe

Tatyana I. Fomina

Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Corresponding author: Tatyana I. Fomina, fomina-ti@yandex.ru

Background. *Caltha palustris* L. is known as a medicinal, food, and ornamental plant. It is a circumboreal species, and hygrophilous. Due to its ecological specificity, this plant can be used to study the response to an abrupt change in environments. The goal was to assess the variance in phenological and morphological features of *C. palustris* in the forest steppe of Western Siberia.

Materials and methods. Phenotypic characters of the native population and the accessions introduced from Kemerovo Province and Altai Territory were studied. Phenological observations followed a well-known technique for herbaceous perennials. Morphometric data were processed in the PAST program using statistical indicators: the arithmetic mean with an error ($M \pm m_m$), minimum and maximum values of the trait (lim), and coefficient of variation (C_v). Significance of differences was assessed using Student's *t*-test (P) at a 5% significance level. For traits deviating from the normal distribution, the significance of differences was assessed using the Mann-Whitney criterion (P_{MW}) by median values of the trait (Me) at the same 5% level.

Results and conclusions. The accessions varied significantly in the timing and duration of phenophases. Plants in the native population grew later and bloomed for a long time because of the variation in microconditions. *Ex situ* plants produced the second generation of rosette shoots and were capable of long vegetating, but the Altai accession differed in later growth and shorter phenophases. All accessions significantly differed in morphological characteristics of the shoot, except for flower size. The introduced accessions were inferior to the native ones in shoot height, leaf size, and number of flowers due to non-optimal cultivation environments. Since *C. palustris* demonstrated high individual and interpopulation variability, it is promising to study this species in different natural populations and select the most ornamental and sustainable accessions.

Keywords: marsh marigold, phenotypic characteristics, introduced accessions, native population, ornamental species

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the state task under Project AAAA21-121011290025-2 "Assessment of the morphogenetic potential of plant populations in Northern Asia by experimental methods". The manuscript was prepared using the materials of the Bioresource Scientific Collection of the Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the RAS, and Unique Scientific Unit 440534 "Collections of living plants in open and protected ground". The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Fomina T.I. *In situ* and *ex situ* variability of phenological and morphological features in *Caltha palustris* L. under the conditions of the West Siberian forest steppe. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):169-177. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-169-177

Введение

Современные климатические изменения оказывают непредсказуемое влияние на видовой состав и распределение растительного покрова. Поэтому исследования, связанные с реакцией отдельных видов на смену условий как в естественных сообществах, так и при переносе в культуру, весьма актуальны. Одним из разносторонне изучаемых объектов является *Caltha palustris* L. – калужница болотная. Это гигрогелофит, широко распространенный в холодных и умеренно теплых районах по берегам водоемов, болотам, заболоченным лугам и лесам. Ареал вида принадлежит к циркумбореальному: охватывает Европу, Казахстан, Монголию, Китай, Корею, Японию, Северную Америку, в пределах России – европейскую часть, Сибирь, Дальний Восток (Gleason, Cronquist, 1993; Malyshev, Peschkova, 2003). *C. palustris* редка в Восточной Европе (Biró et al., 2014), Украине, Молдове, Крыму, Ростовской области и Москве (Samoylov, Morozova, 2011; Fedyaeva, 2014; Yena, Fateryga, 2015). В составе водно-болотных ценозов данный вид играет важную роль в аккумуляции макро- и микроэлементов (особенно Mg, Ca, Sr, Fe), поэтому может применяться для фиторемедиации (Parzych et al., 2018).

C. palustris издавна используется как лекарственное, пищевое и декоративное растение (Liakh et al., 2020). Свежие части калужницы ядовиты и имеют горький вкус из-за присутствия протанемонина, который разрушается при термической обработке. Отварные бутоны употребляли в качестве заменителей каперсов в США, Польше, Эстонии, а листья поныне используются в пищу населением Тибета и Турции (Kang et al., 2014; Çakir, 2017). Растение широко применяется в этномедицине при кожных и нервных заболеваниях, как противовоспалительное, ранозаживляющее, спазмолитическое средство. Лечебные свойства калужницы обусловлены присутствием протанемонина, фенольных веществ, каротиноидов, полисахаридов (Plant resources..., 1984; Martynov et al., 2017). *C. palustris* – ценный раноцветущий многолетник для оформления прибрежных зон водоемов (Fomina, 2009).

В пределах обширного ареала *C. palustris* отличается значительным морфологическим разнообразием, затрагивающим форму и размер базальных листьев, цветков, зрелых листовок, структуру побега и другие признаки (Cieślak, 2004; Kumar, Singhal, 2008). Установлено, что вид обладает высокой пластичностью, способностью адаптироваться к широкому диапазону местообитаний без значительной генотипической дифференциации. В природных популяциях модификации морфологических признаков имеют характер непрерывной изменчивости, обусловленной различиями в условиях произрастания (Woodell, Kootin-Sanwu, 1971; Blagojević et al., 2013). В культуре наибольшие различия по морфологическим признакам и семенной продуктивности растений связаны с происхождением популяций (Falińska, 1981).

Литературные данные об адаптивных изменениях биоморфологических признаков калужницы немногочисленны. В экспериментах по моделированию потепления в естественных фитоценозах с участием *C. palustris* (Lindborg et al., 2021) показано, что растения вида в высоких широтах положительно реагируют на повышение температур: увеличились их размеры, количество листьев, цветков и корней. По данным A. P. Grootjans et al. (1996), генеративные особи этого поликарпика могут выживать на дренированных участках не менее 14 лет,

но не возобновляются. S. Brotherton et al. (2019) при переносе растений с пойменного луга на суходольный отмечают неуклонное снижение их численности, размеров и количества листьев, цветков, периодичности цветения (через 5 лет цвели всего 20% особей). Однако реакция на смену условий проявилась с запаздыванием, спустя три года после переноса (тогда как другие лугово-болотные виды среагировали немедленно), что свидетельствует о высоком адаптационном потенциале вида. Представляет интерес интродукция калужницы в обычные, как правило неоптимальные для нее, условия культуры, а также сравнение параметров роста и развития с растениями местной природной популяции.

Цель настоящей работы – оценка изменчивости фенологических и морфологических признаков *C. palustris* в условиях лесостепи Западной Сибири.

Материалы и методы

Исследование выполнено в Центральном сибирском ботаническом саду (Новосибирск) в коллекции декоративных растений природной флоры и на его территории, в окрестностях Академгородка. Интродукционные образцы *C. palustris* привлечены из природных популяций Таштагольского района Кемеровской области (N 52°50.401', E 087°48.649') в 2010 г. (кемеровский образец) и Целинного района Алтайского края (N 53°09.376', E 085°58.105') в 2017 г. (алтайский образец). В первом случае растения собраны в пихтово-березовом лесу, а во втором – в русле ручья на дне балки. В коллекции *C. palustris* выращивается на участках с естественным увлажнением, притененных высокорослыми многолетниками. Естественные травяно-болотные ценозы с участием этого вида на территории ботанического сада произрастают по берегам озера и в пойме р. Зырянка (Banaev et al., 2014).

Основные исследования выполняли в период 2016–2019 гг., используя классические подходы интродукции растений. За образец принимали группу особей, изъятых из природных местообитаний и перенесенных в коллекцию на участок ботанического сада. Образцы калужницы представлены четырьмя особями каждый, в естественной популяции для измерений отбирали 5–10 особей. Фенологические наблюдения проводили по общепринятой методике (Weideman, 1974). Морфометрические показатели растений (высоту побегов, размеры цветков и листьев, число цветков на побеге) определяли в фазы «массовое цветение» и «плодоношение». Объемы выборки включали от 7 до 78 определений в зависимости от признака и доступности материала, с наибольшими значениями для числа и размера цветков.

Статистическая обработка результатов проведена с использованием программы PAST (Hammer et al., 2001). Проверка исследованных морфологических признаков с помощью критерия Shapiro–Wilk показала, что они подчиняются нормальному распределению, за исключением числа цветков на побеге и длины черешка розеточных листьев. Данные обработаны с использованием статистических показателей: средняя арифметическая с ошибкой ($M \pm m_M$), минимальное и максимальное значения признака (lim), коэффициент вариации (C_v). Достоверность различий показателей оценивали по параметрическому критерию Стьюдента (P) на 5-процентном уровне значимости $\alpha = 0,05$. При $p \leq \alpha$ различие показателей считается существенным. Для признаков, отклоняющихся от нормального распределения, достоверность различий

оценивали с помощью непараметрического критерия Mann-Whitney U test (P_{MW}) по медианным значениям признака (Me), также на 5-процентном уровне значимости. Вариабельность признаков принимали за низкую ($C_v = 0-10\%$), среднюю ($C_v = 11-20\%$) или высокую ($C_v > 20\%$) (Zaitsev, 1973).

Результаты и обсуждение

Особенности фенологического развития интродукционных образцов и местной популяции

C. palustris – травянистый гемикриптофит с ранневесеннецветущим летнезеленым феноритмотипом (рис. 1, А). Отрастание растений весной в природе начинается позже, чем на коллекционном участке, что связано с наличием прошлогодней травы и высокого уровня талых вод (рис. 2). При его понижении у кромки воды появляются растения. В течение 3–13 дней формируются бутоны, и побеги зацветают. Побег несет, как правило, 2–4 листа

и 3–8 цветков. Распускание в соцветии дружное (одновременно раскрыты все цветки, иногда 1-2 распускаются позже) или последовательное. Цветки в процессе цветения растут, как и побеги, достигая от 2,0 см до 3,5–3,7 см в диаметре. В пасмурную погоду цветки закрыты. При отцветании ярко-желтые доли околоцветника обесцвечиваются (на них появляются белые полосы), затем осыпаются. Продолжительность жизни одного цветка от распускания до опадания составляет около 12 дней. Как раннецветущий многолетник, *C. palustris* устойчива к весенним возвратным понижениям температур (рис. 1, Б).

Характерно одновременное прохождение фенофаз у растений местной популяции в зависимости от микроусловий. В момент наблюдения присутствуют особи в различных фазах: «вегетативная», «бутонизация», «начало цветения», «полное цветение». Из-за асинхронности в сроках и темпах развития цветение продолжительное, в зависимости от погодных условий длится 4–7 недель, тогда как у растений в коллекции – до трех недель.



А



Б

Рис. 1. *Caltha palustris* L.: А – Кемеровская область, Таштагольский район, опушка пихтово-березового леса; синюзия ранневесенних травянистых поликарпиков (26 мая 2010 г.); Б – Новосибирск, коллекция природной флоры; цветущие побеги полегли под тяжестью снега (2 мая 2017 г.) (фото Т. И. Фоминой)

Fig. 1. *Caltha palustris* L.: А – Tashtagol'sky District, Kemerovo Province, edge of a fir-and-birch forest; synuzium of early-spring herbaceous polycarpics (May 26, 2010); Б – Novosibirsk, collection of the natural flora; flowering shoots lodged under the weight of snow (May 2, 2017) (photo by T. I. Fomina)

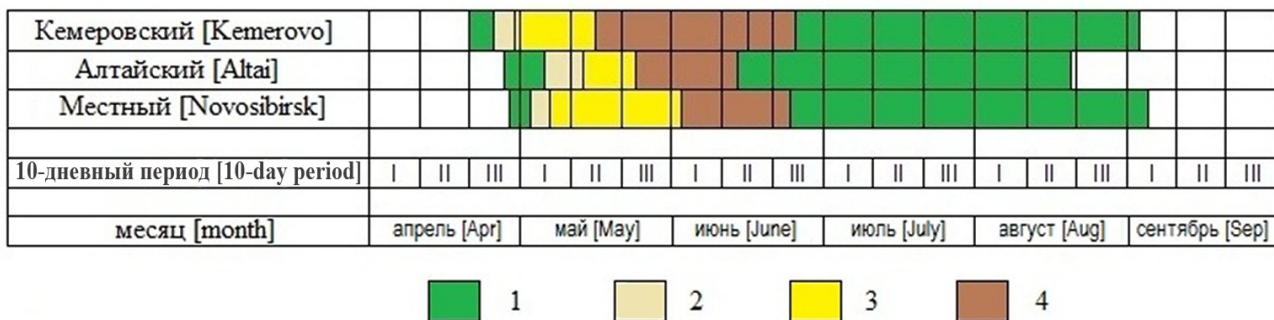


Рис. 2. Фенологические спектры *Caltha palustris* L. *in situ* и *ex situ* в условиях Новосибирска (2011–2021 гг.): 1 – вегетация; 2 – бутонизация; 3 – цветение; 4 – плодоношение
Fig. 2. *In situ* and *ex situ* phenological spectra of *Caltha palustris* L. under the conditions of Novosibirsk (2011–2021): 1 – vegetating; 2 – budding; 3 – flowering; 4 – fruiting

В смешанном лесу Академгородка одновременно с *C. palustris* цветут *Tussilago farfara* L., *Pulmonaria mollis* Wulfen ex Hornem., *Ranunculus monophyllus* Ovcz., *Viola hirta* L., а на древесных растениях начинается распускание листьев. Отцветает калужница при полном развитии листвы на деревьях, в фазу массового цветения *Trollius asiaticus* L. и *Ranunculus propinquus* С.А. Mey.

Созревание плодов длится около полутора месяцев. Листовки в жаркую и влажную погоду раскрываются по вентральному шву зелеными, к фазе «начало созревания семян» (листовки побурели) диссеминация завершается. Вегетация *C. palustris* заканчивается, как правило, в августе – начале сентября. У интродукционных образцов возможно образование второй генерации розеточных побегов после плодоношения. Вторичное отрастание наблюдалось также в естественном ценозе после скашивания травяного покрова. В этом случае период вегетации продлевается до заморозков, составляя в среднем 140 ± 7 дней. Формирование второй генерации побегов у раноцветущего полурозеточного гемикриптофита, обычно имеющего только весенние побеги, служит признаком изменения ритма развития при адаптации к новому местообитанию (Krylova, 1967).

Сезонные ритмы интродукционных образцов заметно различаются. Растения из кемеровской популяции раньше отрастают и зацветают, префлоральный период короткий (7 ± 2 дня), но период созревания семян растянутый – до 44–49 дней. Напротив, особи алтайского происхождения характеризуются поздним и медленным развитием, начинают цвести спустя 16 ± 4 дня с начала отрастания, при этом все основные периоды сезонного цикла проходят в короткие сроки. Растения ежегодно цветут и плодоносят, однако кемеровский образец отличается более устойчивым, сбалансированным сезонным ритмом и по фенологическим признакам декоративнее, чем алтайский.

Изменчивость морфологических признаков у растений разного происхождения

Изучение морфометрических признаков растений, привлеченных из различных популяций, в сравнении с природными экземплярами дает представление о диапазоне изменчивости при переносе в культуру. Нами определены показатели, значимые для декоративности вида: высота цветоносного побега, размеры листьев, число и размеры цветков. Одним из наиболее лабильных признаков у травянистых растений является высота побега. У *C. palustris* вегетативно-генеративные (цветоносные) побеги формируются в числе 1–8 на особь и растут до фазы плодоношения. В фазу «массовое цветение» их высота составляет в среднем 15–21 см при наименьших значениях для алтайского образца (табл. 1). Плодоносящие побеги местных растений удлинняются вдвое – до 55 см, как следствие развития травяного покрова. Побеги особой кемеровской образцы увеличиваются в 1,5 раза, достигая 43 см, тогда как прирост у особей алтайского образца незначительный.

Размеры базальных (розеточных) листьев наибольшие в местной популяции, обитающей в оптимальных для вида условиях увлажнения (рис. 3, А). Длина черешка, в несколько раз превышающая таковую у растений в культуре, обусловлена также фитоценотическим окружением. Растения кемеровского образца имеют крупные листья, но с более короткими, чем у особей местной популяции, черешками, поэтому форма куста компактная (рис. 3, Б). Растения алтайского образца более низкорослые, с относительно мелкими листьями. По числу цветков на побеге они уступают кемеровскому образцу и тем более местной популяции. В естественной среде длительное цветение *C. palustris* обусловлено не только разновременной фенологией, но и развитыми соцветиями – до 18 цветков на побеге.



А



Б

Рис. 3. Общий вид растений *Caltha palustris* L.: А – окрестности Академгородка, в пойме р. Зырянка (24 мая 2019 г.); Б – в коллекции природной флоры (26 апреля 2016 г.) (фото Т. И. Фоминой)

Fig. 3. General appearance of *Caltha palustris* L. plants: А – near Akademgorodok, in the Zyryanka river floodplain (May 24, 2019); Б – in the collection of natural flora (April 26, 2016) (photo by T. I. Fomina)

Таблица 1. Морфологические признаки *Caltha palustris* L. *in situ* и *ex situ* в Новосибирске (2016–2021 гг.)
Table 1. *In situ* and *ex situ* morphological indicators of *Caltha palustris* L. (2016–2021)

Показатель / Indicator	Алтайский образец / Altai accession			Кемеровский образец / Kemerovo accession			Новосибирск, местная популяция / Novosibirsk, native population		
	$M \pm m_m$	lim	V, %	$M \pm m_m$	lim	V, %	$M \pm m_m$	lim	V, %
Высота побега в фазу цветения, см / Flowering shoot height, cm	14,9 ± 1,7	7–21	38,4	21,3 ± 0,8	15–27,5	20,9	20,1 ± 0,4	13–25,5	14,8
Число цветков на побеге / Number of flowers per shoot	3,6 ± 0,7	1–8	63,0	3,7 ± 0,2	1–8	31,0	5,7 ± 0,3	1–18	50,5
Диаметр цветка, см / Flower diameter, cm	2,7 ± 0,0	2,2–3,2	9,6	3,2 ± 0,1	2,3–4	13,4	2,8 ± 0,0	2–3,7	12,8
Высота побега в фазу плодоношения, см / Fruiting shoot height, cm	15,3 ± 2,0	10–23	34,8	31,5 ± 1,4	21,5–42,5	17,1	40,6 ± 1,5	22–55	20,9
Длина листовой пластинки, см / Leaf blade length, cm	4,9 ± 0,2	3,6–6,3	15,5	7,5 ± 0,4	2,4–13,2	33,3	8,2 ± 0,5	4–17,3	36,5
Ширина листовой пластинки, см / Leaf blade width, cm	5,4 ± 0,3	3,6–6,5	16,5	8,7 ± 0,5	2,2–15,6	37,6	9,1 ± 0,6	4,2–16,5	38,8
Длина черешка, см / Petiole length, cm	6,1 ± 0,5	4–10,2	27,0	12,9 ± 1,5	3,9–28,5	61,1	26,2 ± 2,5	8–53	60,4

Примечание: приведены размеры розеточных листьев. $M \pm m_m$ – среднее арифметическое с ошибкой; lim – минимальное и максимальное значения признака; V, % – коэффициент вариации
Note: rosette leaf sizes are presented. $M \pm m_m$ – arithmetic mean with an error; lim – minimum and maximum values of the indicator; V, % – coefficient of variation

У *C. palustris* околоцветник простой, ярко-желтый, обычно состоит из пяти долей. Цветки у растений местной популяции достаточно мелкие, как у алтайского образца, при этом их размеры более изменчивы в связи с варьированием микроусловий. В пойме р. Зырянка встречаются вполне развитые цветки 1,5–1,9 см в диаметре (рис. 4). Наиболее крупные цветки, по средним и лимитным значениям, наблюдаются у кемеровских растений; кроме того, для них характерна вариабельность по числу долей околоцветника: у 25% цветков (2017–2018 гг.) их было 6, очень редко встречается 4 или 7 долей. Для исследованных морфологических признаков *C. palustris* характерна средняя и высокая изменчивость. Менее вариабельны размеры цветка, у кемеровских и местных особей также высота побега, у алтайских – размеры листьев. Наиболее изменчивы число цветков на побеге и длина черешка.

Вариабельность признаков у кемеровского образца соответствует ее уровню в местной природной популяции, у растений алтайского происхождения – в целом несколько ниже. Как известно, выявление изменчивости

признаков, не уступающей природной, позволяет судить о высоком адаптационном потенциале вида и перспективах его культивирования (Skvortsov, 1986). Морфологические показатели и связанная с ними декоративность образцов указывают на перспективы кемеровской популяции *C. palustris* как источника материала для введения в культуру.

Сравнение полученных данных с использованием статистических критериев (P_t , P_{Mw}) выявило существенные различия между интродукционными образцами и этих образцов с местной популяцией по большинству признаков (табл. 2). Кемеровский и алтайский образцы значительно различаются по исследованным морфологическим параметрам, кроме числа цветков на побеге. Алтайский образец по всем признакам, кроме размера цветка, весьма отличается от местной популяции. Между тем у растений кемеровского образца и местной популяции различий гораздо меньше. Возможно, отчасти это обусловлено более длительной интродукцией кемеровского образца (12 лет) в отличие от алтайского (5 лет).



Рис. 4. Вариабельность размеров цветка *Caltha palustris* L. в пойме р. Зырянка, окрестности Академгородка, 8 мая 2018 г. (фото Т. И. Фоминой)

Fig. 4. Variability in *Caltha palustris* L. flower size in the Zyryanka river floodplain, near Akademgorodok, May 8, 2018 (photo by T. I. Fomina)

Таблица 2. Достоверность различий образцов *Caltha palustris* L. по морфологическим признакам

Table 2. Significance of differences in the morphological indicators of *Caltha palustris* L. accessions

Признак / Indicator	К vs. М	К vs. А	М vs. А
Диаметр цветка / Flower diameter	5,32·10⁻⁶	8,86·10⁻⁷	0,198
Число цветков на побеге / Number of flowers per shoot	4,12·10^{-5*}	0,181*	0,013*
Высота цветоноса в фазу цветения / Flowering shoot height	0,153	4,76·10⁻⁴	5,17·10⁻⁵
Высота цветоноса в фазу плодоношения / Fruiting shoot height	4,50·10⁻⁴	1,94·10⁻⁶	5,80·10⁻⁹
Длина листовой пластинки / Leaf blade length	0,237	0,002	0,001
Ширина листовой пластинки / Leaf blade width	0,627	0,002	0,002
Длина черешка / Petiole length	5,81·10^{-5*}	0,002*	4,29·10^{-6*}

Примечание: достоверность различий оценивалась на 5-процентном уровне значимости по критерию Стьюдента (P_t), а для признаков, распределение которых отличается от нормального, – по критерию Манна – Уитни (P_{Mw})*. Статистически значимые различия показаны полужирным шрифтом.

Образцы: А – алтайский, К – кемеровский, М – Новосибирск, местный

Note: significance of differences was assessed at a 5% significance level using Student's *t*-test (P_t), and for traits whose distribution differed from normal, using the Mann–Whitney criterion (P_{Mw})*. Statistically significant differences are boldfaced.

Accessions: A – Altai accession; K – Kemerovo accession; M – Novosibirsk, native population

По числу цветков на побеге, характеризующему репродуктивный потенциал вида, интродукционные образцы уступают местной популяции. Существенные отличия по высоте побега с плодами и длине черешка базальных листьев, очевидно, связаны с фитоценологическими условиями произрастания местных особей под пологом леса и травяного покрова, то есть с экологической изменчивостью. В целом высокая варибельность морфологических признаков свидетельствует о значительном потенциале *C. palustris* при введении в культуру как декоративно ценного многолетника.

Заключение

Изучена изменчивость фенологических и морфологических признаков *Caltha palustris* в условиях Новосибирска у растений местной популяции и двух образцов, интродуцированных из Кемеровской области и Алтайского края.

Выявлены значительные различия образцов по этапам сезонного развития. Растения местной популяции позже возобновляют вегетацию и продолжительно цветут, что обусловлено эколого-фитоценологическими условиями их местообитания. Интродукционные образцы также различаются по времени наступления и длительности фенофаз: алтайский характеризуется более поздним и ускоренным развитием.

Исследованные образцы существенно различаются по морфологическим признакам побега. Это обусловлено различиями в условиях произрастания местной популяции и интродукционных образцов, а также разным происхождением последних. Кемеровский образец по совокупности биоморфологических признаков более декоративен в культуре.

Полученные данные показывают возможность выращивания калужницы в лесостепи Западной Сибири на полутенистых участках с естественным увлажнением. В связи с обширным природным ареалом вида перспективны дальнейшие испытания и отбор высоко декоративных, устойчивых в культуре образцов.

References / Литература

Banaev E.V., Vlasenko A.V., Vlasenko I.A., Gorbunova I.A., Zykova E.Yu., Korolyuk A.Yu., Korolyuk E.A., Lashchinsky N.N., Mamontov Yu.S., Naumenko Yu.V., Pisarenko O.Yu., Pshenichkina Yu.A., Sedelnikova N.V., Tomoshevich M.A. Plant diversity in the Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the RAS (Rastitelnoye mnogoobrazniye Tsentralnogo sibirskogo botanicheskogo sada SO RAN). I.Yu. Koropachinsky, E.V. Banaev (eds). Novosibirsk: Geo; 2014. [in Russian] (Банаев Е.В., Власенко А.В., Власенко И.А., Горбунова И.А., Зыкова Е.Ю., Корольюк А.Ю., Корольюк Е.А., Лашчинский Н.Н., Мамонтов Ю.С., Науменко Ю.В., Писаренко О.Ю., Пшеничкина Ю.А., Седельникова Н.В., Томосевич М.А. Растительное многообразие Центрального сибирского ботанического сада СО РАН / под ред. И.Ю. Коропачинского, Е.В. Банаева. Новосибирск: Гео; 2014).

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).

Biró E., Babai D., Bódis J., Molnár Z. Lack of knowledge or loss of knowledge? Traditional ecological knowledge of population dynamics of threatened plant species in East-Central Europe. *Journal for Nature Conservation*. 2014;22(4):318-325. DOI: 10.1016/j.jnc.2014.02.006

Blagojević J., Jovanović V., Adnađević T., Budinski I., Vujošević M. Chromosome status of marsh marigold, *Caltha palustris* L. (Ranunculaceae) from Serbia. *Genetika*. 2013;45(3):793-798. DOI: 10.2298/GENSRI303793B

Brotherton S.J., Joyce C.B., Berg M., Awcock G.J. Immediate and lag effects of hydrological change on floodplain grassland plants. *Plant Ecology*. 2019;220(3):345-359. DOI: 10.1007/s11258-019-00918-z

Çakir E.A. Traditional knowledge of wild edible plants of Iğdir Province (East Anatolia, Turkey). *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2017;86(4):3568. DOI: 10.5586/asbp.3568

Cieślak E. Morphological variability of the *Caltha palustris* L. complex (Ranunculaceae) in Poland. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 2004;73(3):193-201. DOI: 10.5586/asbp.2004.026

Falińska K. Variability of *Caltha palustris* L. populations in garden culture. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 1981;50(3):493-513. DOI: 10.5586/asbp.1981.072

Fedyeva V.V. (ed.). Red book of Rostov Province. Vol. 2. Plants (Krasnaya kniga Rostovskoy oblasti. T. 2. Rasteniya). 2nd ed. Rostov-on-Don: Ministry of Nature of Rostov Province; 2014. [in Russian] (Красная книга Ростовской области. Т. 2. Растения / под ред. В.В. Федяевой. 2-е изд. Ростов-на-Дону: Минприроды Ростовской области; 2014). URL: <http://www.ecodon.dspl.ru/docs/Красная%20книга%202014/Том%202%20Растения.pdf> [дата обращения: 23.09.2021].

Fomina T.I. Marsh marigold – *Caltha* L. (Kaluzhnitsa – *Caltha* L.). In: V.P. Sedelnikov (ed.). *Illustrated encyclopedia of plant life in Siberia (Illyustrirovannaya entsiklopediya rastitel'nogo mira Sibiri)*. Novosibirsk: Arta; 2009. p.181. [in Russian] (Фомина Т.И. Калужница – *Caltha* L. В кн.: *Иллюстрированная энциклопедия растительного мира Сибири* / под ред. В.П. Седельникова. Новосибирск: Арта; 2009. С.181).

Gleason H.A., Cronquist A. Manual of vascular plants of northeastern United States and adjacent Canada. 2nd ed. New York, NY: New York Botanical Garden; 1993.

Grootjans A.P., Fresco L.F.M., de Leeuw C.C., Schipper P.C. Degeneration of species-rich *Calthion palustris* hay meadows; some considerations on the community concept. *Journal of Vegetation Science*. 1996;7(2):185-194. DOI: 10.2307/3236318

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: paleontological statistics software. Package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):4. Available from: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf [accessed Sept. 03, 2021].

Kang Y., Łuczay Ł., Kang J., Wang F., Hou J., Guo Q. Wild food plants used by the Tibetans of Gongba Valley (Zhouqu county, Gansu, China). *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 2014;10:20. DOI: 10.1186/1746-4269-10-20

Krylova I.L. The rhythm of development of some wild plants under cultivation (Ritm razvitiya nekotorykh dikorastushchikh rasteniy v usloviyakh kultury). *Bulletin Main Botanical Garden*. 1967;(67):9-13. [in Russian] (Крылова И.Л. Ритм развития некоторых дикорастущих растений в условиях культуры. *Бюллетень Главного ботанического сада*. 1967;(67):9-13).

- Kumar P., Singhal V.K. Cytology of *Caltha palustris* L. (Ranunculaceae) from cold regions of Western Himalayas. *Cytologia*. 2008;73:137-143. DOI: 10.1508/CYTOLOGIA.73.137
- Liakh V., Konechna R., Mylyanych A., Zhurakhivska L., Hubytska I., Novikov V. *Caltha palustris*. Analytical overview. *ScienceRise: Pharmaceutical Science*. 2020;2(24):51-56. DOI: 10.15587/2519-4852.2020.201616
- Lindborg R., Ermold M., Kuglerová L., Jansson R., Larson K.W., Milbau A. et al. How does a wetland plant respond to increasing temperature along a latitudinal gradient? *Ecology and Evolution*. 2021;11(22):16228-16238. DOI: 10.1002/ece3.8303
- Malyshev L.I., Peschkova (eds). Flora of Siberia. Vol. 6. Portulacaceae – Ranunculaceae. 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2003.
- Martynov A.M., Dul V.N., Dargaeva T.D., Chuparina Ye.V. Study of chemical composition of marsh marigold grass (*Caltha palustris* L.). *Journal of Pharmaceuticals Quality Assurance Issue*. 2017;4(18):66-71. [in Russian] (Мартынов А.М., Дул В.Н., Даргаева Т.Д., Чупарина Е.В. Изучение химического состава травы калужницы болотной (*Caltha palustris* L.)). *Вопросы обеспечения качества лекарственных средств*. 2017;4(18):66-71).
- Parzych A., Jonczak J., Sobisz Z. Bioaccumulation of macro- and micronutrients in herbaceous plants of headwater areas – a case study from northern Poland. *Journal of Elementology*. 2018;23(1):231-245. DOI: 10.5601/jelem.2017.22.1.1415
- Plant resources of the USSR: Flowering plants, their chemical composition, and utilization. Vol. 1. Magnoliaceae – Limoniaceae families (Rastitelnye resursy SSSR: Tsvetkovye rasteniya, ikh khimicheskiy sostav, ispolzovaniye. T. 1. Semeystva Magnoliaceae – Limoniaceae). Leningrad: Nauka; 1984. [in Russian] (Растительные ресурсы СССР: Цветковые растения, их химический состав, использование. Т. 1. Семейства Magnoliaceae–Limoniaceae. Ленинград: Наука; 1984).
- Samoylov B.L., Morozova G.V. (eds). Red book of the City of Moscow (Krasnaya kniga goroda Moskvy). 2nd ed. Moscow; 2011. [in Russian] (Красная книга города Москвы / под ред. Б.Л. Самойлова, Г.В. Морозовой. 2-е изд. Москва; 2011).
- Skvortsov A.K. Intraspecific variability and new approaches to plant introduction (Vnutrividovaya izmenchivost i novye podkhody k introduktsii rasteniy). *Bulletin Main Botanical Garden*. 1986;(140):18-25. [in Russian] (Скворцов А.К. Внутривидовая изменчивость и новые подходы к интродукции растений. *Бюллетень Главного ботанического сада*. 1986;(140):18-25).
- Woodell S.R.J., Kootin-Sanwu M. Intraspecific variation in *Caltha palustris*. *New Phytologist*. 1971;70(1):173-186. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1971.tb02522.x
- Yena A.V., Fateryga A.V. (eds). Red book of the Republic of Crimea. Plants, algae and fungi. Simferopol: ARIAL; 2015. [in Russian] (Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы / под ред. А.В. Ены, А.В. Фатерыги. Симферополь: ИТ АРИАЛ; 2015). URL: https://meco.rk.gov.ru/file/Krasnaya_kniga_Respubliki_Krym_2015.pdf [дата обращения: 09.09.2021].
- Zaitsev G.N. Methodology of biometric calculations. Mathematical statistics in experimental botany (Metodika biometricheskikh raschetov. Matematicheskaya statistika v eksperimentalnoy botanike). Moscow: Nauka; 1973. [in Russian] (Зайцев Г.Н. Методика биометрических расчетов. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. Москва: Наука; 1973).

Информация об авторе

Татьяна Ивановна Фомина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Центральный сибирский ботанический сад Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101, fomina-ti@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4724-2480>

Information about the author

Tatyana I. Fomina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Zolotodolinskaya St., Novosibirsk 630090 Russia, fomina-ti@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4724-2480>

Статья поступила в редакцию 17.12.2021; одобрена после рецензирования 21.07.2022; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 17.12.2021; approved after reviewing on 21.07.2022; accepted for publication on 04.09.2023.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.16:632.4.01/08
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-178-186



Генетическое разнообразие образцов ячменя из стран Восточной Азии по устойчивости к мучнистой росе

Р. А. Абдуллаев¹, К. А. Лукина¹, Б. А. Баташева², О. Н. Ковалева¹, Е. Е. Радченко¹

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

² Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, Дербент, Россия,

Автор, ответственный за переписку: Ренат Абдуллаевич Абдуллаев, abdullaev.1988@list.ru

Актуальность. Ячмень – одна из древних культур, которую в настоящее время возделывают более чем в 100 странах мира. Высокая адаптивность позволяет выращивать его в неблагоприятных для многих других сельскохозяйственных растений условиях среды. В то же время отрицательное влияние на урожайность и качество зерна могут оказывать грибные болезни. Негативное воздействие на растения ячменя оказывает большое число патогенов. Одним из наиболее вредоносных является грибок *Blumeria graminis* (DC.) Golovin ex Speer f. sp. *hordei* Marchal. Патоген может преодолевать устойчивость сортов, что приводит к значительным потерям урожая. Необходим постоянный поиск новых эффективных источников устойчивости к мучнистой росе для селекции ячменя.

Материал и методы. На взрослой стадии развития растений исследовали 950 коллекционных образцов ячменя из Восточноазиатского центра формообразования культуры. Скрининг и скрещивания экспериментального материала проводили на полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (Санкт-Петербург, Пушкин). Изучение генетического контроля устойчивости ячменя к *B. graminis* выполняли при искусственном заражении растений северо-западной популяцией гриба в климатической камере. При скрининге использовали балловые шкалы.

Результаты и выводы. Слабое развитие *B. graminis* в период колошения наблюдалось на растениях 38 образцов ячменя из Восточноазиатского генцентра. Высокой устойчивостью на всех стадиях развития характеризуются 20 генотипов, которые могут быть использованы в селекционных программах. Гены устойчивости 18 выделенных форм различаются по эффективности на ювенильной стадии развития и в период колошения. Образцы к-3433, к-10931, к-10934, к-11608, к-17545, к-20272, к-20279, к-20354 и к-27867 имеют по одному доминантному гену устойчивости. Образцы к-11608, к-12278 и к-17545 защищены тождественным геном, а устойчивость образца к-3433 обусловлена геном, отличающимся от генов, имеющихся у образцов к-10931 и к-20279.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare*, Восточноазиатский генцентр, *Blumeria graminis*, резистентность, степень поражения, гибридологический анализ

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (Проект № 21-76-00018, <https://rscf.ru/project/21-76-00018/>).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Абдуллаев Р.А., Лукина К.А., Баташева Б.А., Ковалева О.Н., Радченко Е.Е. Генетическое разнообразие образцов ячменя из стран Восточной Азии по устойчивости к мучнистой росе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):178-186. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-178-186

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-178-186

Genetic diversity of barley accessions from East Asian countries in terms of resistance to powdery mildewRenat A. Abdullaev¹, Ksenia A. Lukina¹, Belakhan A. Batasheva², Olga N. Kovaleva¹, Evgeny E. Radchenko¹¹N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia²N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Dagestan Experiment Station of VIR, Derbent, Russia**Corresponding author:** Renat A. Abdullaev, abdullaev.1988@list.ru

Background. Barley is an ancient crop currently cultivated in more than 100 countries. High adaptability makes it possible to cultivate it in environments unfavorable for many other crops. At the same time, fungal diseases can have a negative impact on its grain yield and quality. One of the most harmful is the fungus *Blumeria graminis* (DC.) Golovin ex Speer f. sp. *hordei* Marchal. The pathogen can overcome a cultivar's resistance, resulting in significant harvest losses. There is a need for a constant search for new effective sources of resistance to powdery mildew for barley breeding.

Materials and methods. A set of 950 barley accessions from the East Asian center of the crop's morphogenesis were studied at the adult stage of plant development. They were screened and crossed in the fields of Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR (St. Petersburg, Russia). Genetic control of barley resistance to *B. graminis* was analyzed in a climate chamber under artificial infection pressure with the northwestern population of the fungus. Scoring scales were used for screening.

Results and conclusions. Weak development of *B. graminis* during the heading phase was observed on plants of 38 barley accessions from the East Asian center. High resistance at all stages of development was manifested by 20 genotypes that can be used in breeding programs. Resistance genes in 18 selected forms differed in their effectiveness at the seedling stage of development and during the heading phase. Accessions k-3433, k-10931, k-10934, k-11608, k-17545, k-20272, k-20279, k-20354 and k-27867 had one dominant resistance gene each. Accessions k-11608, k-12278, and k-17545 are protected by the identical gene, while the resistance of k-3433 is induced by a gene that differs from the genes present in accessions k-10931 and k-20279.

Keywords: *Hordeum vulgare*, East Asian center of crop diversity, *Blumeria graminis*, resistance, damage score, hybridological analysis

Acknowledgements: the study was financially supported by the Russian Science Foundation (Project No. 21-76-00018, <https://rscf.ru/project/21-76-00018/>).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Abdullaev R.A., Lukina K.A., Batasheva B.A., Kovaleva O.N., Radchenko E.E. Genetic diversity of barley accessions from East Asian countries in terms of resistance to powdery mildew. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):178-186. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-178-186

Введение

Ячмень – одна из древних зерновых культур, которую в настоящее время возделывают более чем в 100 странах мира (Giraldo et al., 2019). Высокая адаптивность позволяет выращивать его в неблагоприятных (холод, засуха, малоплодородные почвы) для многих других сельскохозяйственных растений условиях окружающей среды (Gürel et al., 2016). В то же время существенное влияние на урожайность и качество зерна могут оказывать грибные болезни. Известно большое число патогенов, оказывающих негативное воздействие на растения ячменя (Malik et al., 2021). Одним из наиболее вредоносных является возбудитель мучнистой росы – гриб *Blumeria graminis* (DC.) Golovin ex Speer f. sp. *hordei* Marchal (Zawieja et al., 2017). Патоген может приводить к значительному снижению урожая культуры, которое может составлять 30–50% (Gong et al., 2013; Tratwal, Vocianowski, 2014). Недавние исследования показали, что болезнь оказывает существенное влияние на полегание, а это в свою очередь усложняет процесс уборки и приводит к дополнительным потерям (Dahiya et al., 2018; Marzani et al., 2022). Наиболее выгодным и экологически безопасным способом борьбы с болезнью для увеличения сбора зерна ячменя считается селекция на иммунитет (Radchenko et al., 2020).

Устойчивость растений к мучнистой росе может снижаться за счет изменения структуры популяции гриба путем мутаций и рекомбинаций. Использование в селекционных программах небольшого количества генов может привести к отбору вирулентных клонов патогена и потере устойчивости прежде эффективных доноров резистентности (Czembor H., Czembor J., 2001). В полевых условиях на северо-западе России было изучено 243 генотипа ячменя из стран Восточной Азии, среди которых умеренной устойчивостью к возбудителю мучнистой росы характеризовались 6 образцов (Radchenko et al., 2004), многие из которых спустя 20 лет оказались восприимчивы к патогену на стадии проростков (Abdullaev et al., 2022). Таким образом, возникает постоянная необходимость поиска новых эффективных источников устойчивости ячменя к *B. graminis* для вовлечения их в селекцию.

Большим разнообразием по многим ценным признакам характеризуются образцы из центров происхождения и доместикации сельскохозяйственных культур. Ранее, в лабораторных условиях, провели скрининг 950 образцов ячменя из Восточноазиатского центра формообразования и выявили 37 генотипов, поражение которых на ювенильной стадии развития растений не превышало двух баллов (Abdullaev et al., 2022).

Цель данной работы – изучить разнообразие ячменей из Восточной Азии по устойчивости к *B. graminis* во взрослой фазе развития растений и исследовать генетический контроль данного признака.

Материал и методы

Материалом для изучения служили 950 коллекционных образцов ячменя, которые поступили в коллекцию ВИР (Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург) из стран Восточноазиатского центра происхождения и доместикации культурных растений. Выращивание, скрининг по устойчивости к болезни взрослых растений и гибридизацию изучаемо-

го материала проводили на экспериментальном поле научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (ППЛ ВИР, Санкт-Петербург, Пушкин, 2021–2022 гг.).

Образцы высевали на метровых делянках с междурядьем 15 см в первой декаде июня. Поздние сроки посева способствовали сильному распространению мучнистой росы. В качестве восприимчивого контроля использовали районированный на северо-западе России сорт 'Белогорский' (к-22089, Ленинградская обл.), который высевали через каждые тридцать изучаемых образцов. Оценку устойчивости экспериментального материала проводили в фазы колошения и молочной спелости колоса по рекомендованной ВИР шкале. Баллы 1, 3 характеризовали генотипы как восприимчивые; 5 – умеренно устойчивые/восприимчивые; 7 и 9 соответствовали реакции устойчивости (Loskutov et al., 2012).

Условия проведения опытов в течение двух лет изучения (2021–2022 гг.) сильно различались, причем условия 2021 г. отличались от среднелетних данных наиболее существенно. Так, в мае выпало 139,0 мм осадков, что почти в три раза превышает многолетние данные. Начиная с третьей декады июля до конца августа (период созревания ячменя) выпало 183,8 мм, что также значительно превышает норму. Напротив, в период с 29 мая до 20 июля (53 дня, период всходов и кущения) выпало всего лишь 23,6 мм осадков, а температура воздуха в этот период практически ежедневно превышала норму. Июнь 2021 г. стал самым жарким за всю историю метеонаблюдений, пять дней подряд, с 19 по 23 июня, было установлено пять суточных рекордов по температуре (табл. 1). Погодные условия в 2022 г. отличались от среднелетних данных незначительно.

Скрещивания выделившихся по устойчивости опытных образцов проводили по общепринятой методике (Merezhko et al., 1973). Изучение наследования устойчивости ячменя к мучнистой росе осуществляли в климатической камере. Для определения числа и характера взаимодействия генов, контролирующих устойчивость, анализировали гибриды, полученные между выделенными образцами и неустойчивым сортом 'Белогорский' (к-22089). В пластиковые кюветы, заполненные смоченной водой ватой, высевали родительские формы и гибриды F_1 (по одному рядку), а также по 7 рядков F_2 . Инокуляцию растений возбудителем мучнистой росы проводили через неделю (фаза второго листа). Степень поражения экспериментального материала оценивали дважды – в момент сильного поражения и гибели неустойчивой родительской формы или, при изучении аллельных отношений, восприимчивого контроля (сорт 'Белогорский'). Для инокуляции использовали сборную северо-западную популяцию гриба, собранную на полях ППЛ ВИР в 2018–2022 гг. Для учета степени поражения растений грибом применяли общепринятую шкалу (Mains, Dietz, 1930). Баллы 0, 1 и 2 характеризовали генотипы как устойчивые (R), 3 и 4 – как восприимчивые (S). Соответствие полученных и теоретически предполагаемых данных определяли с использованием критерия χ^2 для 95-процентного уровня вероятности (Dospekhov, 1985).

Результаты и обсуждение

В 2021–2022 гг. на экспериментальном поле ППЛ ВИР изучили устойчивость 950 образцов ячменя из стран Восточной Азии к возбудителю мучнистой росы. В 2021 г.

Таблица 1. Погодные условия (Санкт-Петербург, Пушкин; 2021–2022 гг.)*
Table 1. Weather conditions (Pushkin, St. Petersburg; 2021–2022)*

Годы изучения	Параметры	Метеорологические условия			
		Май	Июнь	Июль	Август
2021	Температура, °С	12,1	21,4	23,1	16,9
	Сумма осадков, мм	139,0	22,0	50,0	135
2022	Температура, °С	10,0	17,6	19,9	20,6
	Сумма осадков, мм	26,0	47,0	84,0	113,0
Средние многолетние	Температура, °С	11,5	16,1	19,1	17,4
	Сумма осадков, мм	47,0	69,0	76,0	87,0

Примечание: * «Погода и климат. Справочно-информационный портал»

Note: * Weather and Climate. Reference and Information Portal

наблюдала умеренное развитие *B. graminis*, а в 2022 г. – эпифитотийный уровень распространения гриба. Степень поражения восприимчивого сорта ‘Белогорский’ по всему посеву составляла 3 балла в 2021 г. и 1 балл – в 2022 г. В результате скрининга образцов в 2021 г. выявили 182 высокоустойчивых (7–9 баллов) образца, тогда как в 2022 г. высокоустойчивыми оказались только 42 генотипа. Большое количество резистентных ячменей в 2021 г., вероятно, связано с жарким летом и следовательно более слабым по сравнению с последующим годом развитием мучнистой росы. Наиболее восприимчивыми (1–3 балла) в 2022 г. оказались 707 образцов, сред-

ней степенью (5 баллов) устойчивости к патогену характеризовался 201 образец. Не поражались или поражались слабо во взрослой фазе развития в течение двух лет наблюдений растения 38 образцов ячменя (30 из Японии, 7 из Китая, 1 из Непала). У 21 образца устойчивость к патогену сохранялась в течение всего периода онтогенеза, а у 15 образцов выявлена резистентность в полевых условиях и восприимчивость в лаборатории (табл. 2). Гетерогенные в фазу второго листа при изучении в климатической камере образцы к-3513 и к-27515 слабо (7 баллов) поражались мучнистой росой в поле при естественной эпифитотии.

Таблица 2. Наиболее устойчивые к *Blumeria graminis* на взрослой стадии развития образцы ячменя из стран восточной Азии (Санкт-Петербург, Пушкин; 2021–2022 гг.)

Table 2. Barley accessions most resistant to *Blumeria graminis* at the adult stage of development from the countries of East Asia (Pushkin, St. Petersburg; 2021–2022)

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Происхождение / Origin	Разновидность / Variety	Поражение, балл / Damage, score	
				Проростки / Seedlings	Взрослые растения / Adult plants
3433	Местный	Китай	<i>pallidum</i>	1	7
3513	Местный	Китай	<i>parallelum, pyramidatum</i>	0, 3*	7
10931	Wase golden	Япония	<i>nutans</i>	1	7
10934	Hokudai N1	Япония	<i>erectum, nutans</i>	1	7
11173	Местный	Япония	<i>pyramidatum</i>	3	7
11608	Местный	Япония	<i>nutans, nigricans</i>	0	7
12278	Shansi	Китай	<i>erectum</i>	0	9
12294	Местный	Китай	<i>pallidum</i>	3	7
17545	Jap.456	Япония	<i>erectum</i>	0	9
18437	Местный	Китай	<i>coeleste, himalayense, nudijaponicum</i>	3	7
20238	Kirinehoku N1	Япония	<i>erectum</i>	1	7

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Происхождение / Origin	Разновидность / Variety	Поражение, балл / Damage, score	
				Проростки / Seedlings	Взрослые растения / Adult plants
20272	Коа	Япония	<i>erectum</i>	0	9
20279	Kinai N 5	Япония	<i>erectum</i>	1	9
20289	Kairyohadaka	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
20300	Hayajirohadaka	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
20354	Wasetaukdu gool	Япония	<i>erectum</i>	0	7
20469	Tokushimamochimugi	Япония	<i>chungense</i>	4	7
21310	Kagoshimawasahadaka	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
21325	Shikokuhadaka N 7	Япония	<i>subnudipyramidatum, brevisetum</i>	0	7
21336	Oita nezire N 10	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
21398	Okayamahadaka N 1	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	3	7
21443	Nihonichi	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
21458	Kochinko N 1	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
21473	Chayahadaka N 77	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
23346	Kairyobozumugi	Япония	<i>brevisetum</i>	1	7
23348	Japanische Nackt	Япония	<i>brevisetum</i>	3	7
23866	Gamma 4	Япония	<i>erectum</i>	0	7
23867	Gamma 8	Япония	<i>erectum</i>	1	7
23932	NB1301	Непал	<i>parallelum</i>	0	7
24934	Местный	Китай	<i>medicum</i>	0	7
26742	Beerhadaka	Япония	<i>nudum</i>	0	7
27074	Shiratama hadaka	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	4	7
27515	Ayamehadaka	Япония	<i>subnudipyramidatum</i>	1, 3*	7
27867	Nirasaki Nija 10	Япония	<i>erectum</i>	0	7
27869	Azuma Golden	Япония	<i>erectum</i>	0	7
28779	Nirasaki Nijo 12	Япония	<i>erectum</i>	0	7
29531	Nirasaki wase	Япония	<i>erectum</i>	0	7
29730	Xima La 6	Китай	<i>coeleste</i>	4	7
'Белогорский' (контроль, к-22089, Ленинградская обл., Россия)				4	1

Примечание: * - гетерогенный образец
Note: * - heterogeneous accession

У десяти образцов ярового ячменя (к-3433, к-10931, к-10934, к-11608, к-12278, к-17545, к-20272, к-20279, к-20354, к-27867), выделившихся по устойчивости к заболеванию на всех стадиях роста, был изучен характер наследования признака устойчивости к *B. graminis* при помощи гибридологического анализа. Растения F₁, полученные от скрещивания упомянутых выше генотипов с восприимчивым контролем, были резистентны к патогену, что указывает на доминантный характер наследования признака. Расщепление гибридов F₂ соответствовало моногенному доминантному контролю признака у 9 изученных форм (к-3433, к-10931, к-10934, к-11608, к-17545, к-20272, к-20279, к-20354, к-27867). Проведенные реципрокные скрещивания сорта 'Белогорский' с образцами к-3433, к-10931, к-17545, к-20279 не выявили влияния женского или мужского гаметофитов на характер наследования (табл. 3).

ный против популяции *B. graminis*. В нашем распоряжении не было F₂ от скрещивания к-12278 с восприимчивым тестером. Этот образец может нести несколько генов устойчивости, однако один из них тождествен доминантному гену, имеющемуся у к-11608 и к-17545. Этот доминантный аллель отличается от аллеля, которым защищен образец к-20279 (расщепление по двум доминантным генам в F₂ к-17545 × к-20279 и к-20279 × к-11608).

Таким образом, можно утверждать, что образцы к-11608, к-12278 и к-17545 имеют один идентичный ген устойчивости, эффективный против популяции *B. graminis*, а устойчивость образца к-3433 обусловлена доминантным геном, отличающимся от генов, имеющих у образцов к-10931 и к-20279.

Оценка устойчивости коллекции ячменя из Восточно-азиатского центра происхождения и доместикации куль-

Таблица 3. Расщепление по устойчивости к *Blumeria graminis* гибридов F₂ от скрещивания выделившихся образцов ярового ячменя с восприимчивым тестером

Table 3. Segregation for *Blumeria graminis* resistance in F₂ hybrids from crossing the selected spring barley accessions with a susceptible tester

Комбинация скрещивания / Cross combination	Изучено растений / Total number of plants	Соотношение фенотипов R : S / Ratio of phenotypes R : S		χ ²
		наблюдаемое / observed	ожидаемое / expected	
Белогорский × к-3433	280	200 : 80	3 : 1	1,91*
Белогорский × к-10931	198	147 : 51	3 : 1	0,06
Белогорский × к-17545	389	283 : 106	3 : 1	1,05
Белогорский × к-20279	499	390 : 109	3 : 1	2,65
Белогорский × к-27867	316	238 : 78	3 : 1	0,02
к-3433 × Белогорский	203	141 : 62	3 : 1	3,32
к-10931 × Белогорский	165	127 : 38	3 : 1	0,34
к-10934 × Белогорский	273	199 : 74	3 : 1	0,64
к-11608 × Белогорский	437	338 : 99	3 : 1	1,28
к-17545 × Белогорский	212	160 : 52	3 : 1	0,03
к-20272 × Белогорский	214	160 : 54	3 : 1	0,006
к-20279 × Белогорский	337	248 : 89	3 : 1	1,16
к-20354 × Белогорский	92	73 : 19	3 : 1	0,92

Примечание: * Здесь и далее: χ²_{0,05} = 3,84

Note: * Here and afterwards: χ²_{0,05} = 3.84

Для изучения аллельных отношений генов устойчивости 6 выделившихся образцов (к-3433, к-10931, к-11608, к-12278, к-17545, к-20279) скрещивали между собой. Расщепление по фенотипу в четырех популяциях гибридов F₂ (к-17545 × к-20279, к-20279 × к-3433, к-20279 × к-11608, к-10931 × к-3433) соответствовало 15R : 1S, что указывает на различие генов, контролирующих устойчивость у родительских компонентов гибридов ячменя (табл. 4). В комбинациях к-17545 × к-11608 и к-11608 × к-12278 расщепление не было выявлено (176R : 0S и 165R : 0S соответственно), следовательно образцы к-11608, к-12278 и к-17545 имеют общий ген, эффектив-

турных растений позволила выделить достаточно большое количество резистентных к мучнистой росе образцов не только на ювенильной стадии развития, но также и у взрослых растений в поле. Среди 37 генотипов, показавших устойчивость к *B. graminis* в фазе всходов (Abdullaev et al., 2022), 16 сильно поразились в фазе колошения и, напротив, у 18 изученных образцов с сильным проявлением заболевания при искусственном заражении проростков наблюдали лишь единичные пустулы патогена на листьях взрослых растений (см. табл. 2). Очевидно, отсутствие или сильное развитие мицелия на разных этапах онтогенеза ячменя обуславливается раз-

Таблица 4. Расщепление по устойчивости к *Blumeria graminis* гибридов F₂ от скрещивания устойчивых образцов ярового ячменя между собой**Table 4.** Segregation of resistance to *Blumeria graminis* in F₂ hybrids from crossing resistant spring barley accessions with each other

Комбинация скрещивания/ Cross combination	Изучено растений/ Total number of plants	Соотношение фенотипов R : S / Ratio of phenotypes R : S		χ ²
		наблюдаемое / observed	ожидаемое / expected	
к-17545 × к-20279	450	430 : 20	15 : 1	2,51
к-17545 × к-11608	176	176 : 0	-	-
к-20279 × к-3433	117	110 : 7	15 : 1	0,014
к-20279 × к-11608	389	367 : 22	15 : 1	0,23
к-11608 × к-12278	165	165 : 0	-	-
к-10931 × к-3433	197	185 : 12	15:1	0,001

личными генетическими системами, контролирующими признак устойчивости растений к *B. graminis*.

Среди пяти генотипов, выделившихся на экспериментальном поле ППЛ ВИР в условиях естественной эпифитотии в 2001–2002 гг. (Radchenko et al., 2004), три (к-12302, к-15582 и к-15869) оказались восприимчивы (3 балла) к *B. graminis* в 2021–2022 гг., образец к-12224 характеризовался умеренной устойчивостью (5 баллов) и лишь к-3513 слабо (7 баллов) поражен грибом в поле. Потеря резистентности образцов к-12302, к-15582 и к-15869 указывает на изменение состава популяции патогена.

Большую ценность для селекции представляют генотипы, сочетающие сразу несколько признаков, имеющих важное хозяйственное значение. Так, выделенные нами образцы ячменя из Японии к-17545 (Jar.456) и к-20279 (Kinai 5), у которых идентифицирован один эффективный доминантный ген устойчивости к *B. graminis*, являются носителями аллеля *eam8.k*, контролирующего нечувствительность к продолжительности фотопериода ячменя (Zveinek et al., 2022; Zakhrabekova et al., 2012).

Заключение

В результате изучения 950 коллекционных форм ячменя из Восточноазиатского генцентра при естественной эпифитотии мучнистой росы выявлено значительное разнообразие образцов по резистентности к патогену. Слабое развитие мучнистой росы в период колосения наблюдали на растениях 38 образцов. Высокой устойчивостью на проростковой и взрослой стадиях развития характеризуется 21 генотип. Эти образцы могут быть рекомендованы для использования в селекционных программах. Гены устойчивости значительного числа исследованных образцов различаются по стабильности проявления признака на разных этапах развития растений. Установлено, что образцы к-3433, к-10931, к-10934, к-11608, к-17545, к-20272, к-20279, к-20354, к-27867 имеют по одному доминантному гену устойчивости. Генотипы к-11608, к-12278 и к-17545 защищены тождественным геном, а устойчивость образца к-3433 обусловлена доминантным геном, отличающимся от имеющихся у образцов к-10931 и к-20279.

References / Литература

- Abdullaev R.A., Anisimova I.N., Kovaleva O.N., Radchenko E.E. Juvenile resistance of barleys from the East Asian center of crop origin and domestication to powdery mildew. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(3):188-193. [in Russian] (Абдуллаев Р.А., Анисимова И.Н., Ковалева О.Н., Радченко Е.Е. Ювенильная устойчивость ячменей из Восточноазиатского центра происхождения и доместикации культурных растений к мучнистой росе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(3);188-193). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-3-188-193
- Czembor H.J., Czembor J.H. Resistance to powdery mildew in barley cultivars and breeding lines included in 1998–2000 Polish registration trials. *Plant Breeding and Seed Science*. 2001;45(1):21-41.
- Dahiya S., Kumar S., Chaudhary C., Chaudhary C. Lodging: Significance and preventive measures for increasing crop production. *International Journal of Chemical Studies*. 2018;6(1):700-705.
- Dospikhov V.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов В.А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат; 1985).
- Giraldo P., Benavente E., Manzano-Agugliaro F., Gimenez E.J.A. Worldwide research trends on wheat and barley: A bibliometric comparative analysis. *Agronomy*. 2019;9(7):352. DOI: 10.3390/agronomy9070352
- Gong X., Li C., Zhang G., Yan G., Lance R., Sun D. Novel genes from wild barley *Hordeum spontaneum* for barley improvement. In: G. Zhang, C. Li, X. Lui (eds). *Advance in Barley Sciences: Proceedings of 11th International Barley Genetics Symposium*. Dordrecht: Springer; 2013. p.69-86. DOI: 10.1007/978-94-007-4682-4_6
- Gürel F.; Öztürk Z.N.; Uçarlı C., Rosellini D. Barley genes as tools to confer abiotic stress tolerance in crops. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1137. DOI: 10.3389/fpls.2016.01137
- Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. Guidelines for the study and preservation of the world collection of barley and oats (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kolleksii yachmenya i ovsa). St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Ковалева О.Н., Блинова Е.В. Методические указания по

- изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).
- Mains E.B., Dietz S.M. Physiologic forms of barley mildew *Erysiphe graminis hordei*. *Phytopathology*. 1930;20(3):229-239.
- Malik R., Kumar P., Verma R.P.S., Sheoran S., Kumar D., Kumar L. et al. Molecular strategies for managing disease resistance in barley. In: C. Kole (ed.) *Genomic Designing for Biotic Stress Resistant Cereal Crops*. Cham: Springer; 2021. p.177-212. DOI: 10.1007/978-3-030-75879-0_4
- Marzani Q.A., Amin M.M., Fateh S.A. Evaluation the effects of powdery mildew caused by *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* and cultivar on the barley lodging. *European Journal of Plant Pathology*. 2022;165(3):233-240. DOI: 10.1007/s10658-022-02601-y
- Merezhko A.F., Ezrokhin L.M., Yudin A.E. Guidelines for an effective pollination technique for cereal crops (Metodicheskiye ukazaniya po effektivnomu metodu opyleniya zernovykh kultur). Leningrad: VIR; 1973. [in Russian] (Мережко А.Ф., Эзрохин Л.М., Юдин А.Е. Методические указания по эффективному методу опыления зерновых культур. Ленинград: ВИР; 1973).
- Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Anisimova I.N. Genetic diversity of cereal crops for powdery mildew resistance. *Ecological Genetics*. 2020;18(1):59-78. DOI: 10.17816/ecogen14530
- Radchenko E.E., Zveinek I.A., Tyryshkin L.G., Konovalova G.S., Semenova A.G., Khokhlova A.P. Catalogue of the VIR global collection. Issue 751. Barley. Pest and disease resistance of accessions from South-East Asia (Katalog mirovoy kollektsii VIR. Vypusk 751. Yachmen. Ustoychivost obraztsov iz Yugo-Vostochnoy Azii k vreditelyam i boleznyam). St. Petersburg: VIR; 2004. [in Russian] (Радченко Е.Е., Звейнек И.А., Тырышкин Л.Г., Коновалова Г.С., Семенова А.Г., Хохлова А.П. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 751. Ячмень. Устойчивость образцов из Юго-Восточной Азии к вредителям и болезням. Санкт-Петербург: ВИР; 2004).
- Tratwal A., Bocianowski J. *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* virulence frequency and the powdery mildew incidence on spring barley in the Wielkopolska province. *Journal of Plant Protection Research*. 2014;54(1):28-35. DOI: 10.2478/jppr-2014-0005
- Zakhrabekova S., Gough S.P., Braumann I., Müller A.H., Lundqvist J., Ahmann K. et al. Induced mutations in circadian clock regulator *Mat-a* facilitated short-season adaptation and range extension in cultivated barley. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2012;109(11):4326-4331. DOI: 10.1073/pnas.1113009109
- Zawieja B., Bakinowska E., Bichoński A., Pilarczyk W. Impact of cereal diseases on the qualitative traits of spring barley breeding lines. *Biometrical Letters*. 2017;54(1):77-90. DOI: 10.1515/bile-2017-0005
- Zveinek I.A., Abdullaev R.A., Matvienko I.I., Radchenko E.E., Alpatieva N.V. Identification of the *eam8* allele associated with photoperiod insensitivity in barley accessions from Japan. *Ecological Genetics*. 2022;20(2):101-109. [in Russian] (Звейнек И.А., Абдуллаев Р.А., Матвиенко И.И., Радченко Е.Е., Алпатьева Н.В. Идентификация аллеля *eam8*, ассоциированного со слабой чувствительностью к фотопериоду, у образцов ячменя из Японии. *Экологическая генетика*. 2022;20(2):101-109). DOI: 10.17816/ecogen106033

Информация об авторах

Ренат Абдуллаевич Абдуллаев, 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, abdullaev.1988@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1021-7951>

Ксения Андреевна Лукина, 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, k.lukina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5477-8684>

Белакхан Абдурашидовна Баташева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, 368612 Россия, Республика Дагестан, Дербентский район, село Вавилово, kostek-kum@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2266-281X>

Ковалева Ольга Николаевна, 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, o.kovaleva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3990-6526>

Радченко Евгений Евгеньевич, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, eugene_radchenko@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3019-0306>

Information about the authors

Renat A. Abdullaev, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, abdullaev.1988@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1021-7951>

Ksenia A. Lukina, Postgraduate Student, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, k.lukina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5477-8684>

Belakhan A. Batasheva, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Dagestan Experimental Station of VIR, Vavilovo Village, Derbent District 368612, Republic of Dagestan, Russia, kostek-kum@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2266-281X>

Olga N. Kovaleva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.kovaleva@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3990-6526>

Evgeny E. Radchenko, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, eugene_radchenko@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3019-0306>

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 14.04.2023; одобрена после рецензирования 05.05.2023; принята к публикации 04.09.2023.
The article was submitted on 14.04.2023; approved after reviewing on 05.05.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 631.527.8+631.524.84
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-187-195



Triticum durum Desf. – ценный источник генов для расширения генетического разнообразия яровой мягкой пшеницы

А. Е. Дружин¹, С. Н. Сибикеев¹, Е. И. Гультяева², Л. В. Андреева¹

¹ Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Евгеньевич Дружин, alex_druzhin@mail.ru

Актуальность. Расширение генетического разнообразия генофонда вида *Triticum aestivum* L. за счет использования чужеродного хроматина, в том числе и от вида *Triticum durum* Desf., является важным элементом создания сортов мягкой пшеницы, отвечающих современным требованиям.

Материалы и методы. В изучение были включены интрогрессивные линии яровой мягкой пшеницы Л153, Л154 и Л155, созданные с участием сортов яровой мягкой пшеницы 'Л503' и 'Л505' и яровой твердой пшеницы мексиканской селекции 'Yazi10' и 'Taggo'. Оценка линий включала фитопатологические, фенологические, генетические и технологические исследования, которые проводили по общепринятым методикам как в полевых, так и в лабораторных условиях. Для идентификации *Lr*-генов устойчивости к *Puccinia triticina* Erikss. sp. *tritici* у исследуемых линий использовали 17 ДНК-маркеров. Все полученные данные подвергали статистическому анализу, используя пакет селекционно-генетических программ Agros-2.10.

Результаты. Исследования интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы Л153, Л154 и Л155, созданных с участием сортов твердой пшеницы 'Yazi10' и 'Taggo', показали, что устойчивость этих линий к возбудителю листовой ржавчины обусловлена *Lr*-генами от сортов твердой пшеницы. Установлено влияние донора генов, а также сортов-реципиентов на ряд хозяйственно полезных признаков. Отмечен сорт-реципиент 'Л505', имеющий хорошие комбинационные способности.

Заключение. Интрогрессия хроматина от твердой пшеницы в генофонд яровой мягкой пшеницы позволила создать линии, устойчивые к местной популяции возбудителя листовой ржавчины, а также к некоторым тест-клонам этого патогена. Эти линии могут быть использованы как доноры неидентифицированных *Lr*-генов. Кроме этого, линия Л154 сочетает в себе хорошую продуктивность зерна и качество получаемой продукции.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., твердая пшеница, интрогрессия генов, листовая ржавчина, хозяйственно полезные признаки

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 123011900038-8 «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».

Статья подготовлена к конференции, посвященной 50-летию лаборатории генетики и цитологии ФАНЦ Юго-Востока. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Дружин А.Е., Сибикеев С.Н., Гультяева Е.И., Андреева Л.В. *Triticum durum* Desf. – ценный источник генов для расширения генетического разнообразия яровой мягкой пшеницы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):187-195. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-187-195

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-187-195

***Triticum durum* Desf. is a valuable source for spring bread wheat genetic diversity enhancement**Alexander E. Druzhin¹, Sergey N. Sibikeev¹, Elena I. Gulyaeva², Lubov B. Andreeva¹¹ Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, Russia² All-Russian Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia**Corresponding author:** Alexander E. Druzhin, alex_druzhin@mail.ru

Background. Enhancement of the *Triticum aestivum* L. genetic diversity by means of alien chromatin, including that from *Triticum durum* Desf., is an important element in the breeding of bread wheat cultivars that meet modern requirements.

Materials and methods. The study included the L153, L154 and L155 introgressive spring bread wheat lines produced from crosses between the spring bread wheat cultivars 'L503' and 'L505' and spring durum wheat cultivars 'Yazi10' and 'Tarro' developed in Mexico. Evaluation of these introgressive lines included phytopathological, phenological, genetic, and breadmaking analyses carried out with conventional methods both under open-air and laboratory conditions. Seventeen DNA markers were used to identify genes for resistance to *Puccinia triticina* Erikss. f. sp. *tritici* in the lines. The obtained data were statistically analyzed using the Agros-2.10 package of breeding and genetic programs.

Results. Studying introgressive spring bread wheat lines L153, L154 and L155, developed with the participation of durum wheat cvs. 'Yazi10' and 'Tarro', showed that leaf rust resistance of these lines was induced by the *Lr* genes from durum wheat cultivars. The effect of the gene donor and the recipient cultivars on a number of useful agronomic traits was identified. The recipient cv. 'L505' was noted for its good combining abilities.

Conclusion. Introgression of chromatin from durum wheat cultivars into the spring bread wheat gene pool made it possible to produce lines resistant to the local *P. triticina* population, as well as to some test clones of this pathogen. Such lines can be used as donors of the *Lr* genes. In addition, the L154 introgressive line combined good grain productivity and baking quality.

Keywords: *Triticum aestivum* L., durum wheat, gene introgression, leaf rust, useful agronomic traits

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the state task, Project No. 123011900038-8 "Development and improvement of the system of crop species and cultivars (hybrids) adaptive to abiotic stressors and resistant to major pathogens, combining high potential productivity with harvest quality, in order to reduce economic risks in crop production and increase biodiversity in the region".

The article was prepared for the conference dedicated to the 50th anniversary of the Genetics and Cytology Laboratory, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Druzhin A.E., Sibikeev S.N., Gulyaeva E.I., Andreeva L.B. *Triticum durum* Desf. is a valuable source for spring bread wheat genetic diversity enhancement. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):187-195. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-187-195

Введение

Твердая пшеница *Triticum durum* Desf. (геном AⁿAⁿBB, 2n = 28) довольно давно используется в селекции для расширения генетического разнообразия мягкой пшеницы *Triticum aestivum* L. (геном AⁿAⁿBBDD, 2n = 42). Этот вид является источником генов устойчивости к болезням и вредителям, а также генов, отвечающих за качество зерна. Первые упоминания о скрещивании мягкой и твердой пшеницы относятся к концу XIX века, но практического выхода от полученных гибридов не было; целью данных скрещиваний было улучшение мягкой пшеницы за счет твердой и наоборот. Первым практически значимым результатом скрещивания двух видов пшениц можно назвать получение спонтанного гибрида, выявленного австралийским энтузиастом J. Correll, который в 1897 г. нашел в посевах твердой пшеницы безостую форму. Дальнейший отбор позволил создать сорт безостой твердой пшеницы 'Huguenot', который использовался в основном на зеленый корм (Grasby, 1912). Другой австралийский селекционер W. Farrer получил ряд гибридов между мягкой и твердой пшеницей, но большой практической значимости эти гибриды также не имели и выращивались в основном на сено (Vavilov, 1960). Перспективные гибриды между твердой и мягкой пшеницей были получены в Тунисе селекционером F. Voeuf, который, используя гибридные линии из Австралии, скрестил их с местными сортами твердой пшеницы, но, к сожалению, несмотря на положительные результаты, данные линии в производство не пошли (Voeuf, 1925).

Работа селекционеров из США по скрещиванию сортов мягкой и твердой пшеницы была не только результативной, но и практически значимой (Hayes et al., 1920). В 1920 г. в результате скрещивания сортов 'Marquis' (*T. aestivum*) и 'Iumillo' (*T. durum*) была выделена 42-хромосомная линия, в дальнейшем ставшая сортом яровой мягкой пшеницы 'Marquillo', который обладал устойчивостью к комплексу заболеваний. В 1939 г. посевные площади под этим сортом составляли около 60 тыс. га. Не менее результативным оказалось скрещивание сортов 'Marquis' и 'Pentad'. От этой комбинации были получены такие сорта, как 'Coronation', 'Coronation-1', 'CT-120', 'CT-401', 'CT-402' и другие, но практическое значение имел только сорт 'Coronation', и даже он высевался на незначительной площади. Дальнейшая работа по гибридизации мягкой и твердой пшеницы позволила получить ряд сортов яровой мягкой пшеницы, но коммерчески значимыми оказались только 'Spinkcota' с максимальной площадью возделывания 42,6 тыс. га в 1959 г. и 'Lathrop', у которого в 1969 г. посевные площади достигли 1,2 тыс. га (<https://wheat.pw.usda.gov/ggpages/gopher/cwc/CommWheatCult/cwc4.html>).

Большой интерес и практическое значение имеют работы по скрещиванию яровой мягкой и твердой пшеницы, выполненные на Саратовской сельскохозяйственной опытной станции (ныне ФАНЦ Юго-Востока). В 1912 г. в результате скрещивания местных сортов 'Белотурка' (*T. durum*) и 'Полтавка' (*T. aestivum*) были получены гибриды, из которых выделены такие сорта яровой мягкой пшеницы, как 'Альбосар', 'Блансар', 'Сарроза' и 'Саррубра'. Особо следует выделить сорт 'Саррубра', который в 1938 г. высевался на максимальной площади более 1,3 млн га. Другой сорт 'Эритроспермум 82/2', полученный в этом же учреждении от скрещивания 'Гордеиформе 5783' (*T. durum*) и 'Лютесценс 1247' (*T. aestivum*), зани-

мал на пике своего распространения 83 тыс. га (Shekhrudin, 1961).

Анализ литературы показал, что многие сорта, полученные от межвидовых скрещиваний, в том числе и от *T. durum* с *T. aestivum*, являются источниками ценных генов и успешно используются в селекционных программах.

Несмотря на то что *T. durum* обладает устойчивостью к листовой и желтой ржавчине, мучнистой росе, твердой и пыльной головне, гессенской мухе (Vavilov, 1964) и интенсивно используется в процессе улучшения мягкой пшеницы, довольно мало генов устойчивости было идентифицировано у этого вида. На сегодняшний день установлены гены устойчивости к мучнистой росе *Pm68*, *Pm3h* (Lebedeva, Zuev, 2021), к листовой ржавчине *Lr23*, *Lr61*, *Lr79*, стеблевой ржавчине *Sr12*, а также ряд генов, отвечающих за качество и некоторые другие признаки (McIntosh et al., 2013, 2018). В селекционной работе довольно широко используется только ген *Lr23*, перенесенный в мягкую пшеницу от сорта твердой пшеницы 'Gaza' (McIntosh et al., 1995). В нашей стране первыми сортами с геном *Lr23* стали сорта мягкой пшеницы 'Куйбышевская 1', 'Олимп', 'Ершовская 32', 'Саратовская 56' и другие (Markelova, 2007).

С целью увеличения генетического разнообразия генофонда мягкой пшеницы, в том числе и по *Lr*-генам, за счет привлечения генетического материала от сортов твердой пшеницы, в лаборатории генетики и цитологии ФАНЦ Юго-Востока ведется работа по скрещиванию этих двух видов. Ранее проведенные исследования по использованию саратовских сортов твердой пшеницы, в том числе сорта 'Золотая волна', показали хорошие результаты, в частности у интрогрессивных линий яровой мягкой пшеницы не выявлено негативного влияния на хозяйственно полезные признаки хроматина от твердой пшеницы, при этом *Lr*-гены от этого вида были эффективны против популяции листовой ржавчины (Sibikeev et al., 2020). Для дальнейшего расширения этой работы нами были включены в селекционный процесс сорта яровой твердой пшеницы иностранной селекции 'Tarro' и 'Yazi10' (CIMMYT). Результаты изучения линий яровой мягкой пшеницы, содержащих хроматин от этих сортов твердой пшеницы, представлены в данной статье.

Материалы и методы

В изучение были включены следующие генотипы: сорта яровой мягкой пшеницы 'Л505' и 'Л503' (ФАНЦ Юго-Востока), содержащие 7DS-7DL-7Ae#1L-транслокацию с геном *Lr19* от *Agropyron elongatum* (Host) P. Beauv. (McIntosh et al., 2013); сорт 'Фаворит' (ФАНЦ Юго-Востока) – замещение 6D(6Ag) от *Agropyron intermedium* (Host) P. Beauv. (Sibikeev, 2017), который являлся стандартом для Саратовской области до 2020 г.; сорта яровой твердой пшеницы селекции CIMMYT (Мексика) 'Tarro' (Харьковская 5/Aix) и 'Yazi10' (Calidris/Chuanmai-18//Altar-84) (<http://www.wheatpedigree.net/>) были отобраны нами как устойчивые к местной популяции листовой ржавчины (*Puccinia triticina* Erikss. f. sp. *triticin*). В результате скрещивания вышеуказанных сортов мягкой пшеницы с сортами твердой пшеницы были получены интрогрессивные линии Л153 (Л505/Yazi10//Л505/3/Л505), Л155 (Л503/Tarro//Л503) и Л154 (Л505/Tarro//Л505/3/Л505).

Изучение устойчивости к комплексу заболеваний (листовая и стеблевая ржавчина, мучнистая роса) прово-

дили как на естественном инфекционном фоне в селекционном посеве ФАНЦ Юго-Востока (г. Саратов, 2017–2022 гг.), так и в лабораторных условиях во Всероссийском научно-исследовательском институте защиты растений (ВИЗР, г. Санкт-Петербург). На экспериментальных посевах ФАНЦ Юго-Востока в 2017 г. степень развития болезней (листовая ржавчина и мучнистая роса) оценивалась как сильная, в 2022 г. – как средняя, а в 2020 г. отмечена стеблевая ржавчина, которая достигала средней степени развития. В ВИЗР проводили оценку интрогрессивных линий и контрольных образцов в лабораторных условиях при искусственном заражении растений возбудителем листовой ржавчины в стадии проростков (фаза трех листьев). Инокуляцию проводили с использованием саратовской (Поп_Сар) и омской (Поп_Омск) популяций *P. tritricina*, а также трех тест-клонов, выделенных из популяций разного географического происхождения и различающихся формулой вирулентности/авирулентности: тест-клон ТК1 (Челябинская обл., 2019 г.) – 1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 9, 10, 11, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 20, 30 / 19, 23, 24, 26, 28, 29, 44; тест-клон ТК2 (Тамбовская обл., 2016 г.) – 1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 14a, 14b, 15, 17, 18, 19, 20, 30, 44 / 9, 11, 16, 23, 24, 26, 28, 29; тест-клон ТК3 (Краснодарский край, 2017 г.) – 1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 11, 14a, 14b, 15, 17, 18, 20, 23, 26, 30, 44 / 9, 16, 19, 24, 28, 29; Поп_Сар (Саратовская обл., 2020 г.) – 1, 2a, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 11, 14a, 14b, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 26, 30 / 9, 24, 28, 29, 44; Поп_Омск (Омская обл., 2019 г.) – 1, 2b, 2c, 3a, 3bg, 3ка, 10, 11, 14a, 14b, 16, 17, 18, 23, 26, 30, 44 / 9, 2a, 15, 19, 20, 24, 28, 29.

Для оценки устойчивости к возбудителю листовой ржавчины использовали шкалу E. V. Mains и H. S. Jackson (1926). Растения с типом реакции 0, 0₁, 1, 2 считали устойчивыми, а 3, 4 и X – восприимчивыми. Тип реакции растений на заражение возбудителем мучнистой росы определяли по шкале E. V. Mains, S. M. Dietz (1930). Оценка устойчивости к местной популяции возбудителя стеблевой ржавчины проводили по модифицированной шкале Кобба и реакции хозяина на внедрение патогена: R = устойчивый – 1 балл; TR = единичные пустулы, некротичные пятна, устойчивый – 1 балл; MR = умеренно устойчивый – 2 балла; MS = умеренно восприимчивый – 2-3 балла; M = промежуточный между устойчивым и восприимчивым – 2-3 балла; MSS = от умеренно восприимчивого до восприимчивого – 4 балла; TS = единичные пустулы, восприимчивый – 3-4 балла; S = восприимчивый – 4 балла (Roelfs et al., 1992).

Для идентификации *Lr*-генов устойчивости к листовой ржавчине у линий Л153, Л154 и Л155 использовали ДНК-маркеры: WR003 F/R гена *Lr1*; SCS5 гена *Lr9*; F1.2245/*Lr10*-6/r2 гена *Lr10*; Gb SCS265 гена *Lr19*; STS638 гена *Lr20*; Sr24#50, Sr24#12 гена *Lr24*; iag 95 гена *Lr26*; SCS421 гена *Lr28*; *Lr29F24* гена *Lr29*, SCM9, cslV34, L34D-INT9F: L34MINUSL34PLUS гена *Lr34*, Sr39#22r гена *Lr35*; Ventriup/LN2 гена *Lr37*, GDM35 гена *Lr41* (=39), PS10 гена *Lr47*, S13-R16 гена *Lr66*. ПЦР-анализ выполнен по ранее опубликованной методике (Gultyaeva, 2012).

Оценку линий по хозяйственно полезным свойствам проводили в 2017–2022 гг. В изучение входила оценка линий Л153, Л154, Л155 по морфологическим признакам, признакам продуктивности зерна, физическим свойствам теста и хлебопекарным показателям в сравнении с реципиентами 'Л503', 'Л505' и сортом-стандартом 'Фаворит'.

Вегетационные периоды в годы исследований различались по температурным и водным режимам. Наиболее

благоприятными по количеству осадков и температурному режиму были 2017 и 2022 г., умеренно засушливыми были 2020 и 2021 г., 2018 и 2019 г. характеризовались сильной засухой.

Материал высевали в оптимальные сроки в семярядковые деланки площадью 7 м², рендомизировано в 4-кратной повторности. Норма высева – 400 семян/м², посев проводили на глубину 5 см. Площадь питания растений 20 × 5 см. Уборку осуществляли комбайном Nege 125 В.

Качество зерна и теста оценивали по содержанию белка в зерне на приборе Infratec TM 1241 (Дания), качество и количество сырой клейковины – по показателям прибора ИДК-3 (Россия), реологические свойства теста – на альвеографе Chopin (Франция) с выпечкой опытных образцов хлебцев. Все полученные данные подвергали дисперсионному анализу и множественному сравнению по критерию Дункана, используя пакет селекционно-генетических программ Agros-2.10.

Результаты и обсуждение

Оценка интрогрессивных линий по устойчивости к заболеваниям

Предварительный анализ устойчивости мексиканских сортов твердой пшеницы 'Yazi10' и 'Tarro' к местным популяциям ряда патогенов и в первую очередь к возбудителю листовой ржавчины в условиях естественного инфекционного фона показал, что они имеют тип реакции (IT) на *P. tritricina* – 0, слабо поражаются мучнистой росой, как и сорт-стандарт 'Фаворит'. При этом для реципиентов яровой мягкой пшеницы 'Л503' и 'Л505' характерен тип реакции 3 при поражении листовой поверхности до 30%.

Изучение гибридов F₁ по устойчивости к *P. tritricina* показало, что комбинации Л505/Tarro, Л505/Yazi10 и Л503/Tarro проявили тип реакции IT = 0. Таким образом, гены устойчивости у сортов 'Yazi10' и 'Tarro' доминантные.

При дальнейшем беккроссировании реципиентами 'Л505' и 'Л503' у гибридов F₂ в комбинации Л505/Tarro//Л505/3/Л505, Л503/Tarro//Л503/3/Л503 расщепление по устойчивости к *P. tritricina* соответствовало 9R : 7S, при этом критерий соответствия теоретически ожидаемых результатов и фактических данных был в пределах $\chi^2 = 1,02-1,32$, табличное значение χ^2 для df = 1 – 3,84. Эти данные свидетельствуют об аддитивном взаимодействии двух доминантных генов, а именно *Lr19* от сортов яровой мягкой пшеницы 'Л505' и 'Л503' и другой *Lr*-гена от сорта твердой пшеницы 'Tarro'. Расщепление по устойчивости к листовой ржавчине у гибридов F₂ комбинации Л505/Yazi10//Л505/3/Л505 соответствовало 3R : 1S ($\chi^2 = 1,01$). Полученные данные указывают на доминантное моногенное наследование, причем устойчивость обеспечивает ген от сорта твердой пшеницы 'Yazi10'.

Гены, перенесенные от сортов твердой пшеницы 'Yazi10' и 'Tarro' в сорта яровой мягкой пшеницы 'Л505' и 'Л503', либо идентичны генам *Lr23*, *Lr61*, *Lr79*, либо новые, еще неидентифицированные. Так, например, у сорта 'Yazi10' гены устойчивости не идентифицированы, однако в родословной этого сорта присутствуют сорта с идентифицированными генами устойчивости. На основании этого мы можем постулировать, что 'Yazi10' может иметь *Lr23*, *LrAt* (<http://www.wheatpedigree.net/>) от сорта 'Altar-84'; либо гены *Lr16*, *Lr26* от сорта 'Chuanmai-18' (<http://www.wheatpedigree.net/>). Информацией о генети-

ческом контроле устойчивости у сорта 'Тарго' мы, к сожалению, не обладаем.

Ген *Lr23* локализован в хромосоме 2BS, он хорошо изучен и используется в селекционной работе довольно давно. *Lr23* представляет собой сложный локус и, возможно, сцеплен с другими генами, отвечающими за долговременную устойчивость «*slow-rusting*» (Odintsova, Peusha, 1984). Кроме того, этот ген является температурочувствительным, оптимальная температура для экспрессии – выше 20°C (Peusha et al., 1982; Dyck, Johnson, 1983). Имеются также гены-модификаторы, которые отвечают за уровень экспрессии этого гена (McIntosh et al., 2013). Несмотря на наличие в популяциях патогена вирулентного патотипа *pp23*, сильное развитие заболевания не происходит. Влияние *Lr23* проявлялось в снижении числа и размера пустул, а также в подавлении спорогенной активности и жизнеспособности гриба (Markelova, 2007; Plotnikova, Meshkova, 2013). Несмотря на то что ген *Lr23* преодолен патогеном, его эффективность в комбинации с другими генами довольно высокая (Sibikeev et al., 2002).

Ген *Lr61* идентифицирован относительно недавно. Он обеспечивает устойчивость сортов твердой пшеницы к ряду рас *P. tritricina*, локализован в хромосоме 6BS и является частично доминантным (Herrera-Foessel et al., 2008). Ген быстро утратил свою эффективность и поэтому редко используется в селекции (Huerta-Espino et al., 2022).

Ген *Lr79*, идентифицированный у сорта твердой пшеницы 'Aus26582' и локализованный в хромосоме 3BL, пока слабо изучен и мало используется в селекционной работе, в том числе и в России (Qureshi et al., 2018).

Оценка линий и сортов по устойчивости к *P. tritricina* в фазе проростков с использованием тест-клонов (ТК1, ТК2, ТК3) и популяций патогена (Поп_Омск19, Поп_Сар20) показала отсутствие симптомов поражения (IT = 0) у линии Л153 при заражении тест-клонами ТК2, ТК3 и саратовской популяцией патогена 2020 г., а к омской популяции и к тест-клону ТК1 эта линия имела смешанную реакцию IT = 0-1 и IT = 0,3 соответственно. Линия Л154 устойчива (IT = 0) к тест-клонам ТК1, ТК3, омской и саратовской популяциям, однако восприимчива (IT = 3) к тест-клону ТК2 (табл. 1). Линию Л155 оценили по устойчивости лишь к саратовской популяции патогена, к которой данная линия высокоустойчива (IT = 0).

Сорта 'Л505' и 'Л503' проявили устойчивую реакцию (IT = 0) к омской популяции и ТК1, ТК3, а к саратовской популяции и клону ТК2 оказались восприимчивы (IT = 3). Сорт-стандарт 'Фаворит' устойчив ко всем популяциям и тест-клонам (IT = 0). Следует отметить, что саратовская популяция *P. tritricina* считается одной из самых вирулентных. При этом, что касается наличия патотипа *pp19*, вирулентного к гену *Lr19* и патотипа *pp23*, вирулентного к гену *Lr23*, их присутствие в популяции отмечается ежегодно, за исключением ряда лет. Различие между патотипами заключается в том, что частота *pp19* уже стабилизировалась и колеблется в популяции в пределах 10%, а патотип *pp23* находится в стадии стабилизации и его частота колеблется от 0 до 100% (Sibikeev et al., 2020).

Полученные данные позволили постулировать, что у линии Л153 устойчивость к листовой ржавчине контролируется одним доминантным геном. При этом, основываясь на данных фитопатологического анализа и родословной этой линии, этот ген не идентичен *Lr23*, *Lr16*, *Lr26* и, возможно, идентичен *Lr61* или *Lr79*, либо является новым, неидентифицированным геном.

У линий Л154 и Л155 устойчивость контролируется дигенно, при этом линия Л154 проявила устойчивость к большинству тест-клонов и популяциям патогена, кроме тест-клона ТК2. Устойчивость обусловлена аддитивным взаимодействием двух *Lr*-генов, возможно *Lr19* и геном от сорта 'Тарго'. Фитопатологический анализ показал, что *Lr*-гены у линий Л153, Л154, Л155 эффективны против патогена как в стадии проростков, так и взрослых растений, то есть они ювенильные.

Помимо устойчивости к листовой ржавчине (*Puccinia tritricina* f. sp. *tritici*), линии изучали и по устойчивости к другим заболеваниям. Было установлено, что все изучаемые линии слабо поражаются мучнистой росой (*Blumeria graminis* (DC.) Speer f. sp. *tritici* Marchal), в отличие от реципиентов 'Л505' и 'Л503', но восприимчивы к стеблевой ржавчине (*Puccinia graminis* Rers. f. sp. *tritici* Erikss. et Henn.) (см. табл. 1).

Идентификация генов устойчивости

Для идентификации *Lr*-генов у полученных линий был проведен ПЦР-анализ с использованием 17 ДНК-маркеров *Lr*-генов, который позволил идентифицировать в линии Л154 ген *Lr19* от сорта 'Л505'. Наличие этого

Таблица 1. Характеристика линий и сортов яровой мягкой пшеницы по устойчивости к заболеваниям

Table 1. Disease resistance characteristics of spring bread wheat lines and cultivars

Сорт, линия	<i>Puccinia tritricina</i>					<i>Blumeria graminis</i>	<i>Puccinia graminis</i>
	Омская популяция	ТК1	ТК3	ТК2	Саратовская популяция		
	(тип реакции, балл)						
	лабораторные условия, стадия трех листьев 2019 г.					поле, стадия молочной спелости 2020 г.	
'Фаворит'	0	0	0	0	0	1	3
'Л503'	0	0	0	3	3	2	2-3 ед.
'Л505'	0	0	0	3	3	2	2-3 ед.
Л153	0-1	0,3	0	0	0	1	3
Л155	-	-	-	-	0	1	2-3 ед.
Л154	0	0	0	3	0	1	2-3 ед.

гена также подтверждается желтой окраской муки (гены, контролируемые этот признак, и *Lr19* тесно сцеплены) (Prins et al., 1996). Ген *Lr19* с 1994 г. неэффективен против *P. tritricina* f. sp. *tritici* в Саратовской области. Однако в последнее десятилетие в саратовской популяции патогена частота патотипа *pp19* колеблется в пределах от 0 до 20% (Sibikeev et al., 1996; Gulyaeva et al., 2020). Второй ген устойчивости к листовой ржавчине, полученный от сорта 'Taggo', к сожалению, идентифицировать не удалось. Так как в наших исследованиях не использовались ДНК-маркеры генов *Lr23*, *Lr61* и *Lr79*, возможно, второй *Lr*-ген у Л154 может быть одним из них либо еще неидентифицированным геном.

У Л153 ДНК-маркер гена *Lr19* не выявлен, был идентифицирован лишь ген *Lr10*. Так как один *Lr10* у Л153 не может контролировать высокий уровень устойчивости к патогену этой линии, мы имеем основания предполагать, что Л153 несет эффективный ген от сорта твердой пшеницы 'Yazi10', обозначенный нами как *LrYazi10*.

У линии Л155 идентификацию не проводили, но, учитывая устойчивость данной линии к листовой ржавчине и желтую окраску муки, можно предположить, что устойчивость этой линии и Л154 контролируется тождественными генами.

Влияние интрогрессий от твердой пшеницы на хозяйственно полезные признаки у линий яровой мягкой пшеницы

Изучение линий Л153, Л154, Л155 по морфологическим признакам выявило, что продолжительность периода «всходы – колошение» в среднем за годы изучения у линии Л153 составила 40 суток, Л154 и Л155 – 43, у сортов 'Л503' и 'Л505' – 43 и у сорта-стандарта 'Фаворит' – 45.

Отмечено, что только у линии Л153 этот период был на 3 дня короче, чем у реципиента 'Л505', а остальные линии по этому показателю не отличаются от реципиентов. Анализ данных по высоте растений показал, что в среднем за 2017–2022 гг. максимальная высота была у линии Л153 – 83 см, что значимо выше, чем у реципиента 'Л505' (77 см). У линий, полученных с участием сорта 'Taggo', отмечено влияние реципиентов на высоту растений. Так, линия Л154 имела высоту 78 см и практически не отличалась от реципиента 'Л505', а линия Л155 была значимо ниже реципиента 'Л503': высота растений – 75 см и 82 см соответственно; у сорта-стандарта 'Фаворит' высота растений составила 82 см.

Устойчивость к полеганию изучаемых линий за годы испытания была на уровне реципиентов и составила у Л153 4,3 балла, Л154 – 4,4, Л155 – 4,3 балла, а у сортов 'Л505' и 'Л503' этот показатель составил 4,4 балла, у сорта 'Фаворит' – 4,3 балла. Следовательно, интрогрессии от сортов твердой пшеницы значимо не изменили этот показатель у линий по сравнению с реципиентами.

Анализ продуктивности показал, что в среднем за шесть вегетационных сезонов линия Л155, несущая интрогрессивный материал от сорта твердой пшеницы 'Taggo', по продуктивности зерна была на уровне реципиента 'Л503', а линия Л153, созданная с участием сорта твердой пшеницы 'Yazi10', имела продуктивность зерна значимо ниже, чем у реципиента 'Л505'. Особо следует выделить линию Л154, которая несет генный материал от сорта твердой пшеницы 'Taggo'. Эта линия по продуктивности зерна оказалась значимо выше всех изученных линий и сорта-стандарта 'Фаворит', а также превышала, хотя и незначимо, по этому показателю реципиент 'Л505' (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика линий и сортов яровой мягкой пшеницы по продуктивности зерна (2017–2022 гг.)
Table 2. Grain productivity characteristics of spring bread wheat lines and cultivars (2017–2022)

Сорт, линия	2017	2018	2019	2020	2021	2022	среднее
Продуктивность зерна, кг/га							
Л503'	4002a*	527a	1344a	2507a	493ns	3267b	2023,33a
Л505'	4693bc	768b	1624b	3276c	667ns	3493bc	2420,17bc
Л153	3642a	887b	1240a	2819b	741ns	2892a	2036,83a
Л154	4993c	1096c	1680b	3344c	691ns	3691c	2582,50c
Л155	4237ab	557a	1363a	2754a	483ns	3085a	2079,83a
'Фаворит'	3920a	931b	1528ab	2748a	639ns	3025a	2131,83a
Масса 1000 зерен, г							
Л503'	40,9	26,1	34,7	33,9	24,3	35,9	32,63 ns**
Л505'	35,1	19,1	31,8	32,3	25,3	36,7	30,03 ns
Л153	33,5	23,2	33,5	32,0	27,8	33,4	30,62 ns
Л154	35,8	24,6	33,5	34,3	27,1	34,1	31,56 ns
Л155	38,5	20,0	31,4	33,0	25,9	36,0	30,80 ns
'Фаворит'	38,2	19,6	31,2	31,8	27,1	31,3	29,87 ns

Примечание: * – числа в колонках, сопровождаемые различными буквами, различаются при уровне значимости 0,05;

** – значимо не различаются (ns)

Note: * – the numbers in the columns accompanied by different letters differ at the significance level of 0.05;

** – no significant differences (ns)

Следует отметить засухоустойчивость линии Л154. Эта линия имела в засушливые годы (2018, 2019) урожай зерна на уровне или выше реципиента 'Л505' и стандарта 'Фаворит'. В то же время в благоприятные годы при сильном развитии листовой ржавчины (2017, 2020, 2022 гг.) Л154 значительно превосходила по продуктивности как реципиент, так и стандарт.

По показателю массы 1000 зерен в среднем за годы изучения линии и сорта значимо между собой не различались, но следует отметить, что в засушливые годы (2018, 2019) у линии Л153 и особенно у Л154 этот показатель снижался меньше, чем у реципиента 'Л505', а у линии Л155 – наоборот, отмечена тенденция к уменьшению этого показателя, особенно в засушливые годы.

Кроме устойчивости к болезням и продуктивности, в интрогрессивной селекции много внимания уделяется качеству получаемой продукции, так как нередко переносимый в *T. aestivum* чужеродный материал имеет отрицательные признаки, влияющие на качество муки и хлеба. В частности, такое явление отмечено при использовании транслокации 1BL-1RS (Sibikeev et al., 2021). Анализ изучаемых линий по содержанию белка в зерне, показал, что линия Л153 значимо превышает по этому показателю реципиент 'Л505', а линия Л154 от него не отличается. Также не отличается от реципиента 'Л503' линия Л155, но у всех изученных линий содержание белка в зерне было значимо выше по сравнению с сортом-стандартом 'Фаворит'. Однако необходимо отметить положительное свойство линии Л154, у которой при высокой продуктивности содержание белка в зерне не снижалось (табл. 3).

Количество клейковины у линии Л153 значимо выше, чем у реципиента 'Л505', а линия Л154 от него не отличалась. Также не выявлено значимых различий между сортами 'Л503', 'Фаворит' и линией Л155. Качество клейковины (по показаниям прибора ИДК-3) у линии Л153 было значимо хуже, чем у сорта 'Л505', а линия Л154 по этому показателю от этого сорта значимо не отличалась. Также не отмечено значимых различий между линией Л155 и сортом 'Л503'. Не отличались изучаемые линии по качеству клейковины и от сорта 'Фаворит'.

По упругости (Р) линии и сорта значимо между собой не различались, а по отношению упругости к растяжимости (Р/Л) линия Л154, в отличие от линии Л153, значимо

отличается от сортов 'Л505' и 'Фаворит'. Линия Л155 значимо не отличается по этому показателю от реципиента 'Л503' и стандарта 'Фаворит'. По силе муки значимых различий между линиями Л153, Л154 и реципиентами не выявлено. Однако интрогрессии от твердой пшеницы 'Tarro' у Л155 значимо улучшили силу муки по сравнению с сортом 'Л503'. По показателю объема хлеба линии и сорта между собой значимо не различались.

Заключение

Таким образом, в результате многолетних исследований по интрогрессии генного материала от сортов твердой пшеницы 'Yazi10' и 'Tarro' в сорта яровой мягкой пшеницы были получены образцы, устойчивые к возбудителю листовой ржавчины. Полученные линии несут *Lr*-гены от твердой пшеницы, идентифицировать которые пока не удалось. Установлена роль донора *Lr*-генов, влияющих на ряд хозяйственно полезных показателей. В частности, интрогрессии от сорта твердой пшеницы 'Tarro' в сорта 'Л503' и 'Л505' оказывали в ряде случаев положительный эффект на некоторые морфологические признаки и показатели продуктивности зерна, в частности линия Л154 по продуктивности зерна оказалась значимо выше сорта-стандарта 'Фаворит' и реципиента 'Л505', особенно в благоприятные годы при сильном развитии листовой ржавчины. Кроме того, у линии Л154 при высокой продуктивности содержание белка в зерне не снижается. В то же время переносы от сорта твердой пшеницы 'Yazi10' обусловили большую высоту растений и уменьшили продуктивность зерна у линии Л153 по сравнению с реципиентом 'Л505'. Интрогрессии от этого сорта твердой пшеницы значимо повысили содержание белка в зерне и количество клейковины. Большую роль в экспрессии генного материала от сортов твердой пшеницы играет и подбор реципиента мягкой пшеницы. Здесь следует выделить сорт яровой мягкой пшеницы 'Л505', который неоднократно подтверждал свои хорошие комбинационные способности, в частности для повышения качества конечной продукции (Sibikeev et al., 2021). Выделенные интрогрессивные линии представляют большой интерес для селекции как доноры *Lr*-генов и уже включены в селекционные программы.

Таблица 3. Характеристика линий и сортов яровой мягкой пшеницы по хлебопекарным качествам (в среднем за 2017–2022 гг.)

Table 3. Baking quality characteristics of spring bread wheat lines and cultivars (averaged for 2017–2022)

Сорт, линия	Клейковина		Белок, %	Р, мм	Р/Л	W, е. а.	V, см ³	Цвет мякша
	%	ИДК-3						
'Л503'	39,8d*	88,10c	16,63bcd	89,14	1,69ab	144,0a	731	желтый
'Л505'	33,77a	76,58a	15,53a	102,82	2,20c	198,0b	750	желтый
Л153	38,63cd	85,20bc	17,47d	94,18	1,87bc	212,4b	761	белый
Л154	33,75a	79,98ab	15,40a	88,42	1,80b	195,2b	756	желтый
Л155	38,47bcd	85,07bc	16,77cd	100,26	1,50ab	192,2b	774	желтый
'Фаворит'	35,70abc	83,22bc	15,70a	79,66	1,40a	180,4ab	795	белый

Примечание: * – числа в колонках, сопровождаемые различными буквами, различаются при уровне значимости 0,05; Р – упругость теста; Р/Л – отношение упругости теста к растяжимости; W – сила муки; V – объем хлеба

Note: * – the numbers in the columns accompanied by different letters differ at the significance level of 0.05; P – dough elasticity; P/L – the ratio of dough elasticity to its extensibility; W – flour strength; V – bread volume

References / Литература

- Boeuf F. Contribution à l'étude du blé dur, particulièrement des variétés cultivées en Tunisie. *Annales Service Botanique Tunisie*. 1925;3:291-387. [in French]
- Dyck P.L., Johnson R. Temperature sensitivity of genes for resistance in wheat to *Puccinia recondite*. *Canadian Journal Plant Pathology*. 1983;5(4):229-234. DOI: 10.1080/07060668309501601
- Genetic Resources Information System for Wheat and Triticale: [website]. Available from: <http://www.wheatpedigree.net> [accessed May 17, 2023].
- GrainGenes. A Database for Triticeae and *Avena*: [website]. Available from: <https://wheat.pw.usda.gov/ggpages/gopher/cwc/CommWheatCult/cwc4.html> [accessed May 17, 2023].
- Grasby C.W. A wheat enthusiast. Mr. Joseph Correll's work. The originator of La Huguénot. *The West Australian Saturday*. February 24, 1912. Available from: <https://trove.nla.gov.au/newspaper/article/23865373> [accessed May 17, 2023].
- Gulyaeva E.I. Methods for the identification of genes for resistance of wheat to leaf rust using DNA markers and characteristics of effective *Lr* genes (Metody identifikatsii genov ustoychivosti pshenitsy k buroy rzhavchine s ispolzovaniyem DNK-markerov i kharakteristika effektivnosti *Lr*-genov). St. Petersburg: VIZR; 2012. [in Russian] (Гультяева Е.И. Методы идентификации генов устойчивости пшеницы к бурой ржавчине с использованием ДНК-маркеров и характеристика эффективности *Lr*-генов. Санкт-Петербург: ВИЗР; 2012).
- 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):27-44. [in Russian] (Гультяева 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):27-44). DOI: 10.15389/agrobiology.2020.127eng
- Hayes H.K., Parker J.H., Kurtzweil C. Genetics of rust resistance in crosses of *T. vulgare* with varieties of *T. durum* and *T. dicoccum*. *Journal of Agricultural Research*. 1920;19:523-542.
- Herrera-Foessel S, Singh R.P., Huerta-Espino J., William H.M., Djurlle A, Yuen J. Molecular mapping of a leaf rust resistance gene on the short arm of chromosome 6B of durum wheat. *Plant Disease*. 2008;92(12):1650-1654. DOI: 10.1094/PDIS-92-12-1650
- Huerta-Espino J, Singh R.P., Villaseñor-Mir H.E., Ammar K. Mining sources of resistance to durum leaf rust among tetraploid wheat accessions from CIMMYT's germplasm bank. *Plants*. 2023;12(1):49. DOI: 10.3390/plants12010049
- Lebedeva T.V., Zuev E.V. Genetic control of juvenile resistance to powdery mildew in spring bread wheat cultivars from the VIR collection. *Vavilovia*. 2021;4(1):25-35. [in Russian] (Лебедева Т.В., Зюев Е.В. Генетический контроль ювенильной устойчивости к мучнистой росе образцов яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР. *Vavilovia*. 2021;4(1):25-35). DOI: 10.30901/2658-3860-2021-1-25-35
- 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.
- Markelova T.S. Study of the structure and variability of wheat leaf rust population in the Volga region (Izucheniye struktury i izmenchivosti populyatsii buroy rzhavchiny pshenitsy v Povolzh'ye). *Agro XXI*. 2007;(4-6):37-39. [in Russian] (Маркелова Т.С. Изучение структуры и изменчивости популяции бурой ржавчины пшеницы в Поволжье. *Агро XXI*. 2007;(4-6):37-39). URL: <https://www.agroxxi.ru/journal/20070406/20070406018.pdf> [дата обращения: 17.05.2023].
- McIntosh R.A., Dubcovsky J., Rogers W.J., Xia X.C., Raupp W.J. Catalogue of gene symbols for wheat: 2018 supplement. *Annual Wheat Newsletter*. 2018;64:73-93.
- McIntosh R.A., Wellings C.R., Park R.F. (eds). Wheat rusts. An atlas of resistance genes. Dordrecht: Springer Netherlands; 1995.
- McIntosh R.A., Yamazaki Y., Dubcovsky J., Rogers J., Morris C., Appels R., Xia X.C. Catalogue of gene symbols for wheat. In: *Proceedings of the 12th International Wheat Genetics Symposium; 8-13 September 2013; Yokohama, Japan*. Springer Open; 2013. Available from: <https://shigen.nig.ac.jp/wheat/komugi/genes/download.jsp> [accessed May 17, 2023].
- Odintsova I.G., Peusha H.O. Regarding composite of the locus *Lr23* controlling resistance to brown rust in wheat. On the complexity of the *Lr23* locus controlling wheat resistance to leaf rust. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1984;85:13-19. [in Russian] (Одинцова И.Г., Пеуша Х.О. О сложности локуса *Lr23*, контролирующего устойчивость пшеницы к бурой ржавчине. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1984;85:13-19).
- Peusha H.O., Odintsova I.G., Schneider T. The influence of temperature on the expressiveness of the *Lr23* gene controlling the resistance of some varieties of soft wheat to brown rust. *Izvestiya Academy of Sciences of the Estonian SSR. Biology*. 1982;31(3):208-210. [in Russian] (Пеуша Х.О., Одинцова И.Г., Шнайдер Т. Влияние температуры на экспрессивность гена *Lr23*, контролирующего устойчивость некоторых сортов мягкой пшеницы к бурой ржавчине. *Известия Академии наук Эстонской ССР Биология*. 1982;31(3):208-210).
- Plotnikova L.Ya., Meshkova L.V. Immunological features of action of the wheat resistance to leaf rust gene *Lr23*. I. Phenotypic appearance and components of partial resistance. *Mycology and Phytopathology*. 2013;47(1):56-59. [in Russian] (Плотникова Л.Я., Мешкова Л.В. Иммунологические особенности действия гена устойчивости пшеницы к бурой ржавчине *Lr23*. I. Фенотипическое проявление и компоненты частичной устойчивости. *Микология и фитопатология*. 2013;47(1):56-59).
- 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
- Qureshi N., Bariana H., Kumran V.V., Muruga S., Forrest K.L., Hayden M.J. et al. A new leaf rust resistance gene *Lr79* mapped in chromosome 3BL from the durum wheat landrace Aus26582. *Theoretical and Applied Genetics*. 2018;131(5):1091-1098. DOI: 10.1007/s00122-018-3060-3
- Roelfs A.P., Singh R.P., Saari E.E. Rust diseases of wheat: concepts and methods of disease management. Mexico: CIMMYT; 1992. Available from: <http://hdl.handle.net/10883/1153> [accessed May 17, 2023].
- Shekhurdin A.P. Selected works (Izbrannye sochineniya) Moscow: Selkhozizdat; 1961. [in Russian] (Шехурдин А.П. Избранные сочинения. Москва: Сельхозиздат; 1961).
- Sibikeev S.N. Alien genes in spring bread wheat breeding for resistance to leaf rust (Chuzherodnye geny v selektsii yaro-

- voy myagkoj pshenitsy na ustoychivost k listovoy rzhavchine) [dissertation]. Saratov; 2002. [in Russian] (Сибикеев С.Н. Чужеродные гены в селекции яровой мягкой пшеницы на устойчивость к листовой ржавчине: дис. ... докт. биол. наук. Саратов; 2002).
- Sibikeev S.N., Baukenova E.A., Salmova M.F. Characteristic of the bread wheat leaf rust pathogen virulence in the Saratov region conditions. *The Agrarian Scientific Journal*. 2020;(9):40-44. [in Russian] (Сибикеев С.Н., Байкенова (Конькова) Э.А., Салмова М.Ф. Характеристика вирулентности возбудителя бурой ржавчины мягкой пшеницы в условиях Саратовской области. *Аграрный научный журнал*. 2020;(9):40-44). DOI: 10.28983/asj.y2020i9pp40-44
- Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Andreeva L.V. The study of the effects of reducing the negative influence of 1BL-1RS translocation on the bread making quality in spring bread wheat lines. *The Agrarian Scientific Journal*. 2021;(6):27-33. [in Russian] (Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Андреева Л.В. Изучение эффектов снижения отрицательного влияния 1BL-1RS транслокации на качество муки и хлеба у линий яровой мягкой пшеницы. *Аграрный научный журнал*. 2021;(6):27-33). DOI: 10.28983/asj.y2021i6pp27-33
- Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Badaeva E.D., Shishkina A.A., Dragovich A.Y., Gulyaeva E.I. et al. Comparative analysis of *Agropyron intermedium* (Host) Beauv. 6Ag¹ and 6Ag² chromosomes in bread wheat cultivars and lines with wheat-wheatgrass substitutions. *Russian Journal of Genetics*. 2017;53(3):314-324. DOI: 10.1134/S1022795417030115
- Sibikeev S.N., Druzhin A.E., Gulyaeva E.I., Yankovskaya A.A. Use of durum wheat gene pool in breeding of spring bread wheat. *Russian Agricultural Sciences*. 2020;(4):10-13. [in Russian] (Сибикеев С.Н., Дружин А.Е., Гультяева Е.И., Янковская А.А. Использование генпула твердой пшеницы в селекции яровой мягкой пшеницы. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2020;(4):10-13). DOI: 10.31857/S250026272004002X
- Sibikeev S.N., Krupnov V.A., Voronina S.A., Elesin V.A. First report of leaf rust pathotypes virulent to highly effective *Lr*-genes transferred from *Agropyron* species to bread wheat. *Plant Breeding*. 1996;115(4):276-278. DOI:10.1111/j.1439-0523.1996.tb00917.x
- Vavilov N.I. Selected works in five volumes. Vol. 4. Problems of crop immunity (Izbrannye trudy v pyati tomakh. T. 4. Problemy immuniteta kulturnykh rasteniy). Moscow; Leningrad; 1964. [in Russian] (Вавилов Н.И. Избранные труды в пяти томах. Т. 4. Проблемы иммунитета культурных растений. Москва; Ленинград; 1964).
- Vavilov N.I. The value of interspecific and intergeneric hybridization in breeding and evolution (Znachenie mezhvidovoy i mezhrodovoy gibridizatsii v selektsii i evolyutsii). In: *N.I. Vavilov. Selected works in five volumes. Vol. 2 (N.I. Vavilov. Izbrannye trudy v pyati tomakh. T. 2)*. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1960. p.444-460. [in Russian] (Вавилов Н.И. Значение межвидовой и межродовой гибридизации в селекции и эволюции. В кн.: *Н.И. Вавилов. Избранные труды в пяти томах. Т. 2*. Москва; Ленинград: АН СССР; 1960. С.444-460).

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>

Елена Ивановна Гультяева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, gullena@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7948-0307>

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>

Elena I. Gulyaeva, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, gullena@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7948-0307>

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 09.03.2023; одобрена после рецензирования 30.05.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 09.03.2023; approved after reviewing on 30.05.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 632.4.01/08
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-196-206



Устойчивость сортов и линий яровой мягкой пшеницы к возбудителям септориозной, пиренофорозной и темно-бурой пятнистостей

Ю. В. Зеленева¹, В. П. Судникова², Н. М. Коваленко¹, И. В. Гусев²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия

² Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, Среднерусский филиал, Тамбовская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Юлия Витальевна Зеленева, zelenewa@mail.ru

Актуальность. Пятнистости зерновых культур – чрезвычайно вредоносные болезни в агроценозах Тамбовской области, существенно снижающие урожайность зерна. Цель работы – идентификация устойчивых к болезням сортов и линий яровой мягкой пшеницы, созданных в Среднерусском филиале ФНЦ имени И.В. Мичурина.

Материалы и методы. Материалом для исследования служили 3 сорта и 23 линии яровой мягкой пшеницы. Проростковую устойчивость образцов к болезням оценивали в лаборатории, взрослых растений – на естественном инфекционном фоне в 2020–2022 гг. С помощью молекулярного маркера Xfcr623 детектировали присутствие аллеля *Tsn1*, контролирующего чувствительность к токсину грибов PtrToxA.

Результаты и выводы. Выделили образцы, обладающие высокой устойчивостью к *Zymoseptoria tritici* (Л-8252, Л-82/60, Л-8107, Л-8078(23), Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-8/15, Stb-7/15, Stb-92); *Parastagonospora nodorum* (Stb-97, Stb-89, Stb-89(a), Stb-90, Stb-34, Rl-6-22); *P. pseudonodorum* (Л-8134, Л-8114, Л-82/60, Л-8107, Stb-10/15, Stb-9/15, Stb-8/15, Stb-7/15, Stb-97, Stb-89, Stb-89(a), Stb-90, Stb-34, Rl-6-22); *Pyrenophora tritici-repentis* (Л-8252, Л-8107, Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-10/15, Stb-9/15, Stb-97, Stb-92, Stb-92(a), Stb-89, Stb-89(a), Stb-34) и *Bipolaris sorokiniana* (Л-8114, Л-82/60, Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-90, Stb-34, Rl-6-22). Сорта и селекционные линии характеризовались групповой устойчивостью к двум (сорта 'Тамбовчанка', 'Памяти Плахотника'; линии Л-8252; Stb-92, Л-8114, Stb-10/15; Stb-9/15, Stb-8/15; Stb-7/15), трем (линии Л-82/60, Л-8107, Л-43-9; Л-43-1; Л-4, Stb-97; Stb-89; Stb-89(a), Stb-90; Rl-6-22; сорт 'Среднерусская') и четырем (линия Stb-34) патогенам. Линии Л-8252, Л-8134, Л-82/60, Л-8107, Л-8078 (23), Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-89, Stb-90, Stb-34, Л-33809-7-3 несут рецессивный аллель *tsn1* и следовательно защищены от токсина PtrToxA четырех грибов: *Parastagonospora nodorum*, *P. pseudonodorum*, *Pyrenophora tritici-repentis* и *Bipolaris sorokiniana*.

Ключевые слова: пшеница, генетический анализ, ПЦР, PtrToxA, PtrToxB, *Tsn1*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-76-30005. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Зеленева Ю.В., Судникова В.П., Коваленко Н.М., Гусев И.В. Устойчивость сортов и линий яровой мягкой пшеницы к возбудителям септориозной, пиренофорозной и темно-бурой пятнистостей. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):196-206. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-196-206

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-196-206

Resistance of spring bread wheat cultivars and lines to *Septoria* leaf blotch, tan spot, and spot blotch pathogens

Yulia V. Zeleneva¹, Valentina P. Sudnikova², Nadezhda M. Kovalenko¹, Ivan V. Gusev²

¹All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia

²I.V. Michurin Federal Science Center, Middle-Russian Branch, Tambov Province, Russia

Corresponding author: Yulia V. Zeleneva, zelenewa@mail.ru

Background. Leaf and stem diseases of cereal crops are among the most harmful in the agrocenoses of Tambov Province, significantly reducing grain yield and rapidly progressing in many regions of Russia. The aim of the study was to identify spring bread wheat lines and cultivars developed at the Middle-Russian Branch of the I.V. Michurin Federal Science Center that show resistance to leaf and stem diseases.

Materials and methods. The target material was represented by 3 cultivars and 23 breeding lines of spring bread wheat. Disease resistance in seedlings was assessed in the laboratory, while for adult plants the process was carried out in the field in 2020–2022. The presence of the *Tsn1* allele controlling susceptibility to the PtrToxA fungal toxin was detected using the Xfcp623 molecular marker.

Results and conclusions. Accessions with high levels of resistance to *Zymoseptoria tritici* were identified: L-8252, L-82/60, L-8107, L-8078(23), L-43-9, L-43-1, L-4, Stb-8/15, Stb-7/15, and Stb-92. Accessions Stb-97, Stb-89, Stb-89(a), Stb-90, Stb-34, and Rl-6-22 were resistant to *Parastagonospora nodorum*; L-8134, L-8114, L-82/60, L-8107, Stb-10/15, Stb-9/15, Stb-8/15, Stb-7/15, Stb-97, Stb-89, Stb-89(a), Stb-90, Stb-34, and Rl-6-22 to *P. pseudonodorum*; L-8252, L-8107, L-43-9, L-43-1, L-4, Stb-10/15, Stb-9/15, Stb-97, Stb-92, Stb-92(a), Stb-89, Stb-89(a), and Stb-34 to *Pyrenophora tritici-repentis*; and L-8114, L-82/60, L-43-9, L-43-1, L-4, Stb-90, Stb-34, and Rl-6-22 to *Bipolaris sorokiniana*. The cultivars and breeding lines showed group resistance to two, three or four pathogens. It was Lines L-8252, L-8134, L-82/60, L-8107, L-8078 (23), L-43-9, L-43-1, L-4, Stb-89, Stb-90, Stb-34, and L-33809-7-3 were observed to carry the recessive allele of the *tsn1* gene.

Keywords: wheat, seedling resistance, adult plant resistance, molecular genetics testing, PCR, PtrToxA, PtrToxB, *Tsn1*

Acknowledgements: the research was financially supported by the Russian Science Foundation, Project No. 19-76-30005. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Zeleneva Yu.V., Sudnikova V.P., Kovalenko N.M., Gusev I.V. Resistance of spring bread wheat cultivars and lines to *Septoria* leaf blotch, tan spot, and spot blotch pathogens. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):196-206. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-196-206

Введение

Производство зерна пшеницы является важным стратегическим ресурсом Российской Федерации, базовой отраслью сельскохозяйственного производства.

К одним из основных причин, вызывающих заметное варьирование показателей урожайности мягкой пшеницы по годам, относятся болезни. В Тамбовской области в последнее время наибольшую экономическую значимость приобретают септориозные и пиренофорозные пятнистости. Распространение их заметно варьирует в зависимости от погодных условий и сортовых особенностей культуры (Zeleneva et al., 2022; Kovalenko et al., 2023).

Септориоз является одним из самых распространенных заболеваний на посевах зерновых в большинстве стран мира с умеренным климатом. Болезнь вызывают грибы, принадлежащие к отряду Ascomycota, классу Ascomycetes, подклассу Dothideomycetidae. Доминирует *Zymoseptoria tritici* (Desm.) Quaedvl. & Crous (Zeleneva et al., 2022), относящийся к семейству Mucosphaerellaceae. Кроме пшеницы патоген паразитирует на листьях тритикале, ячменя, ржи (Sanin et al., 2018).

На территории Тамбовской области отмечаются два вида из рода *Parastagonospora*: *P. nodorum* (Berk.) Quaedvl., Verkley & Crous, и *P. pseudonodorum* (syn. *P. avenae* f. sp. *triticea*) (Zeleneva et al., 2022), которые вызывают септориоз листа и колоса пшеницы (Croll et al., 2021). Они относятся к семейству Phaeosphaeriaceae. *Parastagonospora nodorum*, как и *Zymoseptoria tritici*, не имеет строгой специализации к хозяину. *Parastagonospora pseudonodorum* в посевах зерновых регистрируют к концу вегетационного периода на листьях, стеблях и колосьях пшеницы. *Zymoseptoria tritici*, *Parastagonospora nodorum*, *P. pseudonodorum* – опасные патогены зерновых культур во всем мире, способные приводить к прямым потерям урожая до 30–40% (Sanin et al., 2018, Ficke et al., 2018).

Возбудитель желтой пятнистости, или пиренофороза, – гриб *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechsler. Это одна из наиболее вредоносных болезней пшеницы, которая встречается во всех регионах возделывания культуры (Bankina et al., 2021; Kim, Volkova, 2020). *P. tritici-repentis* способен поражать всю вегетативную надземную часть растений, зерновки, но обычно наиболее заметен на листьях. Некрозы и хлорозы на тканях растений приводят к нарушению метаболизма хозяина, снижению качественных и количественных показателей урожайности. В годы эпифитотий потери урожая могут превышать 50% (Bankina et al., 2021).

Грибы *P. tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* и *P. pseudonodorum* известны своей способностью синтезировать некротрофные эффекторы (necrotrophic effectors – NEs), в том числе специфичные к хозяину токсины (host selective toxins – HSTs), которые функционируют как факторы патогенности (Haugrud et al., 2022).

В патосистеме «*P. nodorum* – пшеница» взаимодействие продуктов генов вирулентности патогена (*SnTox*) с продуктами генов восприимчивости растения-хозяина (*Snn*) в основном следует «обратной» модели «ген-наген» (McDonald et al., 2018). Это явление известно как доминантная восприимчивость и было описано для нескольких патогенов, включая виды *Cochliobolus heterotrophus* (Drechsler) Drechsler, *Cochliobolus victoriae* R.R. Nelson, *Periconia circinata* (L. Mangin) Sacc. (Navathe et al., 2020).

На сегодняшний день идентифицировано взаимодействие продуктов девяти доминантных генов восприимчивости и некротрофных эффекторов в патосистеме «пшеница – *Parastagonospora nodorum*» (Haugrud et al., 2022). Показано, что гены, кодирующие белки SnToxA, SnTox1, SnTox3, присутствуют в генотипе *P. pseudonodorum* (Navathe et al., 2020).

К настоящему времени клонированы 3 гена хозяина, включая *Tsn1* (Faris et al., 2010), *Snn1* (Shi et al., 2016) и *Snn3-D1* (Zhang et al., 2021), а также 5 генов гриба, кодирующих белки-эффекторы: SnToxA (Friesen et al., 2006), SnTox3 (Liu et al., 2009), SnTox1 (Liu et al., 2012), SnTox5 (Kariyawasam et al., 2022) и SnTox267 (Richards et al., 2022).

У *Pyrenophora tritici-repentis* описаны 3 некротрофных эффектора: PtrToxA, PtrToxB и PtrToxC (Effertz et al., 2002). PtrToxA и PtrToxB – белки, PtrToxC – низкомолекулярное соединение небелковой природы (Effertz et al., 2002).

Известно, что *Parastagonospora nodorum* является донором гена *ToxA* для *Pyrenophora tritici-repentis*; оба вида имеют общий токсин (PtrToxA = SnToxA). Ген *ToxA* был привнесен в геном *P. tritici-repentis* путем горизонтального переноса из *Parastagonospora nodorum* (Friesen et al., 2018). Показано, что и *P. pseudonodorum* способен продуцировать данный токсин (Ciuffetti et al., 1997).

На сортах пшеницы, возделываемых на территории Тамбовской области, отмечаются такие болезни, как обыкновенная корневая гниль, «черный зародыш», темно-бурая листовая пятнистость, возбудителем которых является *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker [телеоморфа *Cochliobolus sativus* (S. Ito & Kuribayashi) Drechsler ex Dastur]. Эти болезни являются одними из наиболее вредоносных в мире (Smurova, 2008 Chen et al., 2022). Недавно ген *ToxA* был идентифицирован у *B. sorokiniana* (Friesen et al., 2018).

Необходимо выстраивать стратегию защиты посевов пшеницы от болезней, основанную на интегрированном подходе, в котором устойчивость сорта является главным элементом.

Цель настоящей работы – идентификация устойчивых к болезням сортов и линий яровой мягкой пшеницы, созданных в Среднерусском филиале Федерального научного центра (ФНЦ) имени И.В. Мичурина.

Материалы и методы

В 2020–2022 гг. на стационарном участке Среднерусского филиала ФНЦ имени И.В. Мичурина изучили устойчивость 3 сортов и 23 селекционных линий пшеницы к септориозу и пиренофорозу (табл. 1). Образцы высевали на участке, размещенном в соответствии с требованиями Госкомиссии по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур (Methodology for the state..., 2019). Селекционный участок расположен в северо-восточной части Центрально-Черноземного региона. Учетная площадь делянки – 10 м², повторность четырехкратная. В качестве контроля использовали сорт 'Прохоровка', который высевали через каждые 20 образцов.

Для оценки устойчивости сортов и линий пшеницы к септориозу (*Zymoseptoria tritici*, *Parastagonospora nodorum*, *P. pseudonodorum*) и пиренофорозу (*Pyrenophora tritici-repentis*) в полевых условиях использовали модифицированную и дополненную шкалу Саари-Прескотта (Kolomiets et al., 2017). По данной методике все опытные образцы были разделены на 5 групп: RR – высокоустойчивые (поражаемость < 11%); R – устойчивые (поражаемость 11–20%); MS – умеренно восприимчивые (пора-

Таблица 1. Интенсивность поражения септориозом линий и сортов яровой мягкой пшеницы на опытном участке ФНЦ имени И.В. Мичурина
 Table 1. Septoria leaf blotch damage intensity among spring bread wheat lines and cultivars in the experimental plot of the I.V. Michurin Federal Science Center

Образец / Accession	Алельное состояние гена <i>Tsn1</i> / Allelic state of the <i>Tsn1</i> gene		Степень поражения растений в поле (2020–2022 гг.), % / The degree of damage to plants in the field (2020–2022), %		Степень поражения листовой пластины в лаборатории, % ± SD / Leaf plate damage degree in the laboratory, % ± SD					
	Среднее значение / Mean score ± SD	Фенотип / Phenotype	Среднее значение / Mean score ± SD	Фенотип / Phenotype	<i>Zymoseptoria tritici</i> Фенотип / Phenotype	<i>Parastagonospora nodorum</i> (ToxA, Tox1, Tox3) Фенотип / Phenotype	<i>Parastagonospora pseudo- nodorum</i> (ToxA, Tox1, Tox3) Среднее значение / Mean score ± SD	Фенотип / Phenotype		
Тамбовчанка / Tambovchanka	17 ± 5,8	R	17 ± 5,5	R			18 ± 4,5	R	24 ± 5,5	MS
Памяти Плехотника / Pamyati Plakhotnika	17 ± 5,8	R	17 ± 2,2	R			16 ± 8,9	R	24 ± 5,5	MS
Среднерусская / Srednerusskaya	13 ± 5,8	R	15 ± 2,5	R			17 ± 8,9	R	20 ± 5,5	R
Л-8252	20 ± 0,0	R	20 ± 0,0	R			46 ± 5,5	S	26 ± 5,5	MS
Л-8134	20 ± 0,0	R	24 ± 5,5	R	MS		36 ± 8,9	MS	10 ± 0,0	RR
Л-8114	23 ± 5,8	MS	26 ± 8,9	MS	MS		54 ± 5,5	S	14 ± 5,5	R
Л-82/60	20 ± 0,0	R	20 ± 0,0	R	R		50 ± 0,0	S	12 ± 4,5	R
Л-8107	13 ± 5,8	R	16 ± 5,5	R	R		32 ± 4,5	MS	16 ± 8,9	R
Л-8078(23)	13 ± 5,8	R	14 ± 5,5	R	R		27 ± 4,5	MS	23 ± 6,7	MS
Л-43-9	13 ± 5,8	R	14 ± 4,5	R	R		38 ± 4,5	MS	40 ± 0,0	MS
Л-43-1	13 ± 5,8	R	14 ± 5,5	R	R		44 ± 5,5	S	40 ± 0,0	MS
Л-4	20 ± 0,0	R	24 ± 5,5	R	R		46 ± 5,5	S	40 ± 0,0	MS

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Образец / Accession	Алельное состояние гена <i>Tsn1</i> / Allelic state of the <i>Tsn1</i> gene		Степень поражения растений в поле (2020–2022 гг.), % / The degree of damage to plants in the field (2020–2022), %		Степень поражения листовой пластины в лаборатории, % ± SD / Leaf plate damage degree in the laboratory, % ± SD				
	Среднее значение / Mean score ± SD	Фенотип / Phenotype	Среднее значение / Mean score ± SD	Фенотип / Phenotype	<i>Zymoseptoria tritici</i>		<i>Parastagonospora nodorum</i> (ToxA, Tox1, Tox3)		<i>Parastagonospora pseudo- nodorum</i> (ToxA, Tox1, Tox3)
Stb-10/15	17 ± 5,8	R	26 ± 5,5	MS	48 ± 4,5	S	12 ± 4,5	R	Phenotype / Фенотип
Stb-9/15	17 ± 5,8	R	28 ± 4,5	MS	50 ± 0,0	S	13 ± 4,5	R	Phenotype / Фенотип
Stb-8/15	13 ± 5,8	R	20 ± 0,0	R	44 ± 5,5	S	20 ± 0,0	R	Phenotype / Фенотип
Stb-7/15	20 ± 0	R	20 ± 0,0	R	36 ± 8,9	MS	20 ± 0,0	R	Phenotype / Фенотип
Stb-4	12 ± 2,9	R	26 ± 5,5	MS	60 ± 0,0	S	34 ± 5,5	MS	Phenotype / Фенотип
Stb-97	18 ± 2,9	R	28 ± 4,5	MS	12 ± 4,5	R	14 ± 5,5	R	Phenotype / Фенотип
Stb-92	17 ± 5,8	R	20 ± 0,0	R	22 ± 4,5	MS	32 ± 4,5	MS	Phenotype / Фенотип
Stb-92(a)	20 ± 0,0	R	30 ± 0,0	MS	22 ± 4,5	MS	34 ± 5,5	MS	Phenotype / Фенотип
Stb-89	18 ± 2,9	R	30 ± 0,0	MS	14 ± 5,5	R	10 ± 0,0	RR	Phenotype / Фенотип
Stb-89(a)	18 ± 2,9	R	30 ± 0,0	MS	14 ± 5,5	R	10 ± 0,0	RR	Phenotype / Фенотип
Stb-90	17 ± 5,8	R	30 ± 0,0	MS	2 ± 2,7	RR	12 ± 2,7	R	Phenotype / Фенотип
Stb-34	18 ± 2,9	R	30 ± 0,0	MS	20 ± 0,0	R	20 ± 6,1	R	Phenotype / Фенотип
RI-6-22	18 ± 2,9	R	22 ± 4,5	MS	3 ± 4,5	R	10 ± 0,0	RR	Phenotype / Фенотип
Л1-33809-7-3	17 ± 5,8	R	22 ± 4,5	MS	34 ± 5,5	MS	26 ± 5,5	MS	Phenotype / Фенотип

жаемость 21–40%); S – восприимчивые (поражаемость 41–70%); HS – высоковосприимчивые (поражаемость 71–100%).

Сорта и линии пшеницы исследовали также в лабораторных условиях. Заражали листья возбудителями пиренофороза – *P. tritici-repentis* (Mikhailova et al., 2012), темно-бурой пятнистости – *Bipolaris sorokiniana* (Smurova, 2008), тремя возбудителями септориоза – *Zymoseptoria tritici*, *Parastagonospora nodorum* (*ToxA*, *Tox1*, *Tox3*), *P. pseudonodorum* (*ToxA*, *Tox1*, *Tox3*) (Kolomiets et al., 2017).

Инокулюм включал смесь изолятов гриба из коллекции Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (ВИЗР). Чистую культуру возбудителей болезней получали из растительного материала 2022 г., собранного в Тамбовской (1 изолят *Pyrenophora tritici-repentis* (*ToxA*); 4 изолята *Zymoseptoria tritici*; 3 изолята (*ToxA*, *Tox1*, *Tox3*) *Parastagonospora nodorum*; 3 изолята (*ToxA*, *Tox1*, *Tox3*) *P. pseudonodorum*) и Ленинградской (1 изолят *Bipolaris sorokiniana*) областях, а 1 изолят (*ToxB*) *Pyrenophora tritici-repentis* – из Казахстана.

Устойчивость образцов пшеницы к желтой пятнистости оценивали с помощью балловой шкалы (Mikhailova et al., 2012). Оценку проростковой устойчивости пшеницы к темно-бурой пятнистости, вызываемой *Bipolaris sorokiniana*, проводили по шкале, разработанной в ВИЗР (Smurova, 2008). Для оценки устойчивости образцов пшеницы к возбудителям септориоза в лабораторных условиях использовали шкалу Саари-Прескотта (Kolomiets et al., 2017).

Геномную ДНК выделяли из сегментов листьев пшеницы 7-дневного возраста стандартным СТАВ/хлороформ-методом (Doyle J.J., Doyle J.L., 1990).

Скрининг образцов на наличие гена *Tsn1* проводили при помощи пары праймеров Xfcr623(F)/Xfcr623(R). Праймер Xfcr623(F) имеет нуклеотидную последовательность (5'–3') СТАТТССГААТССГТГССТТССГ, праймер Xfcr623(R) – ССТТСТСТСАССГСТАТСТСАТС.

Аmplification геномной ДНК проводили в 25 мкл реакционной смеси: 2 мкл геномной ДНК (25 нг, допусти-

мо от 2 до 50 нг), 1 мкл каждого праймера (10 пМ/мкл («Евроген»)), 0,5 мкл смеси dNTPs mix (10 мМ, водный раствор dCTP, dGTP, dTTP и dATP) (TransGen), 0,55 мкл MgCl₂ (100 мМ), 0,5 мкл Bio Taq ДНК-полимераза (5U, 5 ед./мкл) («Диалат Лтд.», Россия), 2,5 мкл 10× ПЦР-буфера, 17 мкл ddH₂O. Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили в амплификаторе С1000 Touch Thermal Cycler Bio Rad. Условия ПЦР: 94°C в течение 3 мин, затем 45 циклов: 94°C в течение 30 с, 60°C – 30 с, 72°C – 1 мин, последний этап элонгации – 5 мин при 72°C. Размер ампликона составляет 380 пн (Faris et al., 2010).

Аmplified фрагменты разделяли методом электрофореза в 1,5-процентном агарозном геле, в 1×TBE-буфере (pH 8,2), гель окрашивали бромистым этидием. Для оценки размера фрагментов использовали ДНК-маркер Step100 plus («Биолабмикс»).

Наличие продукта амплификации маркера указывает на присутствие доминантного аллеля *Tsn1* (восприимчивость растения к белку-токсину гриба PtrToxA), отсутствие – наличие рецессивного аллеля *tsn1* (устойчивость растения к PtrToxA) (Faris et al., 2010).

Статистическую обработку данных проводили с использованием компьютерной программы STATISTICA 12. Рассчитывали среднее поражение листовой пластины септориозом при полевой оценке за период 2020–2022 гг., %; SD – стандартное отклонение (Std. Dev.). Для разделения изученных сортов пшеницы по устойчивости/восприимчивости к трем возбудителям септориоза использовали критерий Кохрена Q. Данный критерий применяли для проверки значимости различия между фитопатологическими оценками сортов пшеницы (Trukhacheva, 2017).

Результаты и обсуждение

У 11 линий пшеницы были выявлены фрагменты ожидаемого размера 380 пн после амплификации их ДНК с праймером Xfcr623 (48% от изученных) (табл. 1-2, рисунок), а 12 образцов (Л-8252, Л-8134, Л-82/60, Л-8107,

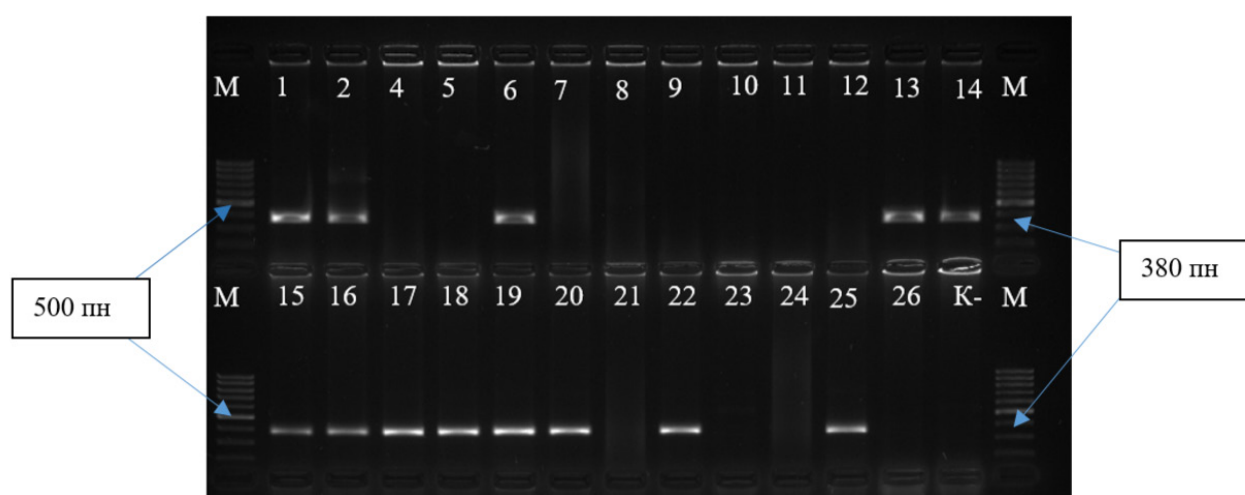


Рисунок. Электрофореграмма продуктов амплификации маркера Xfcr623 у сортов и линий яровой мягкой пшеницы (размер ампликона – 380 пн). Номера, указанные для образцов, соответствуют списку в таблице 1.

Отрицательный контроль – линия 6В365; М – маркер молекулярной массы Step100 plus («Биолабмикс»)

Figure. The electrophoregram of amplification products with the Xfcr623 marker among spring bread wheat cultivars and lines (amplicon size is 380 bp). Numbers given to the accessions correlate with the list in Table 1.

Line 6В365 is the negative control; M means the 100 bp DNA Ladder marker (Biolabmix)

Таблица 2. Интенсивность поражения пиренофорозом и темно-бурой пятнистостью линий и сортов яровой мягкой пшеницы**Table 2. Tan spot and spot blotch damage intensity among spring bread wheat lines and cultivars**

Образец / Accession	Тип реакции на заражение изолятами / Type of the reaction to the infection caused by the isolates					
	<i>Pyrenophora tritici-repentis</i>				<i>Bipolaris sorokiniana</i>	
	(ToxA)		(ToxB)			
	Балл / Reaction type	Фенотип / Phenotype	Балл / Reaction type	Фенотип / Phenotype	Балл / Reaction type	Фенотип / Phenotype
Тамбовчанка / Tambovchanka	3/3	S	3/2	S	4	S
Памяти Плахотника / Pamyati Plakhotnika	2/3	MS	1/1	R	4	S
Среднерусская / Srednerusskaya	2/3	MS	1/1	R	4	S
Л-8252	2/2	MR	1/1	R	4	S
Л-8134	2/3	MS	2/2	MR	4	S
Л-8114	3/3	S	1/2	MR	2	MR
Л-82/60	3/3	S	1/1	R	2	MR
Л-8107	1/1	R	1/1	R	4	S
Л-8078(23)	3/3	S	1/1	R	4	S
Л-43-9	1/1	R	2/2	MR	2	MR
Л-43-1	1/1	R	2/2	R	2	MR
Л-4	1/1	R	1/1	R	2	MR
Stb-10/15	1/1	R	2/2	MR	4	S
Stb-9/15	2/2	MR	1/1	R	4	S
Stb-8/15	2/2	MR	1/3	MS	4	S
Stb-7/15	3/3	S	2/2	MR	4	S
Stb-4	3/3	S	2/3	MS	4	S
Stb-97	2/2	MR	2/1	MR	4	S
Stb-92	2/2	MR	2/2	MR	4	S
Stb-92(a)	2/2	MR	1/1	R	4	S
Stb-89	1/1	R	1/1	R	4	S
Stb-89(a)	1/1	R	1/1	R	4	S
Stb-90	2/3	MS	2/3	MS	2	MR
Stb-34	2/2	MR	1/1	R	2	MR
RI-6-22	3/2	S	2/3	MS	2	MR
Л-33809-7-3	2/3	MS	2/2	MR	4	S

Л-8078(23), Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-89, Stb-90, Stb-34, Л-33809-7-3) несут рецессивный аллель *tsn1*. Таким образом, селекционный материал имеет генетическую защиту от токсина PtrToxA четырех опасных фитопатогенов: *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum*, *P. pseudonodorum* и *Bipolaris sorokiniana* (см. рисунок).

Сорта 'Тамбовчанка', 'Памяти Плехотника', 'Среднерусская' и 23 селекционные линии были устойчивы к септориозу (комплекс грибов *Zymoseptoria tritici*, *Parastagonospora nodorum*, *P. pseudonodorum*) на естественном инфекционном фоне (поражаемость не превысила 23%) (см. табл. 1).

По результатам лабораторных испытаний к *Zymoseptoria tritici* устойчивы сорта 'Тамбовчанка', 'Памяти Плехотника', 'Среднерусская' и 10 селекционных линий – Л-8252(*tsn1*), Л-82/60 (*tsn1*), Л-8107 (*tsn1*), Л-8078(23) (*tsn1*), Л-43-9 (*tsn1*), Л-43-1 (*tsn1*), Л-4 (*tsn1*), Stb-8/15 (*Tsn1*), Stb-7/15 (*Tsn1*), Stb-92 (*Tsn1*). Их степень поражения в среднем не превышала 20%, что позволило отнести эти линии в группу устойчивых (R) (см. табл. 1).

К *Parastagonospora nodorum* устойчивы сорта 'Тамбовчанка', 'Памяти Плехотника', 'Среднерусская' и 6 селекционных линий – Stb-97 (*Tsn1*), Stb-89 (*tsn1*), Stb-89(a) (*Tsn1*), Stb-90 (*tsn1*), Stb-34 (*tsn1*), Rl-6-22 (*Tsn1*). Следует особо выделить линию Stb-90, обладающую высокой устойчивостью к фитопатогену (RR) (см. табл. 1).

Устойчивостью к *P. pseudonodorum* характеризовались сорт 'Среднерусская' и 14 селекционных линий – Л-8134 (*tsn1*), Л-8114 (*Tsn1*), Л-82/60 (*tsn1*), Л-8107 (*tsn1*), Stb-10/15 (*Tsn1*), Stb-9/15 (*Tsn1*), Stb-8/15 (*Tsn1*), Stb-7/15 (*Tsn1*), Stb-97 (*Tsn1*), Stb-89 (*tsn1*), Stb-89(a) (*Tsn1*), Stb-90 (*tsn1*), Stb-34 (*tsn1*), Rl-6-22 (*Tsn1*). Среди них 4 линии (Л-8134, Stb-89, Stb-89(a), Rl-6-22) обладают высокой устойчивостью к фитопатогену (RR) (см. табл. 1).

Отмечена прямая корреляция ($r = 0,5$) между показателями общей степени поражения септориозом листовой пластины в поле и степенью поражения образцов пшеницы *Zymoseptoria tritici* в лаборатории. Этот факт можно объяснить тем, что *Z. tritici* является самым распространенным и вредоносным в фитопатогенном комплексе септориозных пятнистостей в регионе. По нашим наблюдениям, *Parastagonospora nodorum* и *P. pseudonodorum* образуют некротические пятна с пикнидами на листьях, побегах, колосе, как правило, начиная с фазы колошения. Данные виды не представляют в настоящее время такой экономической значимости для региона, как *Zymoseptoria tritici*. Тем не менее селекционером и специалистом в области защиты растений необходимо помнить об опасности этих фитопатогенов, способных при благоприятных погодных условиях наносить существенный урон сельскохозяйственному производству.

Показатели степени поражения линий пшеницы *Z. tritici* в лаборатории отрицательно связаны со степенью поражения *Parastagonospora nodorum* ($r = -0,3$) и *P. pseudonodorum* ($r = -0,4$). Отмечена положительная корреляция между степенью поражения образцов *P. nodorum* и *P. pseudonodorum* ($r = 0,3$).

В ходе трехлетних испытаний на естественном инфекционном фоне сорта 'Тамбовчанка', 'Памяти Плехотника', 'Среднерусская' и 23 селекционные линии проявили устойчивость к пиренофорозу (степень поражения листьев < 10%). В лабораторных условиях при заражении образцов двумя изолятами, выделенными из тамбовской популяции (способными продуцировать PtrToxA) и из казахстанской популяции патогена (способными продуцировать PtrToxB), первый проявил бо-

лее широкий спектр вирулентности (см. табл. 2). В результате полевых и лабораторных испытаний устойчивую реакцию к *Pyrenophora tritici-repentis* проявили 14 селекционных линий: Л-8252, Л-8107, Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-10/15, Stb-9/15, Stb-8/15, Stb-97, Stb-92, Stb-92(a), Stb-89, Stb-89(a), Stb-34 (см. табл. 2).

Проростковой устойчивостью к *Bipolaris sorokiniana* обладали восемь селекционных линий: Л-8114, Л-82/60, Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-90, Stb-34, Rl-6-22 (см. табл. 2).

Достоверность разделения изученных сортов и селекционных линий по устойчивости к пяти фитопатогенам на 5 групп (1-я группа – восприимчивые образцы; 5-я группа – образцы, устойчивые к четырем патогенам) подтвердили с помощью критерия Кохрена Q . При использовании данного теста проверяли, значительно ли различие при сравнении сортов и линий, отличающихся по нескольким дихотомическим переменным (устойчивость/восприимчивость к *Zymoseptoria tritici*, *Parastagonospora nodorum*, *P. pseudonodorum*, *Pyrenophora tritici-repentis*, *Bipolaris sorokiniana* при искусственном заражении растений в лаборатории). Значение коэффициента $Q = 20,00$ при уровне значимости p меньше 0,05 ($p = 0,03$) говорит о том, что сформированные группы сортов достоверно различались между собой (табл. 3).

Таким образом, в условиях Тамбовской области изучили устойчивость сортов и линий пшеницы к возбудителям септориоза, темно-бурой и желтой пятнистостей, изучили аллельное состояние гена *Tsn1* у этих образцов.

По данным Организации Объединенных Наций, в связи с ростом численности людей на нашей планете и систематическим увеличением спроса на продовольствие к 2050 г. урожайность пшеницы необходимо будет увеличить примерно на 60% вместе с дополнительным ограничением пахотных земель (<https://www.un.org/ru/un75/shifting-demographics>). Патогены, вызывающие пятнистости, принадлежат к основным факторам, влияющим на урожай пшеницы (Haugrud et al., 2022).

Отличительные фитопатологи и селекционеры ведут постоянный поиск сортов и линий с высокими иммунологическими и другими селекционно ценными свойствами (Pakholkova et al., 2022; Sibikeev et al., 2022; Baranova et al., 2023). В производстве должны преимущественно возделываться сорта пшеницы с долговременной специфической устойчивостью (Kharina, Sheshhegova, 2021).

В литературе отмечается, что чувствительность к некротрофным эффекторам не всегда приводит к восприимчивости пшеницы к возбудителю септориоза *Parastagonospora nodorum*, поскольку подобные взаимодействия генов хозяина и эффектора могут быть замаскированы или подавлены вследствие эпистаза или проявления генов-модификаторов (Virdi et al., 2016). В наших экспериментах образцы, имеющие аллель *Tsn1*, обладали устойчивостью к септориозу и пиренофорозу в условиях естественного инфекционного фона и при лабораторных испытаниях (например, линии Stb-97, Stb-89(a) и др.).

Полученные нами результаты будут способствовать переходу селекции пшеницы в Центрально-Черноземном регионе на новый научный уровень за счет комплексного применения молекулярно-генетических и фитопатологических методов. Представленные в статье сорта и линии пшеницы могут быть полезны фитопатоологам и селекционером. Будущую работу планируется сконцентрировать на изучении взаимодействия *SnTox* (ген патогена, кодирующий специфичные к хозяину токсины) и *Snn* (ген восприимчивости хозяина к белкам-эффекторам гриба) в свете современных научных достижений.

Таблица 3. Устойчивость образцов пшеницы к возбудителям пятнистостей
Table 3. Resistance of wheat accessions to blotch pathogens

Образец / Accession		Патоген, к которому устойчив образец / The pathogen to which the accession is resistant
I	Stb-4, Л-33809-7-3	Восприимчивы к патогенам
II	Л-8134	<i>P. pseudonodorum</i>
	Л-8078(23)	<i>Z. tritici</i>
	Stb-92(a)	<i>P. tritici-repentis</i>
III	Тамбовчанка, Памяти Плахотника / Tambovchanka, Pamyati Plakhotnika	<i>Z. tritici</i> ; <i>P. nodorum</i>
	Л-8252; Stb-92	<i>Z. tritici</i> ; <i>P. tritici-repentis</i>
	Л-8114	<i>P. pseudonodorum</i> ; <i>B. sorokiniana</i>
	Stb-10/15; Stb-9/15	<i>P. pseudonodorum</i> ; <i>P. tritici-repentis</i>
	Stb-8/15; Stb-7/15	<i>Z. tritici</i> ; <i>P. pseudonodorum</i>
IV	Л-82/60	<i>Z. tritici</i> ; <i>P. pseudonodorum</i> ; <i>B. sorokiniana</i>
	Л-8107	<i>Z. tritici</i> ; <i>P. pseudonodorum</i> ; <i>P. tritici-repentis</i>
	Л-43-9; Л-43-1; Л-4	<i>Z. tritici</i> ; <i>P. tritici-repentis</i> ; <i>B. sorokiniana</i>
	Stb-97; Stb-89; Stb-89(a)	<i>P. nodorum</i> ; <i>P. pseudonodorum</i> ; <i>P. tritici-repentis</i>
	Stb-90; Rl-6-22	<i>P. nodorum</i> ; <i>P. pseudonodorum</i> ; <i>B. sorokiniana</i>
	Среднерусская / Srednerusskaya	<i>Z. tritici</i> ; <i>P. nodorum</i> ; <i>P. pseudonodorum</i>
V	Stb-34	<i>P. nodorum</i> ; <i>P. pseudonodorum</i> ; <i>P. tritici-repentis</i> ; <i>B. sorokiniana</i>

Примечание: *P. nodorum* – *Parastagonospora nodorum*; *P. pseudonodorum* – *Parastagonospora pseudonodorum*; *Z. tritici* – *Zymoseptoria tritici*; *B. sorokiniana* – *Bipolaris sorokiniana*

Note: *P. nodorum* – *Parastagonospora nodorum*; *P. pseudonodorum* – *Parastagonospora pseudonodorum*; *Z. tritici* – *Zymoseptoria tritici*; *B. sorokiniana* – *Bipolaris sorokiniana*

Заключение

В результате комплексной оценки устойчивости в фазе проростков и взрослых растений выделены сорта и селекционные линии пшеницы с высоким уровнем устойчивости к *Zymoseptoria tritici* (линия Л-8078(23)), *Parastagonospora pseudonodorum* (Л-8134) либо к *Pyrenophora tritici-repentis* (Stb-92(a)). Выявлены также образцы, обладающие групповой устойчивостью к двум (сорта 'Тамбовчанка', 'Памяти Плахотника'; линии Л-8252; Stb-92, Л-8114, Stb-10/15; Stb-9/15, Stb-8/15; Stb-7/15), трем (линии Л-82/60, Л-8107, Л-43-9; Л-43-1; Л-4, Stb-97; Stb-89; Stb-89(a), Stb-90; Rl-6-22; сорт 'Среднерусская') и четырем (линия Stb-34) опасным фитопатогенам. У сортов и линий изучено аллельное разнообразие гена *Tsn1*. Установлено, что 12 селекционных линий – Л-8252, Л-8134, Л-82/60, Л-8107, Л-8078 (23), Л-43-9, Л-43-1, Л-4, Stb-89, Stb-90, Stb-34, Л-33809-7-3 (52% от изученных) – несут рецессивный аллель *tsn1*. Носители аллеля *tsn1*, определяющего устойчивость к токсину PtrToxA *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum*, *P. pseudonodorum* и *Bipolaris sorokiniana*, могут быть использованы в селекционных программах по повышению устойчивости к опасным болезням пшеницы, вызываемым данными возбудителями.

References / Литература

- Bankina B., Bimšteine G., Arhipova I., Kaneps J., Darguža M. Impact of crop rotation and soil tillage on the severity of winter wheat leaf blotches. *Rural Sustainability Research*. 2021;45(340):21-27. DOI: 10.2478/plua-2021-0004
- Baranova O., Solyanikova V., Kyrova E., Kon'kova E., Gaponov S., Sergeev V. et al. Evaluation of resistance to stem rust and identification of *Sr* genes in Russian spring and winter wheat cultivars in the Volga Region. *Agriculture*. 2023;13(3):635. DOI: 10.3390/agriculture13030635
- Chen L., Yao Q., Wang F., Pang Y., Lang X., Sun D. et al. Pathotype identification and virulence variation in *Cochliobolus sativus* in China. *Plant Disease*. 2022;106(2):585-594. DOI: 10.1094/PDIS-06-21-1248-RE
- Ciuffetti L.M., Tuori R.P., Gaventa J.M. A single gene encodes a selective toxin causal to the development of tan spot of wheat. *The Plant Cell*. 1997;9(2):135-144. DOI: 10.1105/tpc.9.2.135
- Croll D., Crous P.W., Pereira D., Mordecai E.A., McDonald B.A., Brunner P.C. Genome-scale phylogenies reveal relationships among *Parastagonospora* species infecting domesticated and wild grasses. *Persoonia*. 2021;46:116-128. DOI: 10.3767/persoonia.2021.46.04

- Doyle J.J., Doyle J.L. Isolation of plant DNA from fresh tissue. *Focus*. 1990;12(1):13-15.
- Effertz R.J., Meinhardt S.W., Anderson J.A., Jordahl J.G., Francl L.J. Identification of a chlorosis-inducing toxin from *Pyrenophora tritici-repentis* and the chromosomal location of an insensitivity locus in wheat. *Phytopathology*. 2002;92(5):527-533. DOI: 10.1094/PHYTO.2002.92.5.527
- Faris J.D., Zhang Z., Lu H., Lu S., Reddy L., Cloutier S. et al. A unique wheat disease resistance-like gene governs effector-triggered susceptibility to necrotrophic pathogens. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2010;107(30):13544-13549. DOI: 10.1073/pnas.1004090107
- Ficke A., Cowger C., Bergstrom G., Brodal G. Understanding yield loss and pathogen biology to improve disease management: *Septoria nodorum* blotch – a case study in wheat. *Plant Disease*. 2018;102(4):696-707. DOI: 10.1094/PDIS-09-17-1375-FE
- Friesen T.L., Holmes D.J., Bowden R.L., Faris J.D. *ToxA* is present in the U.S. *Bipolaris sorokiniana* population and is a significant virulence factor on wheat harboring *Tsn1*. *Plant Disease*. 2018;102(12):2446-2452. DOI: 10.1094/PDIS-03-18-0521-RE
- Friesen T.L., Stukenbrock E.H., Liu Z., Meinhardt S., Ling H., Faris J.D. et al. Emergence of a new disease as a result of interspecific virulence gene transfer. *Nature Genetics*. 2006;38(8):953-956. DOI: 10.1038/ng1839
- Haugrud A.R.P., Zhang Z., Friesen T.L., Faris J.D. Genetics of resistance to *Septoria nodorum* blotch in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022;135(11):3685-3707. DOI: 10.1007/s00122-022-04036-9
- Kariyawasam G.K., Richards J.K., Wyatt N.A., Running K.L.D., Xu S.S., Liu Z. et al. The *Parastagonospora nodorum* necrotrophic effector *SnTox5* targets the wheat gene *Snn5* and facilitates entry into the leaf mesophyll. *New Phytologist*. 2022;233(1):409-426. DOI: 10.1111/nph.17602
- Kharina A.V., Sheshhegova T.K. Search for the parent material of spring soft wheat resistant to *Septoria tritici* blotch and analysis of the trait inheritance. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2021;22(2):212-222. [in Russian] (Харина А.В., Шешегова Т.К. Поиск устойчивого к септориозу исходного материала яровой мягкой пшеницы и анализ наследования признака. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(2):212-222). DOI: 10.30766/2072-9081.2021.22.2.212-222
- Kim Y.S., Volkova G.V. Spackled yellows of wheat leaves: distribution, injuriousness, racial composition (review). *Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2020;2(50):105-116. [in Russian] (Ким Ю.С., Волкова Г.В. Желтая пятнистость листьев пшеницы: распространение, вредность, расовый состав (обзор). *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020;2(50):105-116). DOI: 10.18286/1816-4501-2020-2-105-116
- Kolomiets T.M., Pakholkova E.V., Dubovaya L.P. Selection of the source material for the development of wheat cultivars with long-term resistance to *Septoria* (Отбор исходного материала для создания сортов пшеницы с длительной устойчивостью к септориозу). Moscow: Pechatny Gorod; 2017. [in Russian] (Коломиец Т.М., Пахолкова Е.В., Дубовая Л.П. Отбор исходного материала для создания сортов пшеницы с длительной устойчивостью к септориозу. Москва: Печатный город; 2017).
- Kovalenko N.M., Zeleneva Yu.V., Sudnikova V.P. Characterization of *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* and *Parastagonospora pseudonodorum* populations based on the presence of effector genes in the Tambov Oblast territory. *Russian Agricultural Sciences*. 2023;(2):52-57. [in Russian] (Коваленко Н.М., Зеленева Ю.В., Судникова В.П. Характеристика популяций *Pyrenophora tritici-repentis*, *Parastagonospora nodorum* и *Parastagonospora pseudonodorum* на территории Тамбовской области по наличию генов-эффекторов. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2023;(2):52-57). DOI: 10.31857/S2500262723020114
- Liu Z., Faris J.D., Oliver R.P., Tan K.C., Solomon P.S., McDonald M.C. et al. *SnTox3* acts in effector triggered susceptibility to induce disease on wheat carrying the *Snn3* gene. *PLoS Pathogens*. 2009;5(9):e1000581. DOI: 10.1371/journal.ppat.1000581
- Liu Z., Zhang Z., Faris J.D., Oliver R.P., Syme R., McDonald M.C. et al. The cysteine rich necrotrophic effector *SnTox1* produced by *Stagonospora nodorum* triggers susceptibility of wheat lines harboring *Snn1*. *PLoS Pathogens*. 2012;8(1):e1002467. DOI: 10.1371/journal.ppat.1002467
- McDonald M.C., Solomon P.S. Just the surface: advances in the discovery and characterization of necrotrophic wheat effectors. *Current Opinion in Microbiology*. 2018;46:14-18. DOI: 10.1016/j.mib.2018.01.019
- Methodology for the state variety trials of agricultural crops. First issue (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya sel'skokhozyaystvennykh kultur. Vypusk pervy). Moscow: Gossortkommissiya; 2019. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск первый. Москва: Госсортокмиссия; 2019).
- Mikhailova L.A., Mironenko N.V., Kovalenko N.M. Tan leaf spot of wheat: guidelines for studying the tan spot pathogen of *Pyrenophora tritici-repentis* and cultivar resistance (Zheltaya pyatnistost pshenitsy: metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu vzbuditelya zheltogo pyatnistosti *Pyrenophora tritici-repentis* i ustoychivosti sortov). St. Petersburg: VIZR; 2012. [in Russian] (Михайлова Л.А., МIRONENKO Н.В., Коваленко Н.М. Желтая пятнистость пшеницы: методические указания по изучению возбудителя желтой пятнистости *Pyrenophora tritici-repentis* и устойчивости сортов. Санкт-Петербург: ВИЗР; 2012).
- Navathe S., Yadav P.S., Chand R., Mishra V.K., Vasistha N.K., Meher P.K. et al. *ToxA-Tsn1* interaction for spot blotch susceptibility in Indian wheat: an example of inverse gene-for-gene relationship. *Plant Disease*. 2020;104(1):71-81. DOI: 10.1094/PDIS-05-19-1066-RE
- Pakholkova Ye.V., Salnikova N.N., Pankratova L.F., Kolomiets T.M. Immunological assessment of Kasib spring wheat varieties for resistance to *Parastagonospora nodorum*, the causative agent of *Septoria nodorum* blotch (SNB). *Biosfera = Biosphere*. 2022;14(4):355-358. [in Russian] (Пахолкова Е.В., Сальникова Н.Н., Панкратова Л.Ф., Коломиец Т.М. Иммунологическая оценка сортов яровой пшеницы селекции Касиб на устойчивость к возбудителю септориоза колоса *Parastagonospora nodorum*. *Биосфера*. 2022;14(4):355-358).
- Richards J.K., Kariyawasam G.K., Seneviratne S., Wyatt N.A., Xu S.S., Liu Z. et al. A triple threat: the *Parastagonospora nodorum* *SnTox267* effector exploits three distinct host genetic factors to cause disease in wheat. *New Phytologist*. 2022;233(1):427-442. DOI: 10.1111/nph.17601
- Sanin S.S., Ibragimov T.Z., Strizhekozin Yu.A. Method for calculating wheat yield losses from diseases. *Journal of Plant Protection and Quarantine*. 2018;(1):11-15 [in Russian] (Санин С.С., Ибрагимов Т.З., Стрижекозин Ю.А. Метод

- расчета потерь урожая пшеницы от болезней. *Защита и карантин растений*. 2018;(1):11-15).
- Shi G., Zhang Z., Friesen T.L., Raats D., Fahima T., Brueggeman R.S. et al. The hijacking of a receptor kinase-driven pathway by a wheat fungal pathogen leads to disease. *Science Advances*. 2016;2(10):e1600822. DOI: 10.1126/sciadv.1600822
- Sibikeev S.N., Gulyaeva E.I., Druzhin A.E., Andreeva L.V. The effect of the 7DL-7Ae#1L·7Ae#1S translocation on the productivity and quality of spring bread wheat grain. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022;26(6):537-543. DOI: 10.18699/VJGB-22-65
- Smurova S.G. New sources and donors of wheat resistance to *Cochliobolus sativus* Drechs. ex Dastur (Novye istochniki i donory ustoychivosti pshenitsy k *Cochliobolus sativus* Drechs. ex Dastur) [dissertation]. St. Petersburg: VIZR; 2008. [in Russian] (Смурова С.Г. Новые источники и доноры устойчивости пшеницы к *Cochliobolus sativus* Drechs. ex Dastur: дис. ... канд. биол. наук. Санкт-Петербург: ВИЗР; 2008).
- Trukhacheva N.V. Medical statistics: a manual (Meditsinskaya statistika: uchebnoye posobiye). Rostov-on-Don: Fenix; 2017. [in Russian] (Трухачева Н.В. Медицинская статистика: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс; 2017).
- United Nations: [website]. Available from: <https://www.un.org/en/un75/shifting-demographics> [accessed Mar. 15, 2023].
- Virdi S.K., Liu Z., Overlander M.E., Zhang Z., Xu S.S., Friesen T.L. et al. New insights into the roles of host gene-necrotrophic effector interactions in governing susceptibility of durum wheat to tan spot and *Septoria nodorum* blotch. *G3 (Bethesda, Md.)*. 2016;6(12):4139-4150. DOI: 10.1534/g3.116.036525
- Zeleneva Yu.V., Ablova I.B., Sudnikova V.P., Mokhova L.M., Konkova E.A. Species composition of wheat *Septoria* pathogens in the European part of Russia and identifying *SnToxA*, *SnTox1* and *SnTox3* effector genes. *Mycology and Phytopathology*. 2022;56(6):441-447. [in Russian] (Зеленева Ю.В., Аблова И.Б., Судникова В.П., Мохова Л.М., Конькова Э.А. Видовой состав возбудителей септориозов пшеницы в европейской части России и идентификация генов-эффекторов *SnToxA*, *SnTox1* и *SnTox3*. *Микология и фитопатология*. 2022;56(6):441-447). DOI: 10.31857/S0026364822060113
- Zhang Z., Running K.L.D., Seneviratne S., Haugrud A.R.P., Szabonever A., Shi G. et al. A protein kinase-major sperm protein gene hijacked by a necrotrophic fungal pathogen triggers disease susceptibility in wheat. *The Plant Journal*. 2021;106(3):720-732. DOI: 10.1111/tpj.15194

Информация об авторах

Юлия Витальевна Зеленева, доктор биологических наук, доцент, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, zelenewa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9716-288X>

Валентина Павловна Судникова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, Среднерусский филиал, 392553 Россия, Тамбовская обл., Тамбовский р-н, пос. Новая Жизнь, ул. Молодежная, 1, sudnikova47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5367-1340>

Надежда Михайловна Коваленко, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, nadyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9577-8816>

Иван Викторович Гусев, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, Среднерусский филиал, 392553 Россия, Тамбовская обл., Тамбовский р-н, пос. Новая Жизнь, ул. Молодежная, 1, tmbsnifs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1063-4739>

Information about the authors

Yulia V. Zeleneva, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Senior Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, zelenewa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9716-288X>

Valentina P. Sudnikova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, I.V. Michurin Federal Science Center, Middle-Russian Branch, 1 Molodezhnaya St., Novaya Zhizn Settle., Tambovsky District, Tambov Province 392553, Russia, sudnikova47@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5367-1340>

Nadezhda M. Kovalenko, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, nadyakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9577-8816>

Ivan V. Gusev, Senior Researcher, I.V. Michurin Federal Science Center, Middle-Russian Branch, 1 Molodezhnaya St., Novaya Zhizn Settle., Tambovsky District, Tambov Province 392553, Russia, tmbsnifs@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1063-4739>

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 10.04.2023; одобрена после рецензирования 07.08.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 10.04.2023; approved after reviewing on 07.08.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 575.635.21+578.5
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-207-213



Экспрессия гена фактора транскрипции *StTCP23* в растениях картофеля, инокулированных виридом веретеновидности клубней

Н. В. Мироненко, А. С. Орина, Н. М. Лашина, О. С. Афанасенко

Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Нина Васильевна Мироненко, nina2601mir@mail.ru

Актуальность. Вириод веретеновидности клубней картофеля PSTVd (potato spindle tuber viroid) – самый мелкий из всех известных возбудителей болезней картофеля – является кольцевой молекулой однонитевой РНК. Симптомы, вызываемые PSTVd, приводят к существенному снижению урожая клубней или гибели растения. Установлено, что вириодная инфекция запускает процесс «сайленсинга» генов хозяина и индуцирует симптомы болезни растения с помощью vd-sRNA. Одной из мишеней вириода является ген картофеля *StTCP23*, который кодирует фактор транскрипции. Целью исследования являлась оценка влияния инокуляции растений картофеля сорта ‘Colomba’ штаммом NicTr-3 вириода PSTVd на экспрессию гена *StTCP23* в инфицированном растении.

Материалы и методы. Растения картофеля сорта ‘Colomba’ инокулировали соком из листьев растений томата сорта ‘Rutgers’, в котором поддерживали штамм NicTr-3 вириода PSTVd. Факт заражения подтверждали методом ОТ-ПЦР со специфичными праймерами. Разнообразие молекул в популяции вириода выявляли с помощью клонирования и последующего секвенирования клонов вириода. Экспрессию гена *StTCP23* в инфицированных растениях картофеля оценивали методом количественной ПЦР относительно гена фактора элонгации *ef1a*.

Результаты. Фенотипические проявления заражения сорта ‘Colomba’ штаммом NicTr-3 вириода PSTVd не выявлены, тогда как факт заражения подтвержден молекулярными методами. Установлено присутствие 10 мутаций в отдельных вариантах штамма NicTr-3, ответственных за снижение агрессивности штамма. Показано повышение экспрессии гена *StTCP23* в листьях растений картофеля сорта ‘Colomba’, инокулированных штаммом NicTr-3, по сравнению с контролем.

Заключение. Механизм взаимодействия вириода и гена *StTCP23* в зараженном растении картофеля не является универсальным и зависит как от генотипа сорта картофеля, так и от штамма вириода. Для доказательства существования специфических механизмов взаимодействия генотипа сорта и генотипа штамма вириода необходимы дополнительные исследования.

Ключевые слова: PSTVd, сорт ‘Colomba’, мутации вириода, патогенность, агрессивность

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-46-07001 «Молекулярно-генетические механизмы взаимоотношений в патосистеме *Solanum* spp. – вириод веретеновидности клубней картофеля (PSTVd) и особенности эпидемиологии вириода».

Авторы выражают благодарность исполнительному директору СПССК «Устюженский картофель» (Вологодская область) А. А. Кузнецову за предоставленные для исследования клубни картофеля сорта ‘Colomba’.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Мироненко Н.В., Орина А.С., Лашина Н.М., Афанасенко О.С. Экспрессия гена фактора транскрипции *StTCP23* в растениях картофеля, инокулированных виридом веретеновидности клубней. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):207-213. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-207-213

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-207-213

Expression of the transcription factor encoding gene *StTCP23* in potato plants infected with the tuber spindle viroid

Nina V. Mironenko, Alexandra S. Orina, Nina M. Lashina, Olga S. Afanasenko

*All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia***Corresponding author:** Nina V. Mironenko, nina2601mir@mail.ru

Background The potato spindle tuber viroid (PSTVd) is the smallest of all known potato pathogens. PSTVd is a circular, single-stranded RNA molecule that does not code for proteins. Symptoms caused by PSTVd lead to a significant reduction in tuber yield or death of the plant. PSTVd infection triggers the silencing of host-plant genes and induces disease symptoms in the plant via vd-sRNA. The *StTCP23* potato gene which encodes a transcription factor is one of the targets of PSTVd. The aim of the study was to assess the effect of inoculation of potato plants of cv. 'Colomba' with the PSTVd viroid NicTr-3 strain on the *StTCP23* expression in infected plants.

Materials and methods. Potato plants of cv. 'Colomba' were inoculated with leaf sap of the tomato cv. 'Rutgers' in which the PSTVd viroid NicTr-3 strain was propagated. RT-PCR with specific primers was used to confirm the infection of potato plants with the viroid. Diversity of RNA molecules in the PSTVd population was revealed using RT, cloning, and sequencing of the viroid. The expression of the *StTCP23* gene in infected potato plants was assessed by quantitative PCR with the *ef1a* gene as a reference.

Results. Symptoms of infecting 'Colomba' plants with the PSTVd viroid strain NicTr-3 were not detected, while the presence of the viroid in potato leaves was confirmed by molecular methods. Ten mutations were found in individual variants of the PSTVd strain NicTr-3, responsible for reducing the viroid's aggressiveness. An increase in the expression of *StTCP23* was shown at 3 time points in 'Colomba' plants inoculated with the NicTr-3 strain compared to the control.

Conclusion. The mechanism of interaction between PSTVd and the *StTCP23* gene in an infected potato plant is not universal and depends both on the potato genotype and viroid strain. Additional studies are required to prove the existence of specific interaction mechanisms between the host-plant and viroid strain genotypes.

Keywords: PSTVd, cv. 'Colomba', viroid mutations, pathogenicity, aggressiveness

Acknowledgements: the research was supported by a grant from the Russian Science Foundation: No. 20-46-07001 "Molecular and genetic mechanisms of plant pathogen interaction in the pathosystem of *Solanum* spp. – the potato spindle tuber viroid and features of the viroid's epidemiology on potato".

The authors express their gratitude to A. A. Kuznetsov, Executive Director of the Ustyuzhensky Potato Co-op, Vologda Province, for providing 'Colomba' potato tubers for the study.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this paper.

For citation: Mironenko N.V., Orina A.S., Lashina N.M., Afanasenko O.S. Expression of the transcription factor encoding gene *StTCP23* in potato plants infected with the tuber spindle viroid. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):207-213. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-207-213

Введение

Вироид веретеновидности клубней картофеля PSTVd (potato spindle tuber viroid) является высоковередоносным карантинным возбудителем заболевания, имеет широкое географическое распространение и выявлен на всех континентах, в том числе локально распространен и на территории России (Kastalyeva et al., 2013; Owens et al., 2009; Matsushita et al., 2021). Вироид PSTVd представляет собой одноцепочечную кольцевую молекулу РНК длиной около 360 нуклеотидов, не обладающую способностью кодировать белки (Katsarou et al., 2022) и использующую транскрипционный механизм хозяев (Hadidi et al., 2017). Репликация PSTVd сопровождается накоплением виroid-производных малых РНК (vd-sRNA). В инфицированных виroidом растениях картофеля разных сортов было отмечено накопление vd-sРНК длиной от 21 до 24 нуклеотидов, которые играют центральную роль в развитии болезни (Bao et al., 2019a; Cottilli et al. 2019; Kitabayashi et al., 2020).

Известно, что проявление симптомов заболевания у растений картофеля, зараженных PSTVd, ассоциировано с нарушением экспрессии («сайленсингом») гена *StTCP23*, в котором участвуют vd-sРНК (Bao et al., 2019a). Ген картофеля *StTCP23* относится к семейству генов факторов транскрипции TCP (the teosinte branched1/Cycloidea/proliferating cell factor), которые играют ключевую роль в росте и развитии растений (Bao et al., 2019b; Fang et al., 2021; Ren et al., 2021). Показано, что нуклеотидная последовательность размером 21 нуклеотид в 3'-нетранслируемом регионе этого гена в растениях картофеля сорта 'Atlantic' комплементарна участку генома VMR (virulence modulating region) штамма RG1 PSTVd, контролирующего патогенность виroidа (Bao et al., 2019a). Выявлено существенное снижение в три раза экспрессии гена *StTCP23* у растений сорта 'Atlantic' через 60 дней после инокуляции виroidом PSTVd на фоне развития симптомов инфицирования – угнетенного роста растений, образования мелких веретеновидных клубней, снижения урожая (Bao et al., 2019a). Однако универсальность выявленного механизма взаимодействия виroidа с геном *StTCP23* для сортов картофеля, несущих другие аллели этого гена, требует уточнения.

Целью исследования являлась оценка влияния инокуляции растений сорта 'Colomba' штаммом NicTr-3 виroidа PSTVd на экспрессию гена *StTCP23* в инфицированном растении.

Материалы и методы

Материалом исследования являлись растения картофеля сорта 'Colomba', который ранее был оценен по устойчивости к различным штаммам виroidа веретеновидности клубней и отнесен к восприимчивым сортам (Afanasenko et al., 2022b). Клубни картофеля (репродукция супер-элиты) были получены из семеноводческого хозяйства «Устюженский картофель» (Вологодская область). Также в исследование был включен штамм NicTr-3 виroidа PSTVd, выделенный из картофеля сорта 'Никулинский' и сохраненный на растениях томата сорта 'Rutgers', в отношении которого он продемонстрировал высокую патогенность (Afanasenko et al., 2022a). Нуклеотидная последовательность виroidа NicTr-3 депонирована в базу данных NCBI GenBank (номер LC654171, Matsushita et al., 2021).

Растения картофеля выращивали в теплице при температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$ с фотопериодом 16 часов света (TL-FIT0 L1517 88 VR, LED Brand: OSRAM OSLOLON® SSL) и 8 часов темноты. Каждый клубень высаживали в пластиковый сосуд объемом 2000 см³, наполненный грунтом «Терра Вита». Инокуляцию растений картофеля проводили с помощью сока из листьев растений томата сорта 'Rutgers', инфицированных штаммом виroidа NicTr-3, по методике, описанной ранее (Afanasenko et al., 2022a). Опыт проводили в трехкратной биологической повторности. На 14-е сутки отмечали фенотипические проявления инфицирования растений картофеля виroidом. Через 90 дней оценивали степень поражения образовавшихся клубней (наличие деформации), их количество и массу.

Для молекулярной детекции виroidа в растениях томата и картофеля, а также анализа экспрессии генов картофеля проводили выделение тотальной РНК из тканей листьев. Отбор проб листьев томата сорта 'Rutgers', который использовали для размножения виroidа, проводили на 30 сутки после инокуляции растений штаммом NicTr-3. Отбор проб листьев картофеля проводили перед инокуляцией (возраст растений – 14 суток от всходов), а также на 14, 30 и 60-е сутки после инокуляции растений виroidом. Одновременно проводили отбор проб листьев неинокулированных растений картофеля. Листовые доли верхнего яруса срезали по 3 штуки из каждой биологической повторности стерильными ножницами и помещали в жидкий азот, затем хранили в морозильной камере при температуре -80°C . Экстракцию общей РНК из 0,1 г ткани листа осуществляли с помощью RNeasy Plant Mini kit (Qiagen, Германия) согласно инструкциям производителя. Детекцию PSTVd производили методом ПЦР с обратной транскрипцией с помощью набора реагентов PrimerScript One Step RT-PCR kit ver 2 (Takara Bio Inc., Япония) и праймеров P3/P4 (Behjatnia et al., 1996). Амплификацию выполняли на термощелке MyCycler Thermal Cycler (Bio-Rad, США) по следующему протоколу: $50^\circ - 30$ мин; $94^\circ - 2$ мин; [$94^\circ - 30$ с, $60^\circ - 30$ с, $72^\circ - 30$ с] $\times 35$; $72^\circ - 5$ мин. Электрофорез продуктов реакции проводили в 1,7-процентном агарозном геле. Размер диагностического фрагмента виroidа PSTVd составлял 360 пн. Очистку продукта амплификации из агарозного геля осуществляли с помощью набора Cleanup Standard («Евроген», Россия).

Для идентификации штамма NicTr-3 виroidа в растениях томата осуществляли клонирование продукта амплификации и последующее секвенирование (фирма Beagle, Санкт-Петербург, Россия), а также обработку данных с помощью программного обеспечения Vector NTI Advance 10 (Thermo Fisher Scientific, США). Нуклеотидную последовательность четырех клонов виroidа, полученных из РНК сока растения томата сорта 'Rutgers', сравнили с референсной последовательностью штамма NicTr-3 (номер LC654171). Описание мутаций проводили согласно предложенной структуре генома PSTVd (Keese, Symon, 1985), состоящего из 5 доменов: левый терминальный (TL), включающий нуклеотиды с 1 по 46 и 316–359, домен патогенности (P) – 46–74 позиции нуклеотидов и 288–316, центральный консервативный регион (C) – 74–120 и 241–288 позиции, варибельный регион (V) – 120–140 и 212–241 и терминальный правый домен (TR) – 140–212.

Также в образцах тотальной РНК, выделенной из тканей листьев картофеля, оценивали экспрессию гена *StTCP23*. кДНК синтезировали методом ОТ-ПЦР на матри-

це тотальной РНК (1-2 мкг) с помощью набора реактивов MMLV RT kit («Евроген», Россия). Реакции кПЦР проводили в объеме 20 мкл, содержащем 4 мкл 5×qPCRMix-HS SYBR мастер-микса («Евроген», Россия), 500 нМ каждого праймера и 2 мкл раствора кДНК с использованием следующего протокола амплификации: 50° – 2 мин; 95° – 15 мин; [95° – 15 с; 62° – 60 с] × 40 на термоциклере CFX96 Real-Time System (Bio-Rad, США). Для детекции гена-мишени *StTCP23* использовали праймеры *StTCP23-PCR3F* (GGGGAAGTTAAATACAATAGT) и *R* (CAAGAAATTTATTTTGCCTTA) (Бао et al., 2019a). В качестве референсного гена использовали ген фактора элонгации *ef1a*, который амплифицировали с праймерами *ef1aF* (ATTGGAAACGGATATGCTCCA) и *ef1aR* (TCCTTACCTGAACGCCTGTCA) (Slugina et al., 2020). Эксперимент проводили в трехкратной повторности. Обработку первичных данных осуществляли с помощью программного обеспечения Bio-Rad CFX Manager 1.6. Относительную экспрессию генов рассчитывали по формуле $R = 2^{-\Delta\Delta Ct}$ (Livak, Schmittgen, 2002).

Результаты

На 14-е сутки после инокуляции растений картофеля сорта 'Colomba' штаммом NicTr-3 вириода PSTVd, а также в процессе последующих еженедельных наблюдений за весь период проведения эксперимента фенотипические проявления заболевания растений картофеля, а также видоизменения клубней после окончания вегетации отмечены не были.

Инфицирование растений картофеля сорта 'Colomba' вириодом было подтверждено путем ОТ-ПЦР с пробами общей РНК, выделенной из листьев растений. Продукт амплификации 360 пн вириода с праймерами, специфичными для PSTVd, отмечен в пробах, отобранных на 14-е сутки после инокуляции картофеля. На 30 и 60-е сутки после инокуляции специфичный продукт амплифицировался более интенсивно, что свидетельствует о репликации вириода в листьях растения и увеличении его концентрации.

Анализ нуклеотидной последовательности четырех клонированных вариантов продукта амплификации штамма NicTr-3 вириода PSTVd, выделенного из инфицированных растений картофеля, выявил 10 мутаций (от 3 до 5 в каждом клоне) по сравнению с референсной последовательностью штамма NicTr-3 (таблица).

Мутации в позициях 67 и 309 в домене патогенности Р генома вириода, причем в позиции 309 два типа мутаций – замена и делеция, отмечены у всех четырех клонов штамма NicTr-3. Кроме этого, выявлены три мутации

в центральном домене С (позиции 117, 120 и 285), три мутации в домене V (позиции 214, 226 и 125) и одна мутация в левом терминальном домене (позиция 324) относительно референсного штамма NicTr-3.

В пробах листьев, собранных в разные дни из инокулированных штаммом NicTr-3 растений картофеля, выявлено существенное увеличение относительной экспрессии гена *StTCP23* до 2,7–5,0 раз по сравнению с относительной экспрессией гена в растении перед инокуляцией (рисунок). Относительная экспрессия гена *StTCP23* в неинокулированном картофеле сорта 'Colomba' (контроль) варьировала в диапазоне от 1,2 до 1,8 и не имела существенных отличий в пробах листьев, срезанных в разные дни. Установлено достоверное различие в уровне относительной экспрессии гена *StTCP23* в инокулированных вириодом и в здоровых растениях картофеля на 30-е сутки после инокуляции ($p = 0,03$).

Обсуждение результатов

Взаимосвязь между уровнем экспрессии генов факторов транскрипции *TCP* в растениях картофеля и их заражением вириодом PSTVd остается малоизученной. В работе Бао et al. (2019a) выбор материала исследования был обусловлен максимальной восприимчивостью сорта 'Atlantic' и высокой патогенностью штамма RG1 вириода, что позволило выявить «сайленсинг» гена *StTCP23* при инфицировании вириодом и описать механизм этого процесса на молекулярном уровне, а также отметить фенотипические проявления заболевания – угнетение роста растения, деформацию листьев и клубней. Ключевым условием для «сайленсинга» гена *StTCP23* в картофеле сорта 'Atlantic', индуцированного заражением растения сильно патогенным, «летальным» штаммом RG1, является гомология таргетного участка гена, локализованного в нетранслируемой 3'-UTR области мРНК, и малых РНК, производных от штамма RG1, начинающихся с позиций 45, 46 или 47 генома вириода (Бао et al., 2019a).

Известно, что последовательности *vd-sRNA* (позиции 45–65) штамма RG1 вириода PSTVd были также гомологичны таргетному участку гена *LRR-RSTPK* (LRR receptor-like serine/threonine-protein kinase) томата сорта 'Rutgers', а *vd-sRNA* из варибельного домена (позиции 120–141) вириода «нацелены» на ген *STPK* (serine/threonine-protein kinase) томата и, что особенно интересно, *vd-sRNA* из терминального левого домена (позиции 353–333) вириода оказалась гомологичной участку гена *RSTPK* – киназы, которая является трансмембранным белком, вовлеченным в различные пути,

Таблица. Гетерогенность вариантов штамма NicTr-3 вириода веретенновидности клубней картофеля

Table. Heterogeneity of the variants of the potato spindle tuber viroid strain NicTr-3

Варианты штамма / Strain variants	Мутации в клонах штамма NicTr-3 в сравнении с референсной последовательностью* / Mutations in NicTr-3 strain variants compared to the reference sequence*							
NicTr-3-v1	C67G		C120U		C214U	C226T		
NicTr-3-v2		117+A	C120A				A309_	
NicTr-3-v3	C67G		C120U			C285U	A309_	A324G
NicTr-3-v4	C67G		C120U	A125G			A309U	

Примечание: * – «_» – делеция; «+» – инсерция

Note: * – deletion is marked as _; insertion is marked as +

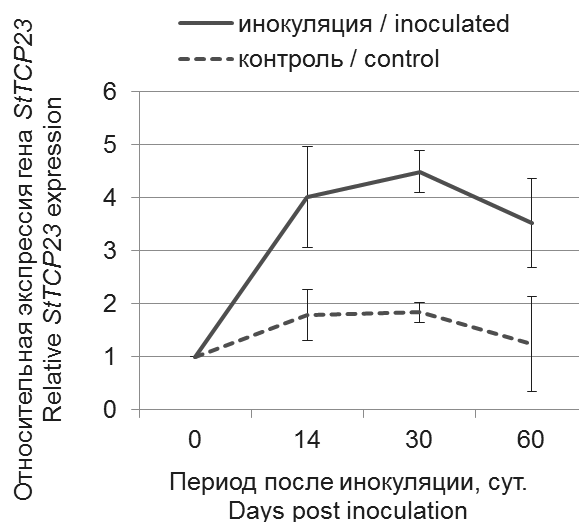


Рисунок. Относительная экспрессия гена *StTCP23* в инокулированных виroidом PSTVd NicTr-3 и здоровых (контроль) растениях картофеля сорта 'Colomba'

Figure. Relative expression of the *StTCP23* gene in potato plants of cv. 'Colomba' inoculated with the PSTVd NicTr-3 viroid compared to non-inoculated plants (control)

связанные с развитием растения и устойчивостью к болезни (Adkar-Purushothama, Perreault, 2018).

Фенотипические системные изменения в развитии растений, вызванные виroidной инфекцией, связывают с изменением генной экспрессии. Известны примеры как уменьшения (down-regulation), так и увеличения (up-regulation) экспрессии генов *SIBIGPETAL1* (Bhlh-фактор транскрипции) и *SIOVA6* (proline-like tRNA synthetase) соответственно в результате инокуляции томата сорта 'Rutger' виroidами TPMVd (tomato planta macho viroid) и MPVd (Mexican papita viroid) из сем. Pospiviroidae (Авиñá-Padilla et al., 2018).

Ранее нами было проведено исследование аллельного полиморфизма региона 3'UTR гена *StTCP23* картофеля (Mironenko et al., 2023), который является целевым участком для взаимодействия с vd-sRNA PSTVd. В восьми сортах картофеля были выявлены различные типы аллелей *StTCP23*. Причем у сорта 'Colomba' встречались аллели типа C, идентичные аллели у сорта 'Atlantic', представленной в модельном дуплексе мРНК 3'UTR гена *StTCP23* и vd-sRNA летального штамма RG1 виroidа (Bao et al., 2019a). Анализ нуклеотидного состава штамма NicTr-3 PSTVd выявил только одну мутацию в области Р домена (позиции нуклеотидов 45-67), которая гомологична целевому участку 3'UTR гена *StTCP23*.

В данном исследовании видимые симптомы поражения растений картофеля виroidом не были зафиксированы, хотя факт инокуляции и накопление виroidа в тканях листьев выявлен с помощью молекулярных методов. Можно сделать вывод, что штамм NicTr-3 виroidа, продемонстрировавший высокую агрессивность в отношении томата сорта 'Rutgers' (Afanasenko et al., 2022b), для картофеля оказался слабоагрессивным, в отличие от штамма RG1, использованного ранее (Bao et al., 2019a).

Ранее при инокуляции растений сорта 'Colomba' штаммом NicTr-3 виroidа симптомы болезни проявились в виде угнетенного роста растений, деформации листьев и клубней (Afanasenko et al., 2022b). В данном исследовании инокуляция растений картофеля и анализ экспрессии гена *StTCP23* в них был проведен позднее

примерно на один год, в течение которого штамм NicTr-3 поддерживался на растениях томата сорта 'Rutgers'. Вероятно, за время культивирования на томате штамм виroidа накопил в своей популяции мутантные варианты с низкой в отношении картофеля вирулентностью. Это объясняет увеличение экспрессии гена *StTCP23* картофеля при инфицировании растений сорта 'Colomba' этим штаммом, выявленное в данном исследовании, тогда как ранее было показано снижение экспрессии *StTCP23* в растениях картофеля сорта 'Atlantic', инфицированных штаммом RG1 (Bao et al., 2019a). Таким образом, полученные результаты не подтверждают универсальность механизма взаимодействия виroidа и гена фактора транскрипции картофеля *StTCP23*, который, очевидно, зависит как от разнообразия мутаций в популяции молекул виroidа, так и от аллельного состава гена *StTCP23*, специфичного для каждого сорта картофеля.

Известно существенное влияние мутаций на патогенность штаммов виroidа в отношении томата. Например, мутации в нуклеотидных позициях 42 и 64 генома штамма PSTVd-I существенно ослабляли его патогенность в отношении томата сорта 'Rutgers', что выражалось как в уменьшении развития видимых симптомов, так и в снижении аккумуляции виroidа в зараженном растении (Kitabayashi et al., 2020). По всей видимости, вторичная структура VMR региона (нуклеотиды в позициях 43-59) играет важную роль в патогенности штаммов виroidа, а именно индуцирует изменения в термодинамической стабильности локальной вторичной структуры, что влияет на патогенность посредством взаимодействия с неидентифицированными факторами хозяина (Górra et al., 1994, 1996; Owens et al., 1995).

Центральный регион генома PSTVd также играет критическую роль в патогенности виroidа. Например, замена одного нуклеотида в позиции 257 (U на A) в штамме PSTVd-Iwt вызывала сильные симптомы болезни и преждевременную гибель инфицированных этим штаммом растений томата (Qi, Ding, 2003), а замена нуклеотида U на C в позиции 259 привела к образованию мутанта, способного легко заражать растения табака *Nicotiana tabacum* (Wassenegger et al., 1996).

Заключение

При инокуляции растений картофеля сорта 'Colomba' штаммом NicTr-3 вириода веретеновидности клубней PSTVd фенотипические изменения растений в течение всего периода наблюдений, а также видоизменения клубней после окончания вегетации не выявлены. В то же время факт инфицирования и накопления вириода в тканях подтверждены молекулярными методами. В популяции молекул вириода NicTr-3, поддерживаемой на томате сорта 'Rutgers', найдены 10 мутаций в сравнении с исходной последовательностью штамма, которые привели к снижению агрессивности штамма в отношении картофеля.

Также установлено увеличение экспрессии гена *StTCP23* в листьях растений картофеля, инокулированных штаммом NicTr-3 вириода PSTVd. Полученные результаты не подтвердили универсальность механизма взаимодействия вириода PSTVd и гена *StTCP23*, который, по всей видимости, зависит как от разнообразия мутаций в популяции молекул вириода, так и от аллельного состава гена *StTCP23*, специфичного для каждого сорта картофеля.

Для доказательства существования специфических механизмов взаимодействия генотипа сорта и генотипа штамма вириода необходимы дополнительные исследования.

References / Литература

- Adkar-Purushothama C.R., Perreault J.P. Alterations of the viroid regions that interact with the host defense genes attenuate viroid infection in host plant. *RNA Biology*. 2018;15(7):955-966. DOI: 10.1080/15476286.2018.1462653
- Afanasenko O.S., Khiutti A.V., Mironenko N.V., Lashina N.M. Transmission of potato spindle tuber viroid between *Phytophthora infestans* and host plants. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022a;26(3):271-280. DOI: 10.18699/VJGB-22-34
- Afanasenko O.S., Lashina N.M., Mironenko N.V., Kyrova E.I., Rogozina E.V., Zubko N.G. et al. Evaluation of responses of potato cultivars to potato spindle tuber viroid and to mixed viroid/viral infection. *Agronomy*. 2022b;12(12):2916. DOI: 10.3390/agronomy12122916
- Aviña-Padilla K., Rivera-Bustamante R., Kovalskaya N.Y., Hammond R.W. Pospiviroid infection of tomato regulates the expression of genes involved in flower and fruit development. *Viruses*. 2018;10(10):516. DOI: 10.3390/v10100516
- Bao S., Owens R.A., Sun Q., Song H., Liu Y., Eamens A.L. et al. Silencing of transcription factor encoding gene *StTCP23* by small RNAs derived from the virulence modulating region of potato spindle tuber viroid is associated with symptom development in potato. *PLoS Pathogens*. 2019a;15(12):e1008110. DOI: 10.1371/journal.ppat.1008110
- Bao S., Zhang Z., Lian Q., Sun Q., Zhang R. Evolution and expression of genes encoding TCP transcription factors in *Solanum tuberosum* reveal the involvement of *StTCP23* in plant defence. *BMC Genetics*. 2019b;20(1):91. DOI: 10.1186/s12863-019-0793-1
- Behjatnia A., Dry I., Krake L., Condé B.D., Connelly M.I., Randles J. et al. New potato spindle tuber viroid and tomato leaf curl geminivirus strains from a wild *Solanum* sp. *Phytopathology*. 1996;86:880-886. DOI: 10.1094/Phyto-86-880
- Cottilli P., Belda-Palazón B., Adkar-Purushothama C.R., Perreault J.P., Schleiff E., Rodrigo I. et al. Citrus exocortis viroid causes ribosomal stress in tomato plants. *Nucleic Acids Research*. 2019;47(16):8649-8661. DOI: 10.1093/nar/gkz679
- Fang Y., Zheng Y., Lu W., Li J., Duan Y., Zhang S. et al. Roles of miR319-regulated TCPs in plant development and response to abiotic stress. *The Crop Journal*. 2021;9(1):17-28. DOI: 10.1016/j.cj.2020.07.007
- Góra A., Candresse T., Zagórski W. Analysis of the population structure of three phenotypically different PSTVd isolates. *Archives of Virology*. 1994;138(3-4):233-245. DOI: 10.1007/BF01379128
- Góra A., Candresse T., Zagórski W. Use of intramolecular chimeras to map molecular determinants of symptom severity of potato spindle tuber viroid (PSTVd). *Archives of Virology*. 1996;141(11):2045-2055. DOI: 10.1007/BF01718214
- Hadidi A., Flores R., Randles J.W., Palukaitis P. (eds.) *Viroids and Satellites*. Oxford; Cambridge, MA: Academic Press; 2017.
- Kastalyeva T.B., Girsova N.V., Mozhaeva K.A., Lee I.M., Owens R.A. Molecular properties of potato spindle tuber viroid (PSTVd) isolates of the Russian Research Institute of Phytopathology. *Molecular Biology*. 2013;47(1):85-96. DOI: 10.1134/S0026893312060106
- Katsarou K., Adkar-Purushothama C.R., Tassios E., Samiotaki M., Andronis C., Lisón P. et al. Revisiting the non-coding nature of pospiviroids. *Cells*. 2022;11(2):265. DOI: 10.3390/cells11020265
- Keese P., Symons R.H. Domains in viroids: evidence of intermolecular RNA rearrangements and their contribution to viroid evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1985;82(14):4582-4586. DOI: 10.1073/pnas.82.14.4582
- Kitabayashi S., Tsushima D., Adkar-Purushothama C.R., Sano T. Identification and molecular mechanisms of key nucleotides causing attenuation in pathogenicity of dahlia isolate of potato spindle tuber viroid. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(19):7352. DOI: 10.3390/ijms21197352
- Livak K.J., Schmittgen T.D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2(-Delta Delta C(T)) method. *Methods*. 2001;25(4):402-408. DOI: 10.1006/meth.2001.1262
- Matsushita Y., Yanagisawa H., Khiutti A., Mironenko N., Ohto Y., Afanasenko O. Genetic diversity and pathogenicity of potato spindle tuber viroid and chrysanthemum stunt viroid isolates in Russia. *European Journal of Plant Pathology*. 2021;161(8):529-542. DOI: 10.1007/s10658-021-02339-z
- Mironenko N.V., Kochetov A.V., Afanasenko O.S. Influence of allelic polymorphism of the 3' untranslated region of the *StTCP23* gene on the tolerance of potato varieties to the spindle tuber viroid. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):137-143. [in Russian] (Мироненко Н.В., Кочетов А.В., Афанасенко О.С. Влияние аллельного полиморфизма 3'нетранслируемой области гена *StTCP23* на толерантность сортов картофеля к вириоду веретеновидности клубней. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):137-143). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-137-143
- Owens R.A., Chen W., Hu Y., Hsu Y.H. Suppression of potato spindle tuber viroid replication and symptom expression by mutations which stabilize the pathogenicity domain. *Virology*. 1995;208(2):554-564. DOI: 10.1006/viro.1995.1186
- Owens R.A., Girsova N.V., Kromina K.A., Lee I.M., Mozhaeva K.A., Kastalyeva T. Russian isolates of potato spindle tuber

- viroid exhibit low sequence diversity. *Plant Disease*. 2009;93(7):752-759. DOI: 10.1094/PDIS-93-7-0752
- Qi Y, Ding B. Inhibition of cell growth and shoot development by a specific nucleotide sequence in a noncoding viroid RNA. *The Plant Cell*. 2003;15(6):1360-1374. DOI: 10.1105/tpc.011585
- Ren L., Wu H., Zhang T., Ge X., Wang T., Zhou W. et al. Genome-wide identification of TCP transcription factors family in sweet potato reveals significant roles of miR319-targeted TCPs in leaf anatomical morphology. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:686-698. DOI: 10.3389/fpls.2021.686698
- Slugina M.A., Filyushin M.A., Meleshin A.A., Shchennikova A.V., Kochieva E.Z. Differences in the amylase inhibitor gene *SbAI* expression in potato during long-term tuber cold storage and in response to short-term cold stress. *Russian Journal of Genetics*. 2020;56(3):375-378. DOI: 10.1134/S1022795420030163
- Wassenegger M., Spieker R.L., Thalmeir S., Gast F.U., Riedel L., Sanger H.L. A single nucleotide substitution converts potato spindle tuber viroid (PSTVd) from a noninfectious to an infectious RNA for *Nicotiana tabacum*. *Virology*. 1996;226(2):191-197. DOI: 10.1006/viro.1996.0646

Информация об авторах

Нина Васильевна Мироненко, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, nina2601mir@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3383-2973>

Александра Станиславовна Орина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, orina-alex@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7657-6618>

Нина Михайловна Лашина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, nlashina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1419-7134>

Ольга Сильвестровна Афанасенко, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, olga.s.afan@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7368-0797>

Information about the authors

Nina V. Mironenko, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, nina2601mir@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3383-2973>

Aleksandra S. Orina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, orina-alex@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-7657-6618>

Nina M. Lashina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, nlashina@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1419-7134>

Olga S. Afanasenko, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, olga.s.afan@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7368-0797>

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 02.11.2022; одобрена после рецензирования 05.12.2022; принята к публикации 04.09.2023.

The article was submitted on 02.11.2022; approved after reviewing on 05.12.2022; accepted for publication on 04.09.2023.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 634.1:631.524:635.977

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-214-220

**Эколого-биологические особенности и перспективы интродукции *Cornus mas* в центральной России**

О. Ю. Емельянова, М. Ф. Цой

*Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, Орловская обл., Россия***Автор, ответственный за переписку:** Ольга Юрьевна Емельянова, dendrariy@orel.vniispk.ru

Актуальность. Интродукция нетрадиционных культур, обладающих ценными потребительскими характеристиками, является одним из путей сохранения здоровья и увеличения продолжительности жизни человека. *Cornus mas* L. выращивается в Европе, в Средней Азии и на Ближнем Востоке. Однако селекция и промышленное возделывание данной культуры развиты слабо. Цель данной работы – анализ эколого-биологических особенностей и итоги интродукции *C. mas* для обоснования использования потенциала хозяйственно ценных признаков в селекции и озеленении в условиях Орловской области.

Материалы и методы Объекты исследования – экземпляры *C. mas*, произрастающие в коллекции дендрария ВНИИСПК с 1968 г. Исследования проводились с 2012 по 2021 г. по общепринятым методикам; степень декоративности – по методике О. Ю. Емельяновой.

Результаты и заключение. В условиях дендрария *C. mas* имеет хорошую жизненность, активный рост, высокую степень устойчивости к повреждающим климатическим факторам зимнего периода, устойчивость к поражениям болезнями и повреждениям вредителями. Сумма эффективных температур для начала фазы «цветение» *C. mas* – $46,6 \pm 2,0^\circ\text{C}$. Срок начала цветения – 15 апреля (± 7 дней), продолжительность – 17 ± 5 дней. Степень цветения ежегодно высокая (4,8–5,0 баллов), степень плодоношения хорошая (3,8–4,1 балла). Пики степени декоративности *C. mas* наблюдаются в апреле и в августе. Период декоративности *C. mas* – 208 (± 12) дней. Анализ эколого-биологических особенностей *C. mas* в условиях Орловской области показал перспективность интродукции данного вида. Создание и изучение коллекционных фондов из сортов *C. mas* соседних регионов послужит базой для успешной селекции на получение новых сортов с хозяйственно ценными признаками для условий центральной России.

Ключевые слова: зимостойкость, жизненность, сроки цветения, степень декоративности, селекция, озеленение

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FGZS-2022-0007).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Емельянова О.Ю., Цой М.Ф. Эколого-биологические особенности и перспективы интродукции *Cornus mas* в центральной России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):214-220. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-214-220

BRIEF REPORTS

Brief report

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-214-220

Ecological and biological features and prospects of the introduction of *Cornus mas* in Central Russia

Olga Yu. Emelyanova, Mikhail F. Tsoy

*Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Orel Province, Russia***Corresponding author:** Olga Yu. Emelyanova, dendrarary@orel.vniispk.ru

Background. *Cornus mas* L. is grown in Europe, Central Asia, and the Middle East. Natural thickets are widespread in the Caucasus. The aim of this work was to analyze ecological and biological features of *C. mas* and the results of its introduction in order to justify the potential of its valuable agronomic traits for breeding and landscaping in Orel Province.

Methods and materials. Specimens of *C. mas* preserved in the arboretum of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding since 1968 were analyzed. The studies were conducted from 2012 through 2021. Winter hardiness, plant condition, degrees of flowering and fruiting were assessed using conventional techniques, while the degree of ornamentality was determined according to O. Yu. Emelyanova's method.

Results and conclusion. Under the conditions of the arboretum, *C. mas* is a multi-stemmed shrub, up to 5.3 m high, with an average crown projection diameter of up to 4.7 m, showing good vitality, active growth, and a high degree of resistance to damaging climatic factors of the winter season. No damage by diseases or pests was observed during the studies. The sum of effective temperatures for the beginning of *C. mas* flowering was $46.6 \pm 2.0^\circ\text{C}$. Flowering started on April 15 (± 7 days). On average, flowering lasted 17 ± 5 days in the arboretum. Annually, the degree of flowering was high (4.8–5.0 points), and the vigor of fruiting was good (3.8–4.1 points). Peaks of *C. mas* ornamentality were observed in April, during the early abundant flowering of plants, and in August, during the ripening of fruits. The ornamental period of *C. mas* was on average 208 (± 12) days. The analysis of ecological and biological features of *C. mas* under the conditions of Orel Province showed the prospects of this species' introduction. Formation and study of *C. mas* collection from neighboring regions will serve as a basis for successful breeding to obtain new cultivars with valuable traits for the conditions of Central Russia.

Keywords: winter hardiness, vitality, flowering dates, degree of ornamentality, breeding, landscaping

Acknowledgements: the work was supported financially by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FGZS-2022-0007).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Emelyanova O. Yu., Tsoy M. F. Ecological and biological features and prospects of the introduction of *Cornus mas* in Central Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):214-220. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-214-220

Введение

Проблема сохранения здоровья и увеличения продолжительности жизни человека является одной из самых важных и актуальных задач современного общества. Одним из путей решения этой проблемы является повышение доли потребления плодов и ягод с высоким содержанием биологически активных веществ (Earle et al., 2004; Попов, 2016). В мире растет интерес к редким плодовым и ягодным растениям, обладающим ценными потребительскими характеристиками, в том числе содержанием биологически активных веществ, разноплановым потенциалом использования в плодоводстве, селекции, озеленении, и отвечающим современным требованиям по устойчивости к биотическим и абиотическим факторам среды (Sorokopudov et al., 2013; Emelyanova, Firsov, 2021).

В этой связи становится актуальным культивирование не только типичных для конкретной зоны пород древесных растений, но и интродукция нетрадиционных культур (Попов, Zhidyokhina, 2016). Среди них – *Cornus mas* L., кустарник или небольшое дерево семейства Cornaceae Bercht. & J. Presl. Его естественные заросли широко распространены на Кавказе, встречается в диком виде в Крыму, в Молдавии и на Юге Украины, в странах Южной и Средней Европы, в северной части Малой Азии. В России в культуре выращивается в Крыму, в Краснодарском крае, на Нижней Волге. В частных садах встречается в средней полосе России и под Санкт-Петербургом. Установлено, что в Московском регионе *C. mas* нормально развивается, проходит все фенологические фазы с продолжительностью вегетационного периода 180–190 дней (Artyukhova, Sorokopudova, 2017). *C. mas* также выращивается в Европе, в Средней Азии и на Ближнем Востоке. Несмотря на широкое распространение, селекция данной культуры развита слабо, а возделывание на промышленной основе обычно не практикуется (Yurina, 2002; Попов, Zhidyokhina, 2016; Szczepaniak et al., 2019; Szot et al., 2019). Однако *C. mas* обладает рядом полезных свойств и декоративных качеств (Artyukhova, Sorokopudova, 2017). В частности, его используют в свежем и переработанном виде в кулинарии, кондитерской и консервной промышленности. В пищу используется не только мякоть плода, но и косточки, которые служат сырьем для приготовления суррогата кофе. Плоды и листья *C. mas* содержат биологически активные компоненты, обладающие антиоксидантной активностью, могут нормализовать артериальное давление; кроме того, плоды применяют как общеукрепляющее и тонизирующее средство. (Попов, Zhidyokhina, 2015; Попов, 2016; Szczepaniak et al., 2019; Demir, 2020). В плодах данной культуры содержатся пищевые волокна, антоцианы, микроэлементы. По содержанию витамина С плоды *C. mas* превосходят лимон, рябину и крыжовник (Samsonova, 2005; Khasanova, 2016; Попов, Zhidyokhina, 2016). В то же время растения данного вида являются хорошими ранневесенними медоносами. На одном растении насчитывается до 6300 цветков. Медопродуктивность условно чистых насаждений – до 15 кг/га (Samsonova, 2005; Bogdanova, 2014). В связи с этим в последние годы становится актуальным внедрение *C. mas* в качестве новой перспективной плодовой культуры. Подобные исследования ведутся в Крыму, в Среднем Предуралье, на юго-востоке Центрально-Черноземного региона, где выделены сорта с комплексом хозяйственно ценных показателей, пригодные для промышленного

выращивания (Danilenko, Potanin, 2016; Попов, Zhidyokhina, 2016; Ardasheva et al., 2019). В центральной России исследования проводились только в Смоленской и Московской областях (Artyukhova, Sorokopudova, 2017; Ishchuk, Glushakov, 2021), то есть в регионах с достаточно устойчивой зимой. В более южных областях средней полосы России таких исследований не проводилось. Цель данной работы – анализ эколого-биологических особенностей и итоги интродукции *C. mas* для обоснования использования потенциала хозяйственно ценных признаков в селекции и озеленении в условиях Орловской области.

Материалы и методы

Исследования проводили в дендрарии Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (ВНИИСПК, Россия), расположенного в европейской части России в 368 км к юго-западу от Москвы (53°00' N, 36°00' E), в полутора километрах от города Орла, в непосредственной близости от оживленной автомагистрали Орел – Болхов, от которой отделен однорядной посадкой липы мелколистной (Masalova et al., 2021). На сегодняшний день биоресурсная коллекция насчитывает более 340 видов, форм и сортов растений, высаженных на территории института по географическому принципу: растения Европы, Средиземноморья, Северной Америки, Средней Азии, Сибири и Дальнего Востока. Объектами исследования являлись пять экземпляров *C. mas*, произрастающих в дендрарии в зоне «Растения Средиземноморья» с 1968 г. Исследования проводились с 2012 по 2021 г. Годичные приросты изучали с 2019 по 2021 г. Были использованы следующие методики: определение зимостойкости – визуально в полевых условиях по завершению распускания почек по 7-балльной шкале П. И. Лапина и С. В. Сидневой (Lapin, Sidnev, 1975), где 1 – высший балл зимостойкости; оценка состояния (жизненности) растений – по 3-балльной шкале А. Г. Головача (Golovach, 1980), где 1 – лучшее состояние; степени цветения и плодоношения растений – по 6-балльной шкале А. Г. Головача (Golovach, 1980), где 5 – высший балл; степень декоративности – по методике О. Ю. Емельяновой (Emelyanova, 2016). Расчеты и статистическая обработка результатов исследований выполнены с использованием программного пакета Microsoft Excel 2016.

Результаты и обсуждение

В естественной среде *C. mas* – листопадное дерево высотой 5–8 м или кустарник высотой 3–4 м (Yurina, 2002; Szczepaniak et al., 2019). В условиях дендрария это многоствольный кустарник с горизонтально распростертыми ветвями высотой до 5,3 м и средним диаметром проекции кроны до 4,7 м (табл. 1). По строению габитуса популяция *C. mas* в коллекции достаточно однородная, со средней степенью рассеивания.

Несмотря на то, что, теоретически, исследуемые растения достигли своих максимальных размеров, апикальные приросты основных ветвей значительно превышают базальные, то есть продолжается активный рост (табл. 2). Данный факт, наряду с хорошей жизненностью (объекты хорошо развиты, имеют здоровый вид, хорошо развитые побеги, почки и листья, нормальную их окраску, обильно или хорошо цветут и плодоносят), говорит о том, что в возрасте 53 лет все экземпляры *C. mas* имеют хороший потенциал роста.

Таблица 1. Габитус *Cornus mas* L. в дендрарии Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур**Table 1.** Habitus of *Cornus mas* L. plants in the arboretum of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding

№ растения	Количество стволов, шт.	Высота, м	Средний диаметр проекции кроны, м
1	6	5,3	4,2
2	5	4,6	4,6
3	5	3,4	3,3
4	6	5,1	4,6
5	7	5,2	4,7
Средняя	5,8	4,72	4,28
Коэффициент вариации V, %	14,43	16,64	13,56

Таблица 2. Годичные приросты (см) *Cornus mas* L. в дендрарии Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур**Table 2.** Annual increments (cm) of *Cornus mas* L. plants in the arboretum of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding

Годичные приросты (фактор А)	Годы исследования (фактор В)			В среднем за три года
	2019	2020	2021	
Апикальные	16,4	12,1	12,4	13,6
Базальные	4,7	3,7	8,1	5,5

$HCP_{05}A = 0,86$ $HCP_{05}B = 1,05$ $HCP_{05}AB = 1,49$

Перспективность интродукции во многом зависит от зимостойкости, то есть от способности растений противостоять комплексу воздействий внешней среды на протяжении зимнего и ранневесеннего периодов (Lebougeois et al. 2010; Masalova et al., 2021). Зимостойкость растений дендрария определялась визуально в полевых условиях по завершению распускания почек, когда повреждения наиболее заметны. В годы исследования в Орловской области наблюдались разные условия перезимовки: от мягких (с устойчивыми отрицательными температурами и постоянным снежным покровом) до довольно суровых (с резкими колебаниями температуры и почти без снега). Исследования показали, что растения *C. mas* проявляют высокую степень устойчивости к повреждающим климатическим факторам зимнего периода. Однако в отдельные годы наблюдаются незначительные повреждения цветков возвратными заморозками.

Одним из важных показателей в процессе интродукции растений является их устойчивость к вредителям и болезням. В период исследований на растениях *C. mas* поражения болезнями и повреждения вредителями не были обнаружены. Это дает возможность предположить, что при введении данного вида в промышленную культуру мы получим экологически чистую продукцию, а затраты на ее производство будут снижены.

Говоря о *C. mas* как о потенциально перспективной плодовой культуре, нельзя не отметить важность качества цветения и плодоношения в условиях исследований, что является залогом высоких урожаев. Данный вид растений цветет до распускания листьев в апреле. По исследованиям И. Б. Богдановой (Bogdanova, 2014), в усло-

виях Ростовской области (Россия) сумма эффективных температур для начала цветения *C. mas* составляет $46,6 \pm 2,0^\circ\text{C}$, а для окончания цветения – $120,3 \pm 2,1^\circ\text{C}$. Наши исследования подтверждают данный факт и для условий средней полосы России. Соответственно, в зависимости от условий года набухание цветочных почек наблюдается в конце марта – начале апреля. Срок начала фазы «цветение» приходится на 15 апреля (± 7 дней). В годы с жаркой весной продолжительность «цветения» ограничивается 10–12 днями. В годы с холодной весной цветение *C. mas* наблюдается в течение 20–25 дней. В среднем в условиях дендрария цветение продолжается 17 ± 5 дней. Цветки мелкие, золотисто-желтые, обополюе, собраны в зонтичные соцветия; в зонтике 15–25 цветков. Степень цветения ежегодно высокая (4,8–5,0 баллов). Однако не все цветки формируют полноценную завязь. Плод – сочная костянка удлинненно-овальной формы, от красного до темно-красного цвета. Средняя масса плода в условиях исследования – 5–7 г. Степень плодоношения хорошая (3,8–4,1 балла), то есть урожай полноценных плодов составляет 65–80% от полного потенциального плодоношения растений.

Нетрадиционные плодовые интродуценты обладают не только ценными пищевыми и лечебными свойствами, но и оригинальными декоративными качествами (Artyukhova, Sorokopudova, 2017). Степень декоративности *C. mas* определялась с учетом динамики изменения декоративных качеств в течении года (Emelyanova, 2016). В соответствии с данной методикой проводилась ежемесячная оценка растений по шести признакам: архитектура кроны, листья, цветки и соцветия, плоды, окраска

и фактура коры, оригинальность. Для этого использовалась пятибалльная шкала, где 5 – наивысшее значение. При оценке декоративных качеств листьев учитывали не только их форму и окраску, но и выраженность листовой мозаики (Emelyanova, 2016). Ежемесячную степень декоративности по каждому признаку умножали на коэффициенты весомости согласно методике. По суммам произведений строили график (рисунок), который позволяет анализировать изменчивость степени декоративности вида в течение года.

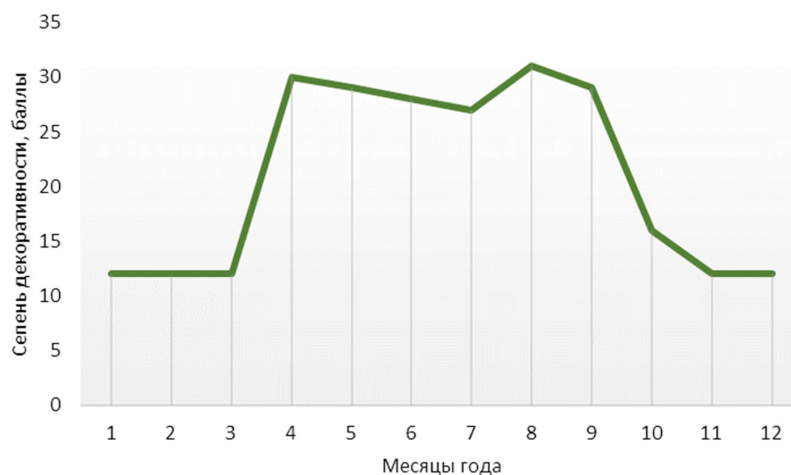


Рисунок. Динамика изменения степени декоративности *Cornus mas* L. в течение года (среднее за 2012–2021 гг.) в дендрарии Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур

Figure. Annual dynamics of changes in the degree of *Cornus mas* L. ornamentality (average for 2012–2021) in the arboretum of the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding

Исследования показали, что пики степени декоративности *C. mas* наблюдаются в апреле, в период раннего обильного цветения растений, и в августе, когда в процессе созревания плоды начинают окрашиваться в красно-оранжевые тона и хорошо видны на фоне темно-зеленой густой листвы. В мае – июле декоративность сохраняется за счет оригинальной листовой мозаики, в сентябре листья окрашиваются в желтые тона, а плоды становятся темно-бордовыми и теряют контрастность рядом с начинающими оголяться темными побегами. В зимний период степень декоративности довольно низкая и поддерживается исключительно архитектурой стволов и ветвей. Однако за счет раннего цветения период высокой декоративности *C. mas* довольно длительный и составляет в среднем 208 (± 12) дней.

Заключение

Анализ эколого-биологических особенностей *C. mas* в условиях Орловской области показал перспективность интродукции данного вида. Исследованные экземпляры обладают хорошей жизнеспособностью, проявляют высокую степень устойчивости к повреждающим климатическим факторам зимнего периода, не поражаются болезнями и не повреждаются вредителями, имеют ежегодно высокую степень цветения (4,8–5,0 баллов) и хорошую степень плодоношения (3,8–4,1 балла); период высокой степени декоративности составляет 208 (± 12) дней.

Соответственно, создание и изучение коллекционных фондов из сортов *C. mas* соседних регионов послужит базой для успешной селекции на получение новых сортов с хозяйственно ценными признаками для условий центральной России.

References / Литература

- Ardasheva O.A., Fyodorov A.V., Cheremnykh E.N. Introduction of dogwood (*Cornus mas* L.) forms in the Middle Urals. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2019;4(60):3-7. [in Russian] (Ардашева О.А., Федоров А.В., Черемных Е.Н. Интродукция форм кизила (*Cornus mas* L.) в Среднем Предуралье. *Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019;4(60):3-7).
- Artyukhova A.V., Sorokopudova O.A. Introduction and reproduction of rare ornamental plants bred at the Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Selection and Technological Institute of Horticulture and Nursery Breeding". *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2017;(62):59-64. [in Russian] (Артюхова А.В., Сорокопудова О.А. Интродукция и размножение редких декоративных растений коллекции ФГБНУ ВСТИСП. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2017;(62):59-64).
- Bogdanova I.B. The effect of temperature on the flowering of honey-yielding trees and shrubs (Vliyaniye temperatury na tsveteniyе drevesnykh i kustarnikovykh medonosov). *Pchelovodstvo = Beekeeping*. 2014;(3):22-23. [in Russian] (Богданова И.Б. Влияние температуры на цветение древесных и кустарниковых медоносов. *Пчеловодство*. 2014;(3):22-23).
- Danilenko V.Ya., Potanin D.V. Prospects of implementation of adaptive technology for growing dogwood in the territory of the Republic of Crimea. *Innovatsii v nauke = Innovations in Science*. 2016;10(59):145-157. [in Russian] (Даниленко В.Я., Потанин Д.В. Перспективы внедрения адаптивных технологий при выращивании кизила на территории Республики Крым. *Инновации в науке*. 2016;10(59):145-157).
- Demir B., Sayinci B., Sümbül A., Yaman M., Yildiz E., Çetin N. et al. Bioactive compounds and physical attributes of *Cornus mas* genotypes through multivariate approaches. *Folia Horticulturae*. 2020;32(2):189-202. DOI: 10.2478/fhort-2020-0018
- Earle M., Earle R., Anderson A. Food product development. St. Petersburg: Professiya; 2004. [in Russian] (Эрл М., Эрл Р., Андерсон А. Разработка пищевых продуктов. Санкт-Петербург: Профессия; 2004).

- Emelyanova O.Yu. For method of complex assessment of woody plants decorativeness. *Contemporary Horticulture*. 2016;3(19):54-74. [in Russian] (Емельянова О.Ю. К методике комплексной оценки декоративности древесных растений. *Современное садоводство*. 2016;3(19):54-74).
- Emelyanova O.Yu., Firsov A.N. Ecological and biological features of rare fruit plants of the Rosaceae Juss family. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2021;(5):53-57. [in Russian] (Емельянова О.Ю., Фирсов А.Н. Эколого-биологические особенности редких плодовых растений семейства Rosaceae Juss. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2021;(5):53-57). DOI: 10.30850/vrnsn/2021/5/53-57
- Golovach A.G. Trees, shrubs, and lianas of the Botanical Garden of the Botanical Institute, USSR Academy of Sciences: results of introduction (Derevya, kustarniki i liany botanicheskogo sada BIN AN SSSR: itogi introduktsii). Leningrad: Nauka; 1980. [in Russian] (Головач А.Г. Деревья, кустарники и лианы ботанического сада БИН АН СССР: итоги интродукции. Ленинград: Наука; 1980).
- Ishchuk O.V., Glushakov S.N. Dogwood is a promising crop for the Non-Black-Earth zone of Russia (Kizil – perspektivnaya kultura dlya nechernozomnoy zony Rossii). In: *Modern Environmentally Sustainable Technologies and Agricultural Production Systems. Proceedings of the International Scientific Conference. Vol. 1 (Sovremennye ekologicheski ustoychivye tekhnologii i sistemy selskokhozyaystvennogo proizvodstva. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. T. 1)*. Smolensk; 2021. p.71-74. [in Russian] (Ищук О.В., Глушаков С.Н. Кизил – перспективная культура для нечернозёмной зоны России. В кн.: *Современные экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства. Сборник материалов международной научной конференции. Т. 1*. Смоленск, 2021. С.71-74).
- Khasanova D.A. Dogwood as a medicinal plant (Kizil kak lekarstvennoye rasteniye). *Biologiya i integrativnaya meditsina = Biology and Integrative Medicine*. 2016;(4):45-54. [in Russian] (Хасанова Д.А. Кизил как лекарственное растение. *Биология и интегративная медицина*. 2016;(4):45-54).
- Lapin P.I., Sidneva S.V. Assessment of the freezing degree in plant species (Otsenka stepeni podmerzaniya vidov rasteniy). In: *Woody Plants of the Main Botanical Garden of the USSR Academy of Sciences (Drevnyye rasteniya Glavnogo botanicheskogo sada AN SSSR)*. Moscow: Nauka; 1975. p.18-19. [in Russian] (Лапин П.И., Сиднева С.В. Оценка степени подмерзания видов растений. В кн.: *Древесные растения Главного ботанического сада АН СССР*. Москва: Наука; 1975. С.18-19).
- Lebourgeois F., Rathgeber C.B.K., Ulrich E. Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (*Abies alba*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*). *Journal of Vegetation Science*. 2010;21(2):364-376. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2009.01148.x
- Masalova L., Emelyanova O., Tsoy M., Pavlenkova G., Firsov A. Ecological and biological features of the development of introduced species of the genus *Abies* Mill. *E3S Web of Conferences*. 2021;254:06001. DOI: 10.1051/e3sconf/202125406001
- Popov A.S. Fruit dogwood as a promising raw material for manufacture products of functional food. In: *Agrotechnological Processes in the Framework of Import Substitution: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; Michurinsk, October 25–27, 2016 (Agrotekhnologicheskiye protsessy v ramkakh importozameshcheniya: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii; Michurinsk, 25–27 oktyabrya 2016 g.)*. Michurinsk; 2016. p.271-275. [in Russian] (Попов А.С. Плоды кизила как перспективное сырье для производства продуктов функционального питания. В кн.: *Агротехнологические процессы в рамках импортозамещения: материалы Международной научно-практической конференции; Мичуринск, 25–27 октября 2016 г.* Мичуринск; 2016. С.271-275).
- Popov A.S., Zhidyokhina T.V. Adaptation and economic-biological features of introduced cornel varieties in the conditions of Central Russia. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2016;(1):28-32. [in Russian] (Попов А.С., Жидехина Т.В. Адаптационные и хозяйственно-биологические особенности интродуцированных сортов кизила в условиях средней полосы России. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2016;(1):28-32).
- Popov A.S., Zhidyokhina T.V. Bioactive compounds of male dogwood fruit (*Cornus mas* L.) under the conditions of the Central Black-Earth Region (Biologicheski aktivnye veshchestva plodov kizila muzhskogo (*Cornus mas* L.) v usloviyakh TsChR). *Novye i netraditsionnye rasteniya i perspektivy ikh ispolzovaniya = New and non-traditional plants and prospects for their use*. 2015;(11):264-267. [in Russian] (Попов А.С., Жидехина Т.В. Биологически активные вещества плодов кизила мужского (*Cornus mas* L.) в условиях ЦЧР. *Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования*. 2015;(11):264-267).
- Samsonova I.D. Early spring honey plants of the steppe zone (Rannevesenniye medonosy stepnoy zony). *Pchelovodstvo = Beekeeping*. 2005;(4):26-27. [in Russian] (Самсонова И.Д. Ранневесенние медоносы степной зоны. *Пчеловодство*. 2005;(4):26-27).
- Sorokopudov V.N., Rengarten G.A., Podkopaýlo R.V., Litvinova L.S., Shirina L.S., Sorokopudova O.A. et al. Non-traditional fruit of Russian culture: introduction, improvement, assortment. *Fundamental Research*. 2013;(11-1):115-121. [in Russian] (Сорокопудов В.Н., Ренгартен Г.А., Подкопайло Р.В., Литвинова Л.С., Ширина Л.С., Сорокопудова О.А. и др. Совершенствование сортифта нетрадиционных садовых культур России. *Фундаментальные исследования*. 2013;(11-1):115-121).
- Szczepaniak O.M., Kobus-Cisowska J., Kusek W., Przeor M. Functional properties of Cornelian cherry (*Cornus mas* L.): a comprehensive review. *European Food Research and Technology*. 2019;245(10):2071-2087. DOI: 10.1007/s00217-019-03313-0
- Szot I., Lipa T., Sosnowska B. Evaluation of yield and fruit quality of several ecotypes of Cornelian cherry (*Cornus mas* L.) in Polish conditions. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*. 2019;18(6):139-148. DOI: 10.24326/asphc.2019.6.14
- Yurina L.V. Garden novelties (Sadovye novinki). Moscow: Astrel; 2002. [in Russian] (Юрина Л.В. Садовые новинки. Москва: Астрель; 2002).

Информация об авторах

Ольга Юрьевна Емельянова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией, Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, 302530 Россия, Орловская обл., Орловский р-н, д. Жилина, dendrariy@orel.vniispk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8710-2135>

Михаил Флоридович Цой, кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научной работе, Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, 302530 Россия, Орловская обл., Орловский р-н, д. Жилина, nauka@vniispk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4692-632X>

Information about the authors

Olga Yu. Emelyanova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Head of a Laboratory, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Zhilina Village, Orlovsky District, Orel Province 302530, Russia, dendrariy@orel.vniispk.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8710-2135>

Mikhail F. Tsoy, Cand. Sci. (Agriculture), Deputy Director for Science, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Zhilina Village, Orlovsky District, Orel Province 302530, Russia, nauka@vniispk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4692-632X>

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 01.06.2022; одобрена после рецензирования 13.07.2022; принята к публикации 04.09.2023.
The article was submitted on 01.06.2022; approved after reviewing on 13.07.2022; accepted for publication on 04.09.2023.

Обзорная статья
УДК 581.134.4:633.11
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-221-232



Генетическое разнообразие мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по аллельному составу HMW-GS (обзор)

М. В. Чебатарева^{1,2}

¹ Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, Барнаул, Россия

² Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия

Автор, ответственный за переписку: Мария Васильевна Чебатарева, masha.vorotintseva@yandex.ru

Актуальность. В зависимости от сорта, почвенно-климатических и агротехнических условий возделывания, качественный состав зерна пшеницы различается. Аллельный состав глютеиновых сортов мягкой пшеницы – важный параметр при анализе и управлении генетической структурой. В связи с этим возникает интерес к изучению генетического разнообразия аллелей высокомолекулярных субъединиц глютеина (HMW-GS) у сортов мягкой пшеницы из Европы, Азии, Африки и Америки.

Материалы и методы. Общее разнообразие аллелей в глютеиновых локусах *Glu-1* оценивалось согласно расчету индекса Нея (N). На основе этого показателя и использования кластерного анализа осуществлялось распределение сортов пшеницы разного эколого-географического происхождения в относительно однородные группы.

Результаты. У сортов пшеницы из Польши, Германии, Франции, Испании, Португалии, Турции, Ирана, Пакистана, Индии, Китая и Алжира (I группа) индекс Нея в среднем составил 0,59, а у сортов из США, Мексики, Аргентины, России, Казахстана, Эфиопии, Чехии, Венгрии, Болгарии, Афганистана и Северной Кореи – 0,42 (II группа). Выделенные группы сортов пшеницы отличились по частоте встречаемости субъединиц глютеина по каждому локусу *Glu-1*: I группа – N, 7+9, 2+12; II группа – 2*, 7+9, 5+10.

Заключение. Сорта пшеницы из II группы в среднем имели низкий уровень изменчивости аллельных генов в соответствующих локусах. Это говорит о высоком качестве зерна у этих сортов и наибольшей вероятности их генетического обеднения в сравнении с сортами из I группы, где большая часть сортов описана комбинацией низкокачественных субъединиц глютеина.

Ключевые слова: генетическая эрозия, белок, глютеины, индекс Нея, качество зерна, частота аллелей

Благодарности: работа выполнена по теме «Использование молекулярно-генетических и биотехнологических методов исследований в селекции растений» (0534-2021-0003).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Чебатарева М.В. Генетическое разнообразие мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по аллельному составу HMW-GS (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):221-232. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-221-232

SURVEYS

Review article

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-221-232

Genetic diversity of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in the allelic composition of HMW-GS (a review)

Maria V. Chebatoreva^{1,2}¹ Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, Barnaul, Russia² Altai State University, Barnaul, Russia**Corresponding author:** Maria V. Chebatoreva, masha.vorotintseva@yandex.ru

Background. The qualitative composition of wheat grain varies depending on the cultivar, soil and climate conditions, and agricultural practices. The allelic composition of glutenins in bread wheat cultivars is an important parameter for the analysis and management of their genetic structure. In this respect, there is an interest in studying the genetic diversity of alleles of high-molecular-weight glutenin subunits (HMW-GS) in bread wheat cultivars from Europe, Asia, Africa, and America.

Materials and methods. The total diversity of alleles in *Glu-1* glutenin loci was evaluated according to the calculation of the Nei index (H). Using this indicator and the cluster analysis, wheat cultivars of various ecogeographic origin were distributed into relatively homogeneous groups.

Results. Wheat cultivars from Poland, Germany, France, Spain, Portugal, Turkey, Iran, Pakistan, India, China, and Algeria (Group I) had the average Nei index of 0.59, and those from the U.S., Mexico, Argentina, Russia, Kazakhstan, Ethiopia, Czech Republic, Hungary, Bulgaria, Afghanistan, and North Korea (Group II) had 0.42. These groups of wheat cultivars differed in the frequency of occurrence of glutenin subunits at each *Glu-1* locus: N, 7+9, 2+12 in Group I, and 2*, 7+9, 5+10 in Group II.

Conclusion. Wheat cultivars from Group II had on average a low level of variability of allelic genes in the respective loci, manifesting high grain quality of these cultivars and the highest probability of their genetic depletion compared to the cultivars from Group I, where most of the cultivars are described by a combination of low-quality glutenin subunits.

Keywords: genetic erosion, protein, gluten, Nei index, grain quality, frequency of alleles

Acknowledgements: this work was carried out on the topic “The use of molecular-genetic and biotechnological research methods in plant breeding” (0534-2021-0003).

The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Chebatoreva M.V. Genetic diversity of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) in the allelic composition of HMW-GS (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):221-232. DOI:10.30901/2227-8834-2023-3-221-232

Введение

Пшеница занимает особое место в питании человека среди других зерновых культур. Способность пшеницы синтезировать в зерне клейковинные белки имеет большое значение для выпечки белого хлеба (Fetyukhin, Varanov, 2019).

Хлебопекарные свойства зерна пшеницы напрямую зависят от реологических свойств клейковины. Основную массу белков клейковины составляют глиадин и глютеин; первый делает ее растяжимой и эластичной, а второй – прочной (Rybalka, 2011). Состояние клейковины определяется главным образом составом субъединиц высокомолекулярных глютеинов (HMW-GS) – запасных белков эндосперма пшеницы. Гены, ответственные за биосинтез HMW-GS, кодируются локусами *Glu-A1*, *Glu-B1* и *Glu-D1*, локализованными на длинных плечах хромосом 1A, 1B и 1D соответственно (Gianibelli et al., 2001). Благодаря масштабному изучению генетических закономерностей накопления глютеинов в культуре пшеницы, общеизвестен ряд белковых маркеров, вносящих большой вклад в качество зерна (Shewry et al., 1992).

Вслед за улучшением качественных показателей зерна, характеризующих его технологические свойства, возникла проблема снижения уровня аллельного полиморфизма генов у мягкой пшеницы в сравнении с ее предковыми видами (Plotnikova, 2014). Сохранение генетического разнообразия вида *Triticum aestivum* L. является одной из ключевых проблем XXI века (Pisarev, 1964).

До начала XX века большая часть сортов пшеницы характеризовалась генетической гетерогенностью и неоднородностью, что обеспечивало их устойчивость к биотическим и абиотическим факторам (Jaradat, 2017). Основным техническим достижением «зеленой революции» стало производство новых сортов пшеницы. Прямой отбор высокоурожайных фенотипов с наилучшими показателями качества зерна отодвинул выращивание стародавних сортов пшеницы на задний план, сократил генетическое разнообразие аллелей глютеина, снизил полиморфизм локусов *Glu-1*. Согласно статистическим данным, около 80% аллельной изменчивости в генах, кодирующих глютеины, уже утрачено у сортов твердой пшеницы (Janni et al., 2018). Для описания последствий этой деятельности человека в начале 1970-х годов был предложен термин «генетическая эрозия» (Day, 1973).

Опасность генетической эрозии заключается в том, что при резком изменении климата есть вероятность того, что ни один из современных сортов пшеницы не приспособится к новым условиям (Govindaraj et al., 2015). Распределение аллелей локусов *Glu-1* значительно зависит от условий выращивания (влаго- и теплообеспеченности) в регионе происхождения. Установлено, что засухоустойчивость у яровой пшеницы связана с аллелем *Glu-D1a*, тогда как аллель *Glu-D1d* характерен для пшеницы, адаптированной к влажным условиям. Хорошо известно, что пшеница с наличием высококачественной субъединицы глютеина 5+10 более предпочтительна при отборе на признак качества зерна, чем пшеница с субъединицей 2+12. Однако аллель *Glu-D1a* не всегда связан с пониженным хлебопекарным качеством муки, что, вероятно, объясняется присутствием у таких сортов еще плохо изученных высококачественных субъединиц глютеина (Utebayev et al., 2021). Следовательно, в селекции пшеницы необходимо учитывать тот факт, что отбор сортов только по какой-то одной «наилучшей» субъединице глютеина может оказывать

влияние на проявление тех признаков, по которым отбор не ведется.

Повысить уровень полиморфизма хозяйственно ценных признаков у мягкой пшеницы в сравнении с дикими видами возможно с помощью отдаленной гибридизации (Obukhova et al., 2010). Известно, что при создании мягкой пшеницы природа использовала генетический потенциал родов *Triticum* L. и *Aegilops* L., не заботясь о подборе качественных исходных форм. Следствием «эффекта родоначальника» явилось «не включение» значительного полиморфизма видов-сородичей в геном возделываемых полиплоидных видов пшеницы (Avdeev, 2018). Генетическое изучение этих видов позволит совершить целенаправленный ресинтез мягкой пшеницы с целью улучшения ее «генетического содержания» за счет ранее не задействованных геномов из рода *Aegilops* (Goncharov et al., 2008). Кроме того, в настоящее время источниками полезных признаков для пшеницы является не только род *Aegilops*, но и виды родов *Agropyron*, *Secale*, *Elymus* и др. (Goncharov N.P., Goncharov P.L., 2009; Pototskaya, Shamanin, 2015). Таким образом, дикие родичи пшеницы представляют собой ценные ресурсы для поиска генетических вариаций, обладающих не только повышенной адаптивностью, но и качественными аллелями глютеинов. Это помогло бы расширить генофонд современных сортов, добавив недостаточно эксплуатируемое разнообразие в программы селекции пшеницы (López-Fernández et al., 2021).

Целью нашей работы является изучение генетической изменчивости сортов мягкой пшеницы из Европы, Азии, Африки и Америки (на примере динамики частот аллелей локусов HMW-GS).

Материалы и методы

Материалом исследования являлись ранее изученные по HMW-GS коллекции местных и современных сортов мягкой пшеницы из Европы (Болгария – 89, Венгрия – 107, Испания – 189, Португалия – 52, Германия – 18, Чехия – 15, Россия – 31, Польша – 28, Франция – 200 сортов), Азии (Индия – 240, Китай – 240, Казахстан – 122, Северная Корея – 292, Турция – 35, Пакистан – 32, Иран – 95, Афганистан – 410 сортов), Африки (Алжир – 71, Лесото – 30, Эфиопия – 30 сортов) и Америки (Аргентина – 119, США – 111, Мексика – 142 сорта), результаты которых представлены в 21 источнике литературы и взяты для оценки генетического разнообразия сортов по запасным белкам.

Генетическое разнообразие генов пшеницы по трем локусам *Glu-1* (*Glu-A1*, *Glu-B1* и *Glu-D1*) определяли при помощи индекса Нея (H) согласно формуле $H = 1 - \sum p_i^2$, где H – индекс генетического разнообразия Нея (на локус) и p_i – частота аллеля в том или ином локусе (Nei, 1973). Заимствование значений p_i из различных источников литературы позволило рассчитать показатель H.

С целью группировки сортов пшеницы различного происхождения в относительно однородные группы использовался кластерный анализ. Мерой дистанции служили Евклидовы расстояния, способом кластеризации явился метод Ward в программе STATISTICA.

Результаты

Генетическое разнообразие генотипов по запасным белкам пшеницы. На основе средних показателей индекса H, рассчитанных для каждого локуса *Glu-1* и представленных в таблице 1, проведен кластерный анализ пшеницы из 23 стран мира по этим значениям.

Таблица 1. Показатели индекса Нея у генотипов мягкой пшеницы из разных стран мира по трем локусам *Glu-1*
Table 1. Values of the Nei index in bread wheat genotypes from different countries according to three *Glu-1* loci

Страна	Средние значения Н			Источник
	<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>	
Турция	0,44	0,68	0,44	Nehe et al., 2019
Китай	0,51	0,65	0,45	Gao et al., 2020
Франция	0,47	0,76	0,59	Branlard et al., 2003
Индия	0,54	0,73	0,44	Ram et al., 2015
Польша	0,53	0,78	0,5	Filip, 2018
Алжир	0,55	0,66	0,55	Bellil et al., 2014
Лесото	0,62	0,64	0,52	Morojele, Labuschagne, 2010
Иран	0,62	0,67	0,53	Shahnejat-Bushehri et al., 2006
Пакистан	0,63	0,66	0,42	Terasawa et al., 2008
Португалия	0,66	0,72	0,51	Ribeiro et al., 2011
Испания	0,64	0,73	0,49	López-Fernández et al., 2021
Германия	0,39	0,64	0,9	Hložáková et al., 2021
Болгария	0,65	0,53	0,44	Atanasova et al., 2012
Венгрия	0,47	0,44	0,39	Baracskaei et al., 2011
Россия	0,35	0,29	0,42	Utebayev et al., 2021
Чехия	0,23	0,56	0,12	Hložáková et al., 2021
Афганистан	0,41	0,23	0,27	Terasawa et al., 2008
Казахстан	0,5	0,27	0,53	Utebayev et al., 2019
Северная Корея	0,29	0,48	0,52	Lee et al., 2018
Эфиопия	0,4	0,63	0,34	Dessalegn et al., 2011
Аргентина	0,48	0,73	0,11	Lerner et al., 2009
Мексика	0,51	0,71	0,28	Liang et al., 2010
США	0,38	0,66	0,33	Shan et al., 2007

Результатом применения кластерного анализа стало выделение в два кластера (группы) сортов мягкой пшеницы соответствующего эколого-географического происхождения. В кластер I, как видно из рисунка 1, вошли генотипы пшеницы из Турции, Китая, Франции, Индии, Польши, Алжира, Лесото, Пакистана, Португалии, Испании и Германии. Соответственно, II кластер включал сорта пшеницы из Мексики, Аргентины, США, Эфиопии, Чехии, Казахстана, Афганистана, России, Северной Кореи, Венгрии и Болгарии.

Обе группы сортов пшеницы более наглядно продемонстрированы на рисунке 2 в двух цветовых гаммах. Из данного рисунка видно, что I группа сортов пшеницы, в отличие от II группы, распространена в странах, расположенных ближе друг к другу.

Сорта пшеницы, входящие в I группу ($H = 0,59$), в среднем несут более высокую степень изменчивости аллелей глютенинов по сравнению со II группой ($H = 0,42$). В I группу входят генотипы мягкой пшеницы с наибольшей частотой встречаемости субъединиц глютенина

на по локусам *Glu-1*; особенно это хорошо видно на графиках рисунка 3. По локусу *Glu-A1* субъединицы 1 (30%), 2* (33%) и N (37%) отличаются высокой частотой встречаемости среди сортов с относительно равномерным распределением их внутри данной группы. Локусы *Glu-B1* и *Glu-D1* несут бимодальное распределение аллелей, то есть с большей вероятностью можно встретить субъединицы 7+8 (28%), 7+9 (34%) и 5+10 (40%), 2+12 (46%).

Низкая изменчивость аллельных генов, входящих во II группу сортов пшеницы, отмечена по всем трем локусам *Glu-1*. Биотипы этих сортов характеризуются унимодальным распределением аллелей с большей долей встречаемости сортов с субъединицами 2* (51%) локуса *Glu-A1*, 7+9 (45%) локуса *Glu-B1* и 5+10 (62%) локуса *Glu-D1*. Таким образом, в I группе пшениц вероятность встречаемости «хороших» и «плохих» субъединиц находится в равной доле в сравнении со II группой, где больший процент частоты приходится только на высококачественные субъединицы глютенина.

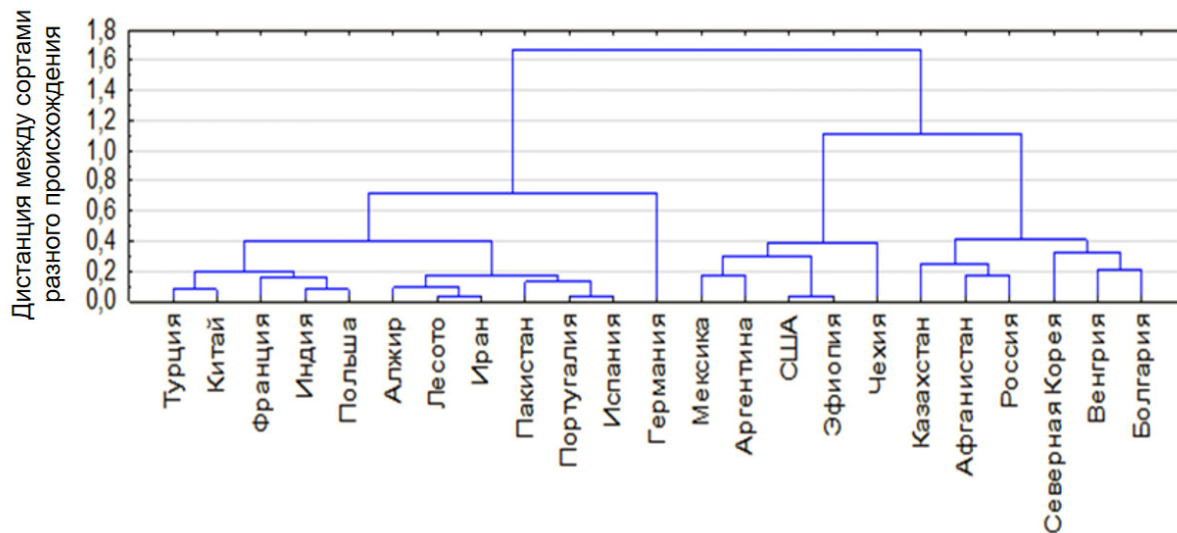


Рис. 1. Кластеризация сортов мягкой пшеницы из разных стран мира по значениям индекса генетического разнообразия Нея, оценивающего изменчивость глутенинов

Fig. 1. Clustering of bread wheat cultivars from different countries according to the values of the Nei gene diversity index which assesses the variability of glutenins

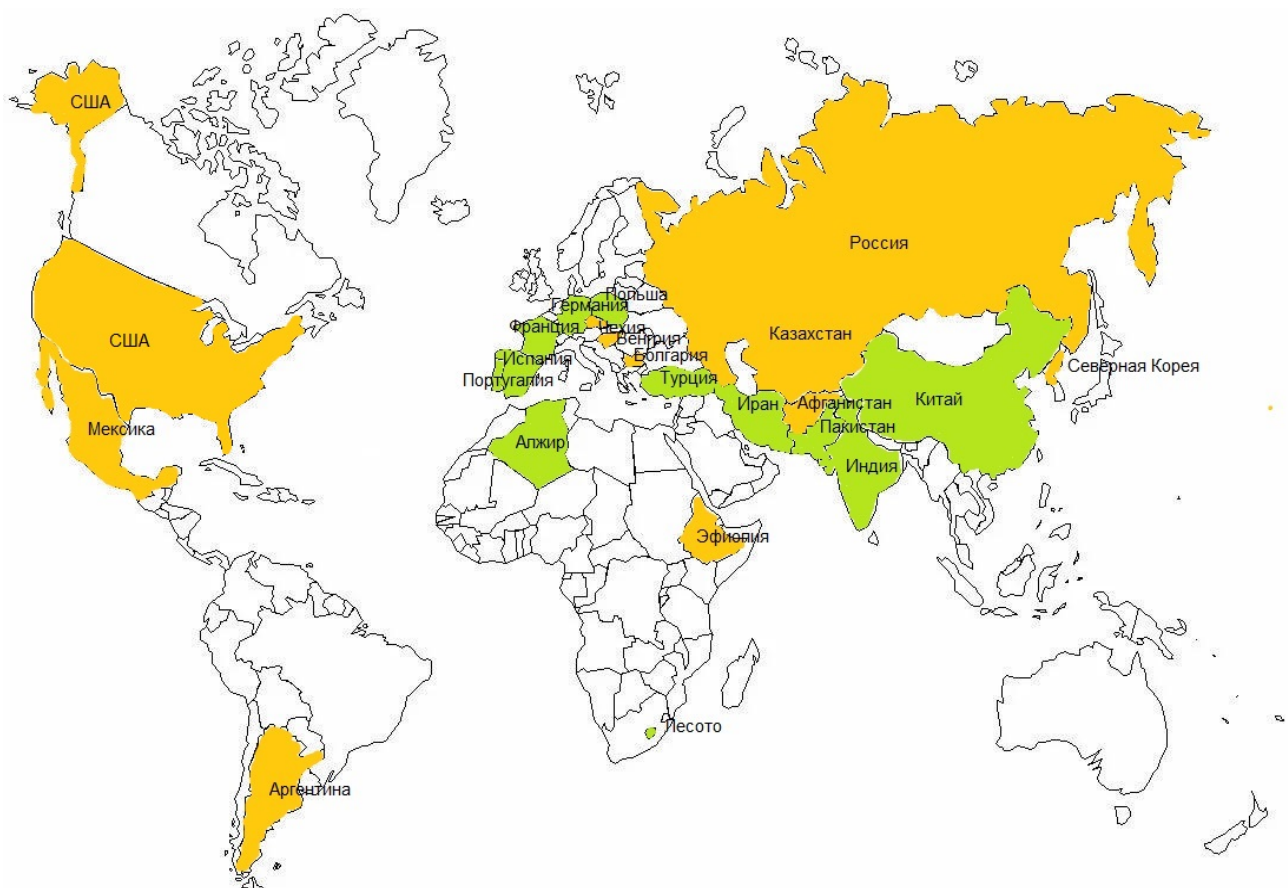


Рис. 2. Распространенность пшеницы с разными индексами Нея (I группа – зеленый цвет; II группа – желтый цвет)

Fig. 2. Distribution of wheat with different Nei indices (Group I – green; Group II – yellow)

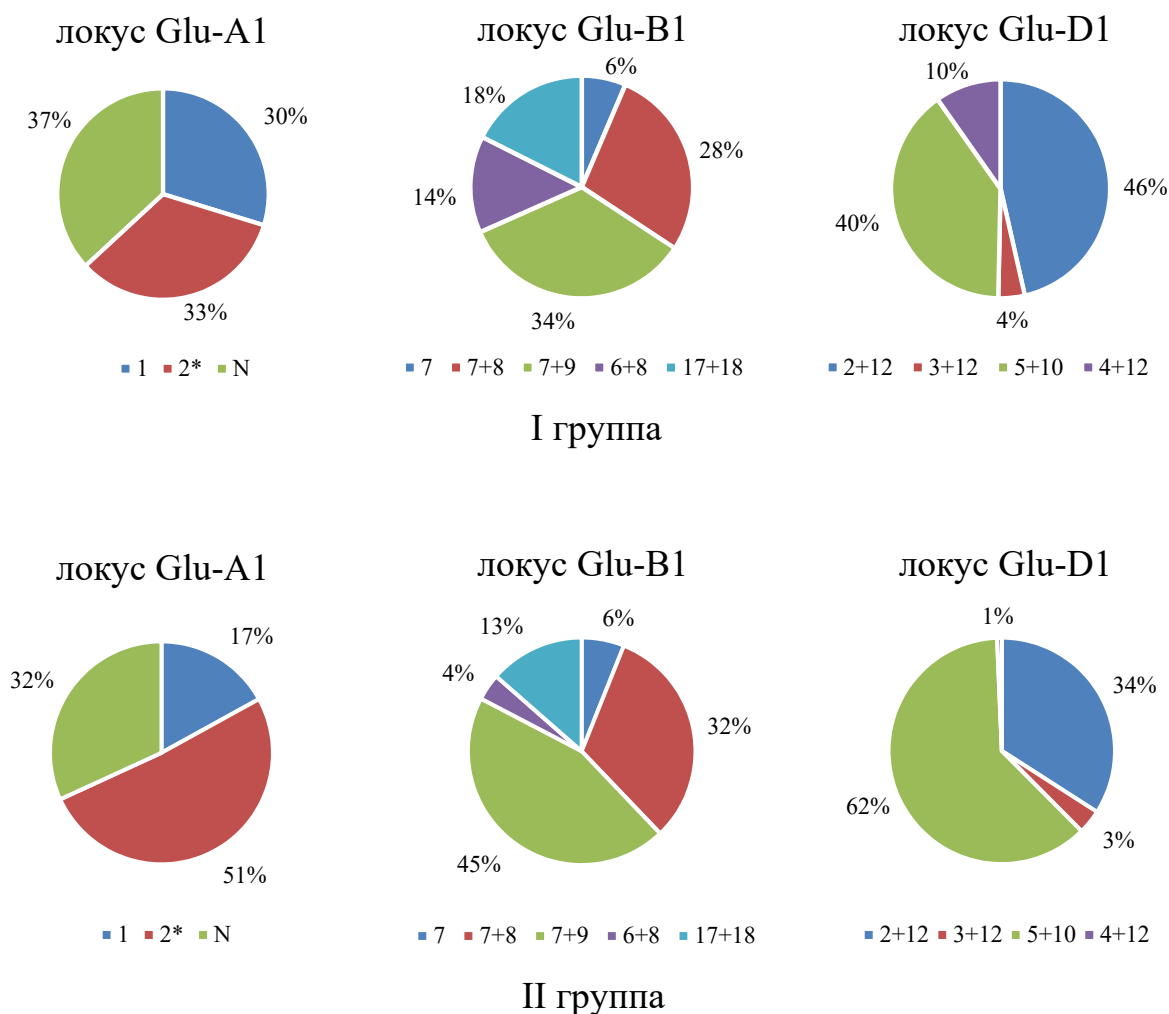


Рис. 3. Частота встречаемости широко распространенных субъединиц глютеина по локусам *Glu-1*
Fig. 3. Frequency of occurrence of widespread glutenin subunits at *Glu-1* loci

В обеих группах пшениц наблюдается высокий полиморфизм локуса *Glu-B1* в сравнении с остальными локусами: I группа – *Glu-B1* ($H = 0,69$) > *Glu-A1* ($H = 0,55$) > *Glu-D1* ($H = 0,53$); II группа – *Glu-B1* ($H = 0,50$) > *Glu-A1* ($H = 0,42$) > *Glu-D1* ($H = 0,34$).

Количественный состав глютеинов. Обе группы сортов пшеницы не особо отличались по количеству редких и широко распространенных аллелей в локусах *Glu-1* (табл. 2). Больше всего редких субъединиц содержали сорта испанской пшеницы (17) из I группы и сорта корейской пшеницы (8) из II группы. Полный набор хорошо известных субъединиц глютеина идентифицирован в сортах из Португалии (I группа) и Северной Кореи (II группа). Более широкий диапазон всех аллельных вариантов установлен в сортах из Испании и Северной Кореи со средними значениями равными 7 и 5 соответственно.

Качественный состав глютеинов. Исходя из средних значений частот встречаемости субъединиц по всем трем локусам *Glu-1*, в I группе сортов пшеницы велика доля встречаемости генотипов с аллелями N (39,6%), 7+9 (32,7%), 2+12 (48,5%), во II группе сортов пшеницы – с аллелями 2* (54,5%), 7+9 (46,8%), 5+10 (60,4%) (см. табл. 2).

Поскольку наибольшее влияние на хлебопекарные качества зерна пшеницы оказывает состав HMW-GS, в работе была использована балльная оценка хлебопекарных качеств, определяемых аллелями *Glu-1*. Чем выше балл имеет тот или иной аллель, тем существеннее влияние этого аллеля на хлебопекарные качества (табл. 3). Поэтому, согласно шкале Рауне, максимальная сумма баллов и, соответственно, лучшее хлебопекарное качество отмечено во II группе 2*, 7+9, 5+10 = 36+26+46 = 96) в сравнении с I группой (N, 7+9, 2+12 = 16+26+26 = 56) (Payne et al., 1987).

Генетическое сходство сортов из разных стран, как правило, зависит от набора сортов-доноров, используемых в селекционных программах. Вероятно, именно этой причиной в последние десятилетия обусловлено сокращение генетической дистанции между современными сортами пшеницы различного происхождения (Novoselskaya-Dragovich et al., 2010). Возможность связать аллельный состав HMW-GS с географическим происхождением сортов твердой пшеницы описана Janni с коллегами (Janni et al., 2018), что и легло в основу нашей статьи. Исходя из расчета индекса Нея (Н), можно предположить, что путем более широкого использования однотипного набора сортов-доноров при скрещиваниях в странах США, Мексики, Аргентины, России, Казахстана, Эфиопии, Чехии, Венгрии, Болгарии, Афганистана и Северной Ко-

Таблица 2. Краткая характеристика количественного состава HMW-GS и их частот (%) у мягкой пшеницы
 Table 2. Brief description of the quantitative composition of HMW-GS and their frequencies (%) in bread wheat

Страна	Количество аллелей						Частота встречаемости HMW-GS, %										Источник					
	редких			хорошо изученных			Локус <i>Glu-A1</i>					Локус <i>Glu-B1</i>						Локус <i>Glu-D1</i>				
	<i>A1</i>	<i>B1</i>	<i>D1</i>	<i>D1</i>	<i>B1</i>	<i>A1</i>	Сумма	1	2*	И	7	7+8	7+9	6+8	17+18	2+12		3+12	5+10	4+12		
Среднее число																						
I группа																						
Турция	-	-	-	2	3	2	5	3	33,0	67,0	-	-	18,0	45,0	-	30,0	33,0	-	67,0	-	Nehe et al., 2019	
Китай	-	3	1	4	3	5	11	4	39,2	2,9	57,9	1,7	31,3	48,8	2,5	0,8	66,3	-	32,9	0,4	Gao et al., 2020	
Франция	-	3	2	5	2	5	10	4	15,0	15,5	69,5	20,5	30,5	19,0	24,5	4,0	53,0	5,0	34,5	-	Branlard et al., 2003	
Индия	-	1	-	1	3	4	2	9	22,1	61,7	16,2	2,9	28,3	26,3	-	35,0	67,5	-	32,5	-	Ram et al., 2015	
Польша	-	2	-	2	3	4	2	9	46,4	3,6	50,0	7,1	10,7	39,3	10,7	-	53,6	-	46,4	-	Filip, 2018	
Алжир	-	2	2	4	3	4	3	10	38,0	54,9	7,0	2,8	14,1	40,8	-	39,0	38,0	2,8	54,9	-	Bellil et al., 2014	
Лесото	-	1	1	2	3	4	2	9	36,6	16,6	46,6	6,6	13,3	53,3	-	23,3	33,3	-	60,0	-	Morojele, Labuschagne, 2010	
Иран	-	4	3	7	3	5	3	11	15,8	37,7	46,4	8,8	51,8	12,2	0,8	18,4	61,4	0,8	30,7	-	Shahnejat-Bushehri et al., 2006	
Пакистан	-	3	1	4	3	3	2	8	25,0	50,0	25,0	-	50,0	9,4	-	3,1	75,0	-	-	9,4	Terasawa et al., 2008	
Португалия	-	2	-	2	3	5	4	12	36,5	30,8	32,7	1,9	40,4	26,9	5,8	19,2	17,3	7,7	67,3	7,7	Ribeiro et al., 2011	
Испания	2	11	4	17	3	3	3	9	16,4	53,4	11,6	3,2	-	-	5,8	1,6	67,2	-	4,2	23,3	López-Fernández et al., 2021	
Германия	-	-	-	-	2	4	2	8	27,8	-	72,9	-	5,6	38,9	44,4	11,1	16,7	-	27,8	-	Hložáková et al., 2021	
Среднее значение	2	3	2	5	3	4	4	9	29,3	35,8	39,6	6,2	26,7	32,7	13,5	16,9	48,5	4,1	41,7	10,2		

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Страна	Количество аллелей						Частота встречаемости HMW-GS, %										Источник					
	редких			хорошо изученных			Локус <i>Glu-A1</i>					Локус <i>Glu-B1</i>						Локус <i>Glu-D1</i>				
	A1	B1	D1	Сумма	A1	B1	D1	Сумма	1	2*	N	7	7+8	7+9	6+8	17+18		2+12	3+12	5+10	4+12	
Среднее число																						
П группа																						
Болгария	-	-	-	-	3	3	2	8	4	24,6	41,5	33,8	-	17,7	65,4	10,4	-	27,7	-	69,2	-	Atanasova et al., 2012.
Венгрия	-	4	-	4	3	2	7	7	4	23,9	68,4	7,7	-	-	72,1	1,8	-	26,7	-	73,3	-	Baracskaï et al., 2011
Россия	-	-	-	-	2	3	2	7	4	-	77,4	22,6	12,3	4,2	83,2	-	-	30,6	-	69,4	-	Utebayev et al., 2021
Чехия	-	-	-	-	2	3	2	7	4	13,3	-	86,7	-	46,7	46,7	6,7	-	6,7	-	93,3	-	Hložáková et al., 2021
Афганистан	-	2	4	6	3	4	2	9	4	8,5	16,8	74,6	-	87,3	3,2	2,4	1,2	84,9	-	2,7	-	Terasawa et al., 2008
Казахстан	-	3	1	4	3	3	3	9	4	0,4	56,1	43,4	3,8	6,0	84,9	-	-	50,6	-	46,9	1,0	Utebayev et al., 2019
Северная Корея	1	4	3	8	3	5	4	12	5	5,3	10,3	83,3	0,3	69,0	3,7	0,7	1,0	59,7	1,0	1,7	0,3	Lee et al., 2018
Эфиопия	-	1	1	2	3	5	3	11	4	21,0	71,0	8,0	6,0	38,0	27,0	4,0	21,0	46,0	2,0	50,0	-	Dessalegn et al., 2011
Аргентина	-	2	-	2	3	4	2	9	4	33,6	63,9	2,5	-	16,0	41,2	1,7	15,1	5,9	-	94,1	-	Lerner et al., 2009
Мексика	-	1	-	1	3	4	2	9	3	28,9	63,4	7,7	9,2	14,0	39,4	-	32,4	16,3	-	83,1	-	Liang et al., 2010
США	-	-	1	1	3	2	3	8	3	21,2	76,1	2,7	-	33,3	47,7	-	-	11,3	7,2	80,6	-	Shan et al., 2007
Среднее значение	1	2	2	4	3	3	2	9	4	18,1	54,5	33,9	6,3	33,2	46,8	4,0	14,1	33,3	3,4	60,4	0,7	

Таблица 3. Хлебопекарная оценка пшеницы по HMW-GS
Table 3. Breadmaking evaluation of wheat according to HMW-GS

Локус	Балл			
	1	2	3	4
<i>Glu-A1</i>	N (c)	-	1 (a), 2*(b)	-
<i>Glu-B1</i>	7 (a), 6+8 (d),	7+9 (c)	17+18 (i), 7+8 (b)	-
<i>Glu-D1</i>	4+12 (c)	2+12 (a), 3+12 (b)	-	5+10 (d)

реи отмечено более низкое генетическое разнообразие глютенинов у сортов ($H = 0,42$) в сравнении с пшеницей из другой группы стран ($H = 0,59$). В связи с этим более высокое генетическое разнообразие сортов пшеницы по HMW-GS снижает риски возникновения эрозии в таких странах, как Польша, Германия, Франция, Испания, Португалия, Турция, Иран, Пакистан, Индия, Китай, Алжир и Лесото.

Нами показана связь между генетическим разнообразием генотипов по запасным белкам пшеницы, глютенинам и качеством зерна: чем выше качество, тем ниже генетическое разнообразие сортов (Novoselskaya-Drăgovič et al., 2010). Установлено, что сорта мягкой пшеницы, отличающиеся более высокой степенью гетерозиготности, имеют более высокий процент встречаемости в популяциях как «плохих», так и «хороших» субъединиц глютенина, тогда как пшеница, характеризующаяся большей степенью гомозиготности, состоит преимущественно из генотипов с наилучшим по качественному признаку составом аллелей – 2*, 7+9, 5+10.

На сегодняшний день во многих странах мира существует проблема снижения генетического разнообразия у коммерческих сортов пшеницы в сравнении со стародавними сортами. Особенно остро проблема стоит в тех странах, где отбор сортов пшеницы ведется в основном по хорошо изученным высококачественным субъединицам глютенина (Terasawa et al., 2008; Ribeiro et al., 2011; Bellil et al., 2014). В Китае, например, у сортов пшеницы с низким качеством зерна отмечено более высокое разнообразие генов в сравнении со стародавними сортами (Zhang et al., 2002). Использование иностранных сортов пшеницы в скрещиваниях является одним из путей решения возникшей проблемы, что в значительной степени могло бы повлиять на индекс генетической дисперсии. Однако, как показывает практика, за счет широкого использования зарубежного материала в отечественных селекционных программах было «выброшено» около 60 местных сортов, среди которых были и российские (Dobrotvorskaya et al., 2004).

Данная работа является не единственной, где наибольшая изменчивость глютенинов у пшеницы отмечена в локусе *Glu-B1* в сравнении с локусами *Glu-A1* и *Glu-D1* (Atanasova et al., 2012). Низкая степень изменчивости для локуса *Glu-D1* в пшеничной культуре, как правило, обусловлена подавляющим присутствием в генотипах высококачественных субъединиц 5+10, тогда как промежуточная изменчивость для *Glu-A1* связана с сохранением в сортах двух аллелей, кодирующих субъединицы 1 и 2*. Варибельность аллелей в локусе *Glu-B1* выше, поскольку несколько аллелей этого локуса связаны с высоким качеством зерна за счет субъединиц 7+8, 7+8*, 7+9, 17+18 (Lerner et al., 2009). По всем хромосомам отмечены стандартно высококачественные и низкокачественные субъединицы глютенина: по 1А хромосоме – субъединицы 1,

2*, N; по 1В хромосоме – субъединицы 7, 7+8, 7+9, 6+8, 17+18; по 1D хромосоме – субъединицы 2+12, 3+12, 5+10, 4+12. Достаточно редкие в генофонде пшеницы – субъединицы 20, 13+16, 13+19, 32+33, 14+15, 7*+9, 7*+8, 70e+8, 22, 8, 18, 18* локуса *Glu-B1* и субъединицы 10, 11, 2+11, 2+10, 2+12*, 2.2+12, 12, N, 5+12, 2+10/, 2***+12/, 3+10, 1.5+10.5 локуса *Glu-D1*.

Большой полиморфизм аллелей HMW-GS отмечен в локусах дикой пшеницы, меньший – в широко культивируемой. Это обусловлено наличием в генотипах пшеницы специфических молчащих генов, локализованных в длинном плече хромосом 1А. Было показано, что гены локуса *Glu-A^m1* пшеницы вида *T. monococcum* L. экспрессируют субъединицы как х-, так и у-типа, тогда как у мягкой пшеницы изменчивость локуса *Glu-A1* ниже: активны только гены х-типа (Obrecht et al., 2003). Согласно некоторым исследованиям, больший негативный эффект на качество клейковины оказывает аллель с наличием только одной субъединицы х-типа, в сравнении с сочетанием такой субъединицы с какой-либо другой субъединицей у-типа. Примером выступает субъединица 7 локуса *Glu-B1* и субъединицы 7+8, 7+9. Отрицательное влияние на хлебопекарное качество отмечено, соответственно, и в генотипах с субъединицами 20 и 22 того же локуса (Filip, 2018).

Исследования показывают, что высокая вариация частот аллелей присутствует преимущественно у диплоидной пшеницы (*T. urartu* Thum. ex Gandiljan, *T. monococcum*) (Li et al., 2009). По сравнению с мягкой пшеницей *Aegilops tauschii* Coss. характеризуется значительно большим разнообразием HMW-GS в *Glu-D1*-локусах (Chen et al., 2012). Высокая степень родства хромосом мягкой пшеницы с *Ae. tauschii* позволяет получать от синтетического гексаплоида новые аллельные вариации глютениновых генов (например, субъединица 5+12), присутствующих в чужеродных локусах *Glu-D¹1* (Hsam et al., 2001; Rasheed et al., 2012; Laikova et al., 2013). Таким образом, хлебопекарное качество *Triticum aestivum* может быть улучшено за счет включения новых аллелей глютенина от диких родичей. В целом, влияние редких субъединиц на качество пшеницы в полной мере остается неизученным (Nakamura, 1999). Имеются только некоторые сведения положительного (субъединица 13+16, 5+12) и отрицательного (субъединицы 2.2+12 и 20) влияния редких аллелей глютенинов на качество зерна пшеницы (Hsam et al., 2001; Takata et al., 2003; Ram, 2003). Неопровержимым остается тот факт, что сорта пшеницы с наличием аллелей HMW-GS – *Glu-A1-2**, *Glu-B1(17+18)* и *Glu-D1(5+10)* – служат лучшими маркерами в селекционных программах, целью которых является улучшение качества зерна пшеницы (Aktaş, Baloch, 2017).

Таким образом, проведение мониторинга аллелей в локусах глютенинов имеет большое значение в управ-

лении генетической структурой для определения аллельного состава, свойственного местным сортам пшеницы, адаптированным к условиям окружающей среды, и возможности их использования в дальнейшей селекционной работе для этой зоны.

Заключение

На основе анализа соответствующих нашей тематике источников литературы были сделаны следующие выводы:

1. Больше разнообразие сортов пшеницы по HMW-GS было отмечено в Польше, Германии, Франции, Испании, Португалии, Турции, Иране, Пакистане, Индии, Китае, Алжире и Лесото (I группа) в сравнении с сортами из России, Казахстана, Эфиопии, Чехии, Венгрии, Болгарии, Афганистана, Северной Кореи, США, Мексики, Аргентины (II группа) при индексе Нея, равном соответственно 0,59 и 0,42.

2. В I группе сортов пшеницы высока доля встречаемости и высококачественных, и низкокачественных субъединиц глютеина – 1 (30%), 2* (33%), N (37%), 7+8 (28%), 7+9 (34%), 5+10 (40%), 2+12 (46%), тогда как во II группе сортов отмечен больший процент встречаемости высококачественных субъединиц – 2* (51%), 7+9 (45%), 5+10 (62%).

3. Согласно балльной оценке хлебопекарного качества пшеницы, максимальная сумма баллов отмечена во II группе (2*, 7+9, 5+10 = 36+26+46 = 96) в сравнении с I группой (N, 7+9, 2+12 = 16+26+26 = 56).

4. По количеству редко встречаемых HMW-GS различия в выделенных группах сортов пшеницы не установлены.

5. В обеих группах изменчивость аллельных генов в локусах *Glu-B1* выше, чем в локусах *Glu-A1* и *Glu-D1*: I группа – *Glu-B1* (H = 0,69) > *Glu-A1* (H = 0,55) > *Glu-D1* (H = 0,53); II группа – *Glu-B1* (H = 0,50) > *Glu-A1* (H = 0,42) > *Glu-D1* (H = 0,34).

References / Литература

Aktaş H., Baloch F.S. Allelic variations of glutenin subunits and their association with quality traits in bread wheat genotypes. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2017;41(2):127-134. DOI: 10.3906/tar-1701-22

Atanasova D., Tsenov N., Todorov I. A brief review of a nearly half a century wheat quality breeding in Bulgaria. In: M. Çalıřkan (ed.). *Genetic Diversity in Plants. Book 3. Chapter 21*. Rijeka: IntechOpen; 2012. p.413-432. DOI: 10.5772/34574

Avdeev V.I. To the problem of the *Triticum* L. wheat varieties origin. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2018;2(70):53-56. [in Russian] [Авдеев В.И. К проблеме происхождения видов пшеницы (*Triticum* L.). *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018;2(70):53-56].

Baracskaı I., Balázs G., Liu L., Ma W., Oszvald M., Newberry M. et al. A retrospective analysis of HMW and LMW glutenin alleles of cultivars bred in Martonvásár. *Cereal Research Communications*. 2011;39(2):225-236. DOI: 10.1556/crc.39.2011.2.6

Bellil I., Hamdi O., Khelifi D. Allelic variation in *Glu-1* and *Glu-3* loci of bread wheat (*Triticum aestivum* ssp. *Aestivum* L. em. Thell.) germplasm cultivated in Algeria. *Cereal Research Communications*. 2014;42(4):648-657. DOI: 10.1556/crc.2014.0004

Branlard G., Dardevet M., Amiour N., Igrejas G. Allelic diversity of HMW and LMW glutenin subunits and omega-gliadins in French bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2003;50(7):669-679. DOI: 10.1023/A:1025077005401

Chen W.J., Fan X., Zhang B., Liu B., Yan Z., Zhang L.Q. et al. Novel and ancient HMW glutenin genes from *Aegilops tauschii* and their phylogenetic positions. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2012;59(8):1649-1657. DOI: 10.1007/s10722-011-9788-0

Day P.R. Genetic variability of crops. *Annual Review of Phytopathology*. 1973;11(1):293-312. DOI: 10.1146/annurev.py.11.090173.001453

Dessalegn T., Van Deventer C.S., Labuschagne M.T., Martens H. Allelic variation of HMW glutenin subunits of Ethiopian bread wheat cultivars and their quality. *African Crop Science Journal*. 2011;19(2):55-63. DOI: 10.4314/acscj.v19i2.69855

Dobrotvorskaya T.V., Martynov S.P., Pukhalskiy V.A. Trends in genetic diversity change of spring bread wheat cultivars released in Russia in 1929–2003. *Russian Journal of Genetics*. 2004;40(11):1245-1257. DOI: 10.1023/B:RUGE.0000048667.39464.54

Fetyukhin I.V., Baranov A.A. Integrated protection of winter wheat from weeds. *Grain Economy of Russia*. 2019;1(61):6-9. [in Russian] [Фетюхин И.В. Баранов А.А. Интегрированная защита озимой пшеницы от сорняков. *Зерновое хозяйство России*. 2019;1(61):6-9]. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-61-1-6-9

Filip E. Composition of high molecular weight glutenin subunits in Polish common wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Food Quality*. 2018;2018:2473420. DOI: 10.1155/2018/2473420

Gao S., Sun G., Liu W., Sun D., Peng Y., Ren X. High-molecular-weight glutenin subunit compositions in current Chinese commercial wheat cultivars and the implication on Chinese wheat breeding for quality. *Cereal Chemistry*. 2020;97(4):762-771. DOI: 10.1002/cche.10290

Gianibelli M.C., Larroque O., MacRitchie F., Wrigley C.W. Biochemical, genetic, and molecular characterization of wheat endosperm proteins. *Cereal Chemistry*. 2001;78(6):635-646. DOI: 10.1094/CCHEM.2001.78.6.635

Goncharov N.P., Goncharov P.L. Methodical bases of plant breeding. V.K. Shumny (ed.). 2nd ed. Novosibirsk: Geo; 2009. [in Russian] [Гончаров Н.П., Гончаров П.Л. Методические основы селекции растений / под ред. В.К. Шумного. 2-е изд. Новосибирск: Гео; 2009].

Goncharov N.P., Kondratenko E.Ya., Kononov A.A. Expansion of the genetic diversity in cultivated wheat species is the basis of future breeding achievements (Rasshireniye geneticheskogo raznoobraziya vozdeliyvayemykh vidov pshenitsy – osnova uspekhnv selektsii budushchego). *Plant Genetic Resources*. 2008;(6):15-19. [in Russian] [Гончаров Н.П., Кондратенко Е.Я., Коновалов А.А. Расширение генетического разнообразия возделываемых видов пшеницы – основа успехов селекции будущего. *Генетични ресурси рослин*. 2008;(6):15-19].

Govindaraj M., Vetriventhan M., Srinivasan M. Importance of genetic diversity assessment in crop plants and its recent advances: an overview of its analytical perspectives. *Genetics Research International*. 2015:2015:431487. DOI: 10.1155/2015/431487

Hložáková T.K., Gregová E., Galová Z. Genetic diversity of *glu-1* in European wheat genetic resources and varieties. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2021;04(02):23-25.

- Hsam S.L.K., Kieffer R., Zeller F.J. Significance of *Aegilops tauschii* glutenin genes on breadmaking properties of wheat. *Cereal Chemistry*. 2001;78(5):521-525. DOI: 10.1094/cchem.2001.78.5.521
- Janni M., Cadonici S., Bonas U., Grasso A., Dahab A.A.D., Visioli G. et al. Gene-ecology of durum wheat HMW glutenin reflects their diffusion from the center of origin. *Scientific Reports*. 2018;8(1):16929. DOI: 10.1038/s41598-018-35251-4
- Jaradat A.A. Wheat landraces: a mini review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*. 2017;25(1):20-29. DOI: 10.9755/ejfa.v25i1.15376
- 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., Росеева 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
- Lee S., Choi Y.M., Lee M.C., Hyun D.Y., Oh S., Jung Y. Geographical comparison of genetic diversity in Asian landrace wheat (*Triticum aestivum* L.) germplasm based on high-molecular-weight glutenin subunits. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2018;65(6):1591-1602. DOI: 10.1007/s10722-018-0633-6
- Lerner S.E., Kolman M.A., Rogers W.J. Quality and endosperm storage protein variation in Argentinean grown bread wheat. I. Allelic diversity and discrimination between cultivars. *Journal of Cereal Science*. 2009;49(3):337-345. DOI: 10.1016/j.jcs.2008.04.003
- Li Y., Huang C., Sui X., Fan Q., Li G., Chu X. Genetic variation of wheat glutenin subunits between landraces and varieties and their contributions to wheat quality improvement in China. *Euphytica*. 2009;169(2):159-168. DOI: 10.1007/s10681-009-9905-8
- Liang D., Tang J., Peña R.J., Singh R., He X., Shen X. et al. Characterization of CIMMYT bread wheats for high- and low-molecular weight glutenin subunits and other quality-related genes with SDS-PAGE, RP-HPLC and molecular markers. *Euphytica*. 2010;172(2):235-250. DOI: 10.1007/s10681-009-0054-x
- López-Fernández M., Pascual L., Faci I., Fernández M., Ruiz M., Benavente E. et al. Exploring the end-use quality potential of a collection of Spanish bread wheat landraces. *Plants*. 2021;10(4):620. DOI: 10.3390/plants10040620
- Morojele M.E., Labuschagne M.T. Characterization of wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars grown in Lesotho by storage proteins. *Cereal Research Communications*. 2010;38(4):560-568. DOI: 10.1556/CRC.38.2010.4.13
- Nakamura H., Inazu A., Hirano H. Allelic variation in high-molecular-weight glutenin subunit loci of Glu-1 in Japanese common wheats. *Euphytica*. 1999;106(2):131-138. DOI: 10.1023/A:1003516620466
- Nehe A., Akin B., Sanal T., Evlice A.K., Ünsal R., Dinçer N. et al. Genotype × environment interaction and genetic gain for grain yield and grain quality traits in Turkish spring wheat released between 1964 and 2010. *PLoS One*. 2019;14(7):e0219432. DOI: 10.1371/journal.pone.0219432
- 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
- Novoselskaya-Dravovich A.Y., Fisenko A.V., Yankovsky N.K., Kudryavtsev A.M., Yang Q., Lu Z. et al. Genetic diversity of storage protein genes in common wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars from China and its comparison with genetic diversity of cultivars from other countries. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2010;58(4):533-543. DOI: 10.1007/s10722-010-9596-y
- Obreht D., Davidovic M., Vapa Lj. *Glu-1* and *Glu-3* allelic variability of genus *Triticum* – genetic resources in wheat breeding. *Annals of Faculty of Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*. 2003;1(1):191-196. Available from: <https://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2003/ANNALS-2003-1-36.pdf> [accessed Apr. 06, 2023].
- Obukhova L.V., Laikova L.I., Shumny V.K. Analysis of storage proteins (prolamines, puroindolines and waxy) in common wheat lines *Triticum aestivum* L. × (*Triticum timopheevii* Zhuk. × *Triticum tauschii*) with complex resistance to fungal infections. *Russian Journal of Genetics*. 2010;46(6):672-676. DOI: 10.1134/S1022795410060062
- Payne P.I., Seekings J.A., Worland A.J., Jarvis M.G., Holt L.M. Allelic variation of glutenin subunits and gliadins and its effect on breadmaking quality in wheat: Analysis of F5 progeny from Chinese Spring × Chinese Spring (Hope 1A). *Journal of Cereal Science*. 1987;6(2):103-118. DOI: 10.1016/S0733-5210(87)80047-4
- Pisarev V.E. Comparative genetics of wheats and their related species. *Proceedings of Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1964;36(1):5-23. [in Russian] (Писарев В.Е. Происхождение мягкой пшеницы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1964;36(1):5-23).
- Plotnikova L.Y. Development of biodiversity of wheat cultivated varieties is the step on the road to the sustainable development of rural Western Siberia. In: *Siberian village: history, modern state, and prospects of development. Part III (Sibirskaya derevnya: istoriya, sovremennoe sostoyaniye, perspektivy razvitiya. Chast III)*. Omsk: Omsk State Agrarian University; 2014. p.423-426. [in Russian] (Плотникова Л.Я. Повышение биоразнообразия сортов пшеницы – шаг к решению проблемы устойчивого развития сельских территорий Западной Сибири. В кн.: *Сибирская деревня: история, современное состояние, перспективы развития. Часть III*. Омск: Омский государственный аграрный университет; 2014. С.423-426).
- Pototskaya I.V., Shamanin V.P. Selection estimation of "synthetic populations" of spring bread wheat in the southern forest conditions of Western Siberia. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;(1-1):1683. [in Russian] (Потоцкая И.В., Шаманин В.П. Селекционная оценка «популяций-синтетиков» яровой мягкой пшеницы в условиях южной лесостепи Западной Сибири. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;(1-1):1683).
- Ram S. High molecular weight glutenin subunit composition of Indian wheats and their relationships with dough strength. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*. 2003;12(2):151-155. DOI: 10.1007/bf03263177
- Ram S., Sharma S., Sharma I. Allelic diversity of HMW and LMW glutenins in Indian wheats and their relationship with sedimentation volume and mixograph parameters. *Cereal Research Communications*. 2015;43(3):492-503. DOI: 10.1556/0806.43.2015.001
- Rasheed A., Mahmood T., Kazi A.G., Ghafoor A., Mujeeb-Kazi A. Allelic variation and composition of HMW-GS in advanced lines derived from d-genome synthetic hexaploid/bread

- wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Science and Biotechnology*. 2012;15(1):1-7. DOI: 10.1007/s12892-011-0088-1
- Ribeiro M., Carvalho C., Carnide V., Guedes-Pinto H., Igrejas G. Towards allelic diversity in the storage proteins of old and currently growing tetraploid and hexaploid wheats in Portugal. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2011;58(7):1051-1073. DOI: 10.1007/s10722-010-9642-9
- Rybalka O.I. Quality of wheat and its improvement. Kiev: Logos; 2011. [in Ukrainian] (Рибалка О.І. Якість пшениці та її поліпшення. Київ: Логос; 2011).
- Shahnejat-Bushehri A.A., Gomarian M., Yazdi-Samadi B. The high molecular weight glutenin subunit composition in old and modern bread wheats cultivated in Iran. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2006.57(10):1109-1114. DOI: 10.1071/AR06015
- Shan X., Clayshulte S.R., Haley S.D., Byrne P.F. Variation for glutenin and waxy alleles in the US hard winter wheat germplasm. *Journal of Cereal Science*. 2007;45(2):199-208. DOI: 10.1016/j.jcs.2006.09.007
- Shewry P.R., Halford N.G., Tatham A.S. High molecular weight subunits of wheat glutenin. *Journal of Cereal Science*. 1992;15(2):105-120. DOI: 10.1016/S0733-5210(09)80062-3
- Takata K., Nishio Z., Funatsuki W., Kuwabara T., Yamauchi H. Difference in combination between *Glu-B1* and *Glu-D1* alleles in bread-making quality using near-isogenic lines. *Food Science and Technology Research*. 2003;9(1):67-72. DOI: 10.3136/fstr.9.67
- Terasawa Y., Takata K., Kawahara T., Ban T., Sasakuma T. et al. Genetic variation of wheat landraces in Afghanistan. In: R. Appels, R. Eastwood, E. Lagudah, P. Langridge, M. Mackay, L. McIntyre, P. Sharp (eds). *The 11th International Wheat Genetics Symposium Proceedings*. Sydney: Sydney University Press; 2008. p.1-3. Available from: <https://ses.library.usyd.edu.au/bitstream/handle/2123/3240/P052.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [accessed Apr. 05, 2023].
- Utebayev M., Dashkevich S., Kunanbayev K., Bome N., Sharipova B., Shavrukov Y. Genetic polymorphism of glutenin subunits with high molecular weight and their role in grain and dough qualities of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) from Northern Kazakhstan. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2019;41(5):71. DOI: 10.1007/s11738-019-2862-5
- Utebayev M.U., Bome N.A., Zemtsova E.C., Kradetskaya O.O., Chilimova I.V. Diversity high-molecular-weight glutenin subunits and evaluation of genetic similarities in spring bread wheats from different breeding centers. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):99-109. [in Russian] (Утебаев М.У., Боме Н.А., Земцова Е.С., Крадецкая О.О., Чилимова И.В. Разнообразие высокомолекулярных субъединиц глютеина и оценка генетического сходства яровой мягкой пшеницы, созданной в различных селекционных учреждениях. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1):99-109). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-99-109
- Zhang X., Pang B.S., You G.X., Wang L.F., Jia J.Z., Dong Y.C. Allelic variation and genetic diversity at *Glu-1* loci in Chinese wheat (*Triticum aestivum* L.) germplasms. *Agricultural Sciences in China*. 2002;1(10):1074-1082.

Информация об авторе

Мария Васильевна Чебатарева, аспирант, младший научный сотрудник, Федеральный Алтайский научный центр агробиотехнологий, 656910, Россия, Барнаул, Научный городок, 35, Алтайский государственный университет, 656049 Россия, Барнаул, пр. Ленина, 61, masha.vorotintseva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8799-0681>

Information about the author

Maria V. Chebatareva, Postgraduate Student, Associate Researcher, Federal Altai Scientific Center of Agro-Biotechnologies, 35 Nauchny Gorodok, Barnaul 656910, Russia, Altai State University, 61 Lenina Ave., Barnaul 656049, Russia, masha.vorotintseva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8799-0681>

Статья поступила в редакцию 30.01.2023; одобрена после рецензирования 17.05.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 30.01.2023; approved after reviewing on 17.05.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

Краткое сообщение

УДК 634

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-233-239



Витковский Всеволод Леонидович (1928–2005): к 95-летию со дня рождения

Ю. В. Ухатова, А. В. Шлявас

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

Автор, ответственный за переписку: Анна Владимировна Шлявас, ann2668@yandex.ru

В 2023 году исполнилось 95 лет со дня рождения Всеволода Леонидовича Витковского – видного ученого-плодовода, доктора биологических наук, профессора, старейшего сотрудника отдела генетических ресурсов плодовых культур ВИР.

Ключевые слова: ВИР, генетические ресурсы растений, Витковский Всеволод Леонидович, плодовые культуры

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Ухатова Ю.В., Шлявас А.В. Витковский Всеволод Леонидович (1928–2005): к 95-летию со дня рождения. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):233-239. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-233-239

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

Brief report

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-233-239

Vsevolod L. Vitkovsky (1928–2005): dedication to his 95th birthday

Yulia V. Ukhatova, Anna V. Shlyavas

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

Corresponding author: Anna V. Shlyavas, ann2668@yandex.ru

In 2023, the 95th anniversary has been commemorated since the birth of Professor Vsevolod L. Vitkovsky, Doctor of Biological Sciences, a prominent scientist and fruit expert, one of the eldest staff members of the Department of Fruit Crop Genetic Resources at the Vavilov Institute.

Keywords: VIR, plant genetic resources, Vsevolod L. Vitkovsky, fruit crops

Acknowledgements: the authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Ukhatova Yu.V., Shlyavas A.V. Vsevolod L. Vitkovsky (1928–2005): dedication to his 95th birthday. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):233-239. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-233-239

© Ухатова Ю.В., Шлявас А.В., 2023

Всеволод Леонидович Витковский родился 29 мая 1928 г. в российском городе на берегах реки Волги – Ульяновске, в семье агрономов по защите растений (рис. 1).



Рис. 1. Витковский Всеволод Леонидович (1928–2005)

Fig. 1. Vsevolod L. Vitkovsky (1928–2005)

Особое значение для возрастающего интереса Всеволода Леонидовича к ботанике имели занятия в кружке натуралистов Дома пионеров, посадка первых в своей жизни саженцев вишни в 1941 г. в Самарканде, беседы родителей об их профессиональной деятельности. В 1946 г. Витковский поступил в старейшее сельскохозяйственное высшее учебное заведение – Ташкентский сельскохозяйственный институт, где в период обучения (1946–1951) он слушал лекции и осваивал методы изучения плодовых растений и винограда у известных ученых-специалистов, плодоводов-селекционеров. Его учителями были: Л. М. Ро, М. А. Пелях, Н. В. Ковалев, Н. Н. Балашов, А. М. Негруль, Я. Ф. Кац. Дипломную работу по освоению особенностей опыления разных сортов черешни Витковский выполнял на Среднеазиатской опытной станции Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства (ВИР), расположенной недалеко от г. Ташкента. Научным руководителем этой работы был Николай Васильевич Ковалев – ботаник, агроном, знаток плодовых растений, соратник академика Н. И. Вавилова.

После окончания с отличием института Всеволод Леонидович принял однозначное решение продолжить изучение плодовых культур в аспирантуре ВИР в Ленинграде, и вся его дальнейшая профессиональная жизнь была связана с ВИР. Начиная с 1951 г. В. Л. Витковский – сотрудник ВИР: и. о. младшего научного сотрудника отдела плодовых культур, аспирант отдела плодовых культур (1952–1954), руководитель группы плодово-ягодных и декоративных культур Полярной опытной станции ВИР (1955–1958), старший научный сотрудник отдела плодовых культур (1958–1967), заведующий отделом плодовых культур (1967–1974), заведующий лабораторией косточковых культур (1974–1988), заместитель директора ВИР по научно-исследовательской работе (1979–1990), заведующий отделом плодовых культур (1988–2001), главный научный сотрудник отдела генетических ресурсов плодовых культур (2001–2005) (Plekhanova, 2003).

В 1955 г. Витковскому присуждена ученая степень кандидата биологических наук: он защищает диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук по теме «Строение и жизненный цикл ростовых и смешанных почек крыжовника в связи с урожайностью». Его научным руководителем по аспирантской теме была ученый-селекционер, доктор биологических наук Н. М. Павлова. В 1976 г. решением ВАК ему присуждена ученая степень доктора сельскохозяйственных наук (тема диссертации: «Рост побегов, формирование почек и цветков плодовых растений») и присвоено ученое звание профессора по специальности «Плодоводство».

На протяжении всей своей научной жизни главным делом профессора В. Л. Витковского было изучение мирового генофонда плодовых растений. Изначально под руководством Нины Михайловны Павловой занимался изучением ягодных культур: крыжовника и смородины (Vitkovsky, 1957; Vitkovskij, 1964a), впоследствии курировал и руководил исследованиями генетической коллекции рода *Prunus*. Рассматривал его систематику (Vitkovskij, 1974; Vitkovskii et al., 1980; Samorodova-Bianki et al., 1986; Vitkovskiy, 1999a), морфологию и органогенез (Vitkovskij, 1986; Vitkovskij et al., 1986a; 1986b; Vitkovskij, Gavriliina, 1989) и помологические особенности (Vitkovskij et al., 1988; Vitkovskij et al., 1990; Vitkovsky, 1992; Vitkovskiy, 1999b; Vitkovsky, 2007; Vitkovsky et al., 2007).

Всеволод Леонидович тесно работал с сотрудниками опытных станций института в области исследования плодовых и ягодных культур (Vitkovskij, Melnikova, 1974; Vitkovskii, Tsarenko, 1978). Особое внимание уделял исследованию сливы и алычи в условиях Северо-Западного региона на Павловской опытной станции ВИР (Vitkovskij, Bogolyubova, 1969; Vitkovskii et al., 1983; Vitkovskij, Gavriliina, 1984).

Регулярно анализировал состояние генетической коллекции ВИР, давал рекомендации по методам и способам ее использования в современном садоводстве (Vitkovskii, 1981; Vitkovskii, Nesterov, 1983; Vitkovskij, Nesterov, 1987).

На протяжении всей научной деятельности, начиная с аспирантских времен, Витковский занимался изучением морфогенеза – сначала крыжовника (Vitkovskij, 1964b), а впоследствии и других плодовых культур (Vitkovskij, 1969; Vitkovskij, 1972; Vitkovskii, 1978; Vitkovskii, 1984). Результатом этой продолжительной работы была не только докторская диссертация, но и уникальная в своем роде монография «Морфогенез плодовых растений» (Vitkovsky, 1984). Эта книга в 1984 г. получила Диплом ВДНХ, в 1986 г. награждена Золотой медалью имени И. В. Мичурина (Plekhanova, 2003).

Всеволод Леонидович являлся соавтором сортов смородины черной 'Имандра 2' и сливы русской 'Подарок Санкт-Петербургу'. Оба сорта по настоящее время входят в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в РФ, и широко распространены в любительском садоводстве, особенно в северных регионах (State Register..., 2022).

При участии и под непосредственным руководством Всеволода Леонидовича сотрудниками отдела плодовых культур были разработаны методики и классификаторы (Vitkovsky, Pavlova, 1970; Tsarenko, Vitkovsky, 1992; Vitkovsky, 2001). Составлялись каталоги мировой коллекции ВИР по косточковым культурам (Vitkovsky et al., 1990; Vitkovsky et al., 1991).

Всеволод Леонидович участвовал в создании научно-популярной литературы (Eremin, Vitkovsky, 1980; Vitkovsky, 1993).

Всеволод Леонидович участвовал в многочисленных экспедициях по СССР и зарубежным странам (Dorofeev et al., 1970; Budin et al., 1971; Davidyan et al., 1971; Eremin, Vitkovskii, 1978; Vitkovskii et al., 1978; Vitkovskii, Gorbatenko, 1980; Vitkovskij et al., 1984), что дало возможность обогатить мировую коллекцию ВИР ценными видовыми образцами, староместными и новыми сортами плодовых и ягодных культур, образцами их диких родичей.

Особо следует сказать об итоговой фундаментальной работе В. Л. Витковского, которая и сегодня является настольной книгой для ученых, работающих с плодовыми, ягодными и орехоплодными культурами, – это монография «Плодовые растения мира» (Vitkovsky, 2003) (рис. 2).



Рис. 2. Обложка книги В. Л. Витковского
Fig. 2. The cover of V. L. Vitkovsky's book

Над ее написанием Всеволод Леонидович работал несколько лет. В ней собран большой фактический материал и дан наиболее полный обзор литературы по большому спектру культур: семечковым, косточковым, ягодным, орехоплодным, субтропическим, тропическим и цитрусовым.

Жизнь и деятельность Витковского служат примером преданности своему делу, его научная, научно-организационная и педагогическая деятельность оставили значимый след в истории науки и ВИР: в частности, Всеволод Леонидович двадцать лет заведовал отделом плодовых культур (рис. 3, 4), под его руководством защитили кандидатские диссертации: Сегаль Ф. И., Глушков А. И., Ломакин Э. Н., Коваль Г. К., Федченкова Г. А., Ольховатова В. И., Рубан Р. В., Гаврилина З. М., Юшев А. А., Копылов В. И., Цингалев Н. М., Царенко В. П., Чмух А. И., Берестова Г. Н., Ильина Н. А., Дускабилов Т., Клочко Н. Н., Батиков С. Г., Чеботарева М. С., Соколова Е. А., Осипов Г. М., Попов В. А., Мищенко В. Ф., Долаберидзе С. Д., Грюнер Л. А., Коренюк И. Ю., Арсеньева Т. В., Петрова Е. Ю., Царенко Н. А., Жумабаева С. Е., Леонтьева С. В., Кормановская В. В., Здоренко Н. Г., Черепанова И. В. Под руководством профессора Витковского и при его помощи в качестве консультанта докторами наук стали: А. А. Юшев, В. И. Копылов, В. П. Царенко, Е. А. Соколова, В. И. Авдеев, О. В. Мочалова.

Ученик В. Л. Витковского, доктор биологических наук А. А. Юшев, вспоминая годы совместной деятельности и дружбы, отмечал: «Всех коллег поражала его продуктивность, аккуратность и скрупулезность в исследованиях. Всеволод Леонидович был очень доброжелательным, добропорядочным, всегда приветливым и мягким человеком, но принципиальным, когда этого требовала об-



Рис. 3. Отдел плодовых и ягодных культур ВИР. Ленинград, 1977 г.: верхний ряд слева направо: А. А. Юшев, С. П. Хотимская, О. Л. Тамберг, В. Попова, Т. Комова, Н. Н. Завьялова, М. Ю. Васильева; средний ряд: А. П. Зайцева, Г. В. Тотубалина, М. Н. Плеханова, Е. А. Гурина, Я. С. Нестеров, М. С. Тихомирова, Ф. Д. Лихонос, В. Л. Витковский, Г. Берестова, В. В. Пономаренко; нижний ряд: Н. Кузина, Т. Л. Герман, Л. Л. Любимова, Т. Г. Тамберг, Е. В. Володина, Н. И. Рябова, Е. Ф. Петрова, Г. С. Крылова

Fig. 3. The Department of Fruit and Berry Crops, VIR, Leningrad, 1977: upper row, left to right: A. A. Yushev, S. P. Khotimskaya, O. L. Tamberg, V. Popova, T. Komova, N. N. Zavyalova, M. Yu. Vasilyeva; middle row: A. P. Zaytseva, G. V. Totubalina, M. N. Plekhanova, E. A. Gurina, Ya. S. Nesterov, M. S. Tikhomirova, F. D. Likhonos, V. L. Vitkovsky, G. Berestova, V. V. Ponomarenko; lower row: N. Kuzina, T. L. German, L. L. Lyubimova, T. G. Tamberg, E. V. Volodina, N. I. Ryabova, E. F. Petrova, G. S. Krylova



Рис. 4. Отдел ГР плодовых культур ВИР. Санкт-Петербург, январь 2002 г.: стоят слева направо: С. Ю. Орлова, В. В. Пономаренко, Е. Ф. Петрова, С. П. Хотимская, О. А. Тихонова, С. Д. Елсакова, М. С. Тихомирова, Л. А. Бурмистров, Н. А. Пупкова, М. Н. Петрова, А. В. Кондрикова, Н. А. Долганова, Т. В. Арсеньева; сидят: А. А. Юшев, М. Н. Плеханова, Н. А. Петренко, В. И. Майорова, В. Л. Витковский

Fig. 4. The Department of Fruit Crop Genetic Resources, VIR. St. Petersburg, January, 2002: standing, from left to right: S. Yu. Orlova, V. V. Ponomarenko, E. F. Petrova, S. P. Khotimskaya, O. A. Tikhonova, S. D. Elsakova, M. S. Tikhomirova, L. A. Burmistrov, N. A. Pupkova, M. N. Petrova, A. V. Kondrikova, N. A. Dolganova, T. V. Arsenyeva; sitting: A. A. Yushev, M. N. Plekhanova, N. A. Petrenko, V. I. Mayorova, V. L. Vitkovsky

становка. Это был интеллигент в жизни и науке» (URL: <http://vir.nw.ru/biography/vitkovskii.htm>).

Скончался Всеволод Леонидович 25 марта 2005 г.

References / Литература

- Budin K.Z., Vitkovskij V.L., Solomatin D.A. Plant industry in Algeria. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1971;45(2):130-158. [in Russian] (Будин К.З., Витковский В.Л., Соломатин Д.А. Растениеводство Алжира. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1971;45(2):130-158).
- Davidyan G.G., Shmaraev G.E., Kobylansky V.D., Vitkovskij V.L. The expedition to Yugoslavia. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1971;45(2):208-237. [in Russian] (Давидян Г.Г., Шмараев Г.Е., Кобылянский В.Д., Витковский В.Л. Экспедиция в Югославию. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1971;45(2):208-237).
- Dorofeev V.F., Vitkovskij V.L., Mashanov V.I. On a visit to Iran. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1970;42(2):188-203. [in Russian] (Дорофеев В.Ф., Витковский В.Л., Машанов В.И. О поездке в Иран. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1970;42(2):188-203).
- Eremin G.V., Vitkovskii V.L. On wild stone fruits of the Ukraine and Moldavia. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1978;61(2):14-28. [in Russian] (Еремин Г.В., Витковский В.Л. О дикорастущих косточковых Украины и Молдавии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978;61(2):14-28).
- Eremin G.V., Vitkovsky V.L. Plum (Sliva). Moscow: Kolos; 1980. [in Russian] (Еремин Г.В., Витковский В.Л. Слива. Москва: Колос; 1980).
- Plekhanova M.N. On the scientific activities of V.L. Vitkovsky (celebrating his 75th birthday) (O nauchnoy deyatel'nosti V.L. Vitkovskogo [k 75-letiyu so dnya rozhdeniya]). In: *Vsevolod Leonidovich Vitkovsky*. St. Petersburg: VIR; 2003. p.4-8. [in Russian] (Плеханова М.Н. О научной деятельности В.Л. Витковского (к 75-летию со дня рождения). В кн.: *Всеволод Леонидович Витковский*. Санкт-Петербург: ВИР; 2003. С.4-8).
- Samorodova-Bianki G.B., Vitkovskij V.L., Rostova N.S., Trofimova E.A. A new approach to discover interrelations between varieties of the genus *Prunus* L. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1986;106:43-59. [in Russian] (Самородова-Бианки Г.Б., Витковский В.Л., Ростова Н.С., Трофимова Е.А. Новые подходы к выявлению взаимосвязей между сортами рода *Prunus* L. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1986;106:43-59).
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotech; 2022. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2022).

- Tsarenko N.A., Vitkovskiy V.L. Descriptors of the genus *Padus* Mill. (Klassifikator roda *Padus* Mill.). St. Petersburg: VIR; 1992. [in Russian] (Царенко Н.А., Витковский В.Л. Классификатор рода *Padus* Mill. Санкт-Петербург: ВИР; 1992).
- Vitkovskii V.L. Characteristic features of formation of flowers with an inferior, semi-inferior and superior ovary in fruit plants. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1984;83:79-92. [in Russian] (Витковский В.Л. Особенности формирования цветков с нижней, полунижней и верхней завязью у плодовых растений. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1984;83:79-92).
- Vitkovskii V.L. Principles governing the formation of vegetative and reproductive organs in fruit plants. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1978;62(3):59-78. [in Russian] (Витковский В.Л. Закономерности формирования вегетативных и генеративных органов плодовых растений. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978;62(3):59-78).
- Vitkovskii V.L. Resources of stone fruit crops in the breeding for resistance to unfavourable environmental factors. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1981;71(1):144-149. [in Russian] (Витковский В.Л. Ресурсы косточковых культур в селекции на устойчивость к неблагоприятным факторам внешней среды. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1981;71(1):144-149).
- Vitkovskii V.L., Gavrilina Z.M., Zavyalova N.K. Characteristic features of growth and formation of the crown in plum varieties in the North-West of the RSFSR. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1983;76:40-49. [in Russian] (Витковский В.Л., Гаврилина З.М., Завьялова Н.К. Особенности роста и формирования кроны у сортов сливы в Северо-Западной зоне РСФСР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1983;76:40-49).
- Vitkovskii V.L., Gorbatenko L.E. Jamaica and the Trinidad and Tobago Republic useful plants. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1980;68(3):124-131. [in Russian] (Витковский В.Л., Горбатенко Л.Е. Полезные растения Ямайки и Республики Тринидад и Тобаго. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1980;68(3):124-131).
- Vitkovskii V.L., Mikheev A.M., Savin G.A. Fruits, subtropical crops and grapevine in India. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1978;61(2):118-129. [in Russian] (Витковский В.Л., Михеев А.М., Савин Г.А. Плодовые, субтропические культуры и виноград в Индии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978;61(2):118-129).
- Vitkovskii V.L., Nesterov Ya.S. Introduction, study and use in crop production and breeding of the world gene bank of fruit crops. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1983;80:95-103. [in Russian] (Витковский В.Л., Нестеров Я.С. Интродукция, изучение и использование в производстве и селекции мирового генофонда плодовых культур. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1983;80:95-103).
- Vitkovskii V.L., Tsarenko V.P. Some characteristic properties of shoot growth and flower formation in plums in the Primorye territory. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1978;62(2):51-60. [in Russian] (Витковский В.Л., Царенко В.П. Особенности роста побегов и формирования цветков у сливы в Приморском крае. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978;62(2):51-60).
- Vitkovskii V.L., Tsarenko V.P., Gavrilina Z.M. The systematical position of *Prunus ussuriensis* Koval. et Kostina. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1980;67(1):49-62. [in Russian] (Витковский В.Л., Царенко В.П., Гаврилина З.М. Систематическое положение *Prunus ussuriensis* Koval. et Kostina. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1980;67(1):49-62).
- Vitkovskij V.L. On the binary classification of fruit crop buds. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1972;46(2):148-156. [in Russian] (Витковский В.Л. Бинарная классификация почек плодовых растений. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1972;46(2):148-156).
- Vitkovskij V.L. Polymorphism of the flowers in species and varieties of the genus *Prunus* L. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1986;99:31-35. [in Russian] (Витковский В.Л. Полиморфизм цветков видов и сортов рода *Prunus* L. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1986;99:31-35).
- Vitkovskij V.L. Regularities of morphogenesis of fruit and small-fruit flowers. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1969;40(3):5-11. [in Russian] (Витковский В.Л. Закономерности морфогенеза цветков у плодовых культур. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1969;40(3):5-11).
- Vitkovskij V.L. Small fruit breeding under the Extreme North conditions. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1964a;36(3):149-157. [in Russian] (Витковский В.Л. Селекция ягодных культур в условиях Крайнего Севера. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1964a;36(3):149-157).
- Vitkovskij V.L. Structure and life history of gooseberry rootlet buds on shoots of various age. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1964b;36(3):58-80. [in Russian] (Витковский В.Л. Строение и жизненный цикл почек побегов разного возраста у крыжовника. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1964b;36(3):58-80).
- Vitkovskij V.L. Survey of the species *Prunus spinosa* L. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1974;52(3):84-106. [in Russian] (Витковский В.Л. Обзор вида *Prunus spinosa* L. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1974;52(3):84-106).
- Vitkovskij V.L., Bogolyubova O.P. Promising plum varieties for the North-Western zone of the Russian Soviet Federative Socialist Republic. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1969;40(3):85-93. [in Russian] (Витковский В.Л., Боголюбова О.П. Перспективные сорта сливы для Северо-Западной зоны РСФСР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1969;40(3):85-93).
- Vitkovskij V.L., Eremin G.V., Nizhnikov V.S. Wild stone plants of the Central and the Lower Volga area (Povolzh'e). *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1984;90:10-20. [in Russian] (Витковский В.Л., Еремин Г.В., Нижников В.С. Дикорастущие косточковые растения Среднего и Нижнего Поволжья. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1984;90:10-20).
- Vitkovskij V.L., Gavrilina Z.M. Characteristic features of myrobalan plum in North-Western region of the Nonchernozem zone. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1984;86:85-90. [in Russian] (Витковский В.Л., Гаврилина З.М. Особенности биологии алычи в Северо-Западном районе Нечерноземья. *Сборник научных тру-*

- дов по прикладной ботанике, генетике и селекции. 1984;86:85-90).
- Vitkovskij V.L., Gavrulina Z.M. Characteristic features of organogenesis of flowers in the representatives of the genus *Prunus* L. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1989;124:90-100. [in Russian] (Витковский В.Л., Гаврилина З.М. Особенности органогенеза цветков у представителей рода *Prunus* L. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1989;124:90-100).
- Vitkovskij V.L., Melnikova K.D. Characteristic properties of biology of garden plum and characterization of varieties deserving for the submontane zone of the Northern Caucasus. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1974;52(3):107-120. [in Russian] (Витковский В.Л., Мельникова К.Д. Особенности биологии и характеристика сортов сливы домашней, перспективных для предгорной зоны Северного Кавказа. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1974;52(3):107-120).
- Vitkovskij V.L., Mostolovitsa K.Yu., Gavrulina Z.M. On variability of flower morphological characters in garden plum varieties. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1986a;106:34-43. [in Russian] (Витковский В.Л., Мостоловица К.Ю., Гаврилина З.М. Об изменчивости морфологических признаков цветка у сортов сливы домашней. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1986a;106:34-43).
- Vitkovskij V.L., Mostolovitsa K.Yu., Gavrulina Z.M. On variability of morphological characters of the leaves in garden plum varieties. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1986b;104:27-34. [in Russian] (Витковский В.Л., Мостоловица К.Ю., Гаврилина З.М. Об изменчивости морфологических признаков листьев у сортов сливы домашней. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1986b;104:27-34).
- Vitkovskij V.L., Mostolovitsa K.Yu., Gavrulina Z.M. Polymorphism of characters in varieties of diploid plum species. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1990;131:35-46. [in Russian] (Витковский В.Л., Мостоловица К.Ю., Гаврилина З.М. Полиморфизм признаков у сортов диплоидных видов слив. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1990;131:35-46).
- Vitkovskij V.L., Mostolovitsa K.Yu., Gavrulina Z.M. Variability of fruit characters in garden plum varieties. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1988;119:65-78. [in Russian] (Витковский В.Л., Мостоловица К.Ю., Гаврилина З.М. Изменчивость признаков плода у сортов сливы домашней. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1988;119:65-78).
- Vitkovskij V.L., Nesterov Ya.S. Results of studies and prospects for the use of the fruit and berry crops collection in crop production and breeding. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1987;100:120-129. [in Russian] (Витковский В.Л., Нестеров Я.С. Итоги изучения и перспективы использования коллекции многолетних плодовых культур в производстве и селекции. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1987;100:120-129).
- Vitkovskiy V.L. Conception of genetic determination of pomological features of myrobalan plum and blackthorn in the varieties of domestic plum. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1999a;155:151-156. [in Russian] (Витковский В.Л. Концепция генетической детерминации помологических признаков алычи и терна в сортах сливы домашней. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1999a;155:151-156).
- Vitkovskiy V.L. New intraspecies taxonomy of *Prunus domestica* L. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1999b;155:13-19. [in Russian] (Витковский В.Л. Новая внутривидовая таксономия *Prunus domestica* L. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1999b;155:13-19).
- Vitkovsky V.L. (comp.). Specific features of studying pomological characters in species and varieties of the genus *Prunus* Mill. in connection with the establishment of genetic and core collections: guidelines (Osobennosti izucheniya pomologicheskikh priznakov vidov i sortov roda *Prunus* Mill. v svyazi s sozdaniyem geneticheskoy i sterzhnevoy kollektsiy: metodicheskiye ukazaniya). St. Petersburg: VIR; 2001. (Особенности изучения помологических признаков видов и сортов рода *Prunus* Mill. в связи с созданием генетической и стержневой коллекций: методические указания / составитель В.Л. Витковский. Санкт-Петербург: ВИР; 2001).
- Vitkovsky V.L. Classification of garden plum varieties on the basis of flower and stone characters. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 2007;161:37-47. [in Russian] (Витковский В.Л. Классификация сортов сливы домашней по признакам цветка и косточки. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2007;161:37-47).
- Vitkovsky V.L. Differentiation of apical cones and development of flower parts in mixed currant buds (Differentsiatsiya konusov narastaniya i razvitiye chastey tsvetkov v smeshannykh pochkakh smorodiny). *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1957;30(3):248-252. [in Russian] (Витковский В.Л. Дифференциация конусов нарастания и развитие частей цветков в смешанных почках смородины. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1957;30(3):248-252).
- Vitkovsky V.L. Fruit plants of the world. St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Lan; 2003. [in Russian] (Витковский В.Л. Плодовые растения мира. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань; 2003).
- Vitkovsky V.L. Morphogenesis of fruit plants (Morfogenez plodovykh rasteniy). Leningrad: Kolos; 1984. [in Russian] (Витковский В.Л. Морфогенез плодовых растений. Ленинград: Колос; 1984).
- Vitkovsky V.L. Plum cultivation in the Non-Black-Earth Region (Vyrashchivaniye slivy v Nechernozemye). St. Petersburg: VIR; 1993. [in Russian] (Витковский В.Л. Выращивание сливы в Нечерноземье. Санкт-Петербург: ВИР; 1993).
- Vitkovsky V.L. The flower as a criterion of pomological characteristic of domestic plum varieties. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 1992;146:55-61. [in Russian] (Витковский В.Л. Цветок как критерий помологической характеристики сортов сливы домашней. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1992;146:55-61).
- Vitkovsky V.L., Gavrulina Z.M., Mostolovitsa K.Yu., Tsarenko V.P. (comp.). Catalogue of the VIR global collection. Issue 560. Plum: (varieties of diploid species). V.L. Vitkovsky, Z.M. Gavrulina (eds). Leningrad: VIR; 1990. [in Russian] (Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск. 560. Слива: (сорта диплоидных видов) / сост. В.Л. Витковский, З.М. Гаврилина, К.Ю. Мостоловица, В.П. Царенко; под ред. В.Л. Витковского, З.М. Гаврилиной. Ленинград: ВИР; 1990).
- Vitkovsky V.L., Melnikova K.D., Mostolovitsa K.Yu., Gavrulina Z.M. The stone as a criterion of plum cultivars pomological

- characteristic. *Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant Breeding*. 2007;161:47-56. [in Russian] (Витковский В.Л., Мельникова К.Д., Мостоловица К.Ю., Гаврилина З.М. Косточка, как критерий помологической характеристики сортов сливы. *Сборник научных трудов по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2007;161:47-56).
- Vitkovsky V.L., Pavlova N.M. (comp.). Program and methods for studying the varieties of the collection of fruit, berry, subtropical and nut crops, and grapes (Programma i metodika izucheniya sortov kollektzii plodovykh, yagodnykh, subtropicheskikh, orekhoplodnykh kultur i vinograda). Leningrad: VIR; 1970. [in Russian] (Программа и методика изучения сортов коллекции плодовых, ягодных, субтропических, орехоплодных культур и винограда / сост. В.Л. Витковский, Н.М. Павлова. Ленинград: ВИР; 1970).
- Vitkovsky V.L., Tsarenko V.P., Sokolova E.A., Tsarenko N.A. (comp.). Catalogue of the VIR global collection. Issue 598. Wild stone fruit crops of the Far East. Apricot. V.L. Vitkovsky (ed.). Leningrad: VIR; 1991. [in Russian] (Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 598. Дикорастущие косточковые плодовые культуры Дальнего Востока. Абрикос / сост. В.Л. Витковский, В.П. Царенко, Е.А. Соколова, Н.А. Царенко; под ред. В.Л. Витковского. Ленинград: ВИР; 1991).
- Yushev A.A. Vsevolod Leonidovich Vitkovsky (1928–2005). St. Petersburg: VIR; 2005. [in Russian] (Юшев А.А. Витковский Всеволод Леонидович (1928–2005). Санкт-Петербург: ВИР; 2005. URL: <http://vir.nw.ru/biography/vitkovskii.htm> [дата обращения: 01.07.2023].

Информация об авторах

Юлия Васильевна Ухатова, кандидат биологических наук, заместитель директора, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, y.ukhatova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9366-0216>

Анна Владимировна Шлявас, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, ann2668@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8009-6780>

Information about the authors

Yulia V. Ukhatova, Cand. Sci. (Biology), Deputy Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, y.ukhatova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9366-0216>

Anna V. Shlyavas, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, ann2668@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8009-6780>

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 04.07.2023; одобрена после рецензирования 30.08.2023; принята к публикации 04.09.2023. The article was submitted on 04.07.2023; approved after reviewing on 30.08.2023; accepted for publication on 04.09.2023.

УДК 57:58:633/635:632(066)

Список основных методических рекомендаций (указаний) ВИР за 2000–2022 гг.

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова издает практически все традиционные для научных институтов виды изданий. Начиная с 20-х годов прошлого века ВИР регулярно издает методические рекомендации (указания).

Данные издания в течение более 100 лет имеют свою специализированную аудиторию, все методические рекомендации (указания) представляют собой совокупность документов по изучению, сохранению и пополнению уникальной коллекции мировых генетических ресурсов ВИР, селекции, семеноводству, выращиванию, устойчивости к болезням и вредителям отдельных культур, гербаризации растений, длительному хранению семян, методам в биохимических, микологических, фитопатологических, генетических и биотехнологических исследованиях и многим другим вопросам. Издания нашли широкое применение в работе сотрудников ВИР и филиальной сети, а также востребованы учеными, специалистами, преподавателями, аспирантами и студентами Российской Федерации.

В связи с повышенным интересом, Редакция журнала «Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции» приняла решение опубликовать «Список основных методических рекомендаций (указаний) ВИР за 2000–2022 гг.». Для удобства пользования материал расположен в хронологическом порядке. В список частично вошли методические рекомендации (указания), изданные другими научно-исследовательскими учреждениями при участии авторов, являющихся сотрудниками ВИР. Мы надеемся, что список окажется полезным нашим читателям и авторам научных статей. Список составлен сотрудниками библиотечно-издательского отдела ВИР.

Для цитирования: Список основных методических рекомендаций (указаний) ВИР за 2000–2022 гг. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(3):240-245. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-240-245

Selective list of VIR's methodological recommendations (guidelines) for 2000–2022

The N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) releases almost all types of publications traditional for research institutions. Since the 1920s, VIR has been regularly publishing methodological recommendations, or guidelines.

This kind of publications has won its own specialized audience and retained it for over a hundred years. All recommendations (guidelines) are an assemblage of documents dedicated to the study, conservation, and replenishment of the unique global plant genetic resources collection held by VIR; plant breeding; seed production; cultivation; resistance of individual crops to diseases and pests; herbarization; long-term seed storage; biochemical, mycological, phytopathological, genetic, and biotechnological research methods; and many other issues. Such publications are widely used by the staff of VIR and the network of its branches in their practical work, and are also in demand with various scientists, experts, lecturers and teachers, postgraduate and undergraduate students all over Russia.

Keeping in mind the ever increasing interest in such information, the Editorial Board of the journal *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding* decided to publish a selective list of VIR's methodological recommendations (guidelines) for 2000–2022. For the sake of convenience, the material is arranged in chronological order. This list partially includes recommendations and guidelines published by other research institutions where VIR's staff members were among the authors. It is our hope that the list will be found useful by our readers and authors of scientific publications. The list was compiled by the staff of the Library and Publishing Department of VIR.

For citation: Selective list of VIR's methodological recommendations (guidelines) for 2000–2022. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(3):240-245. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-3-240-245



**Список основных методических рекомендаций (указаний) ВИР за 2000–2022 гг. /
Selective list of VIR's methodological recommendations (guidelines) for 2000–2022**

2000

Гринько Н. Н. Экологически безопасная система защиты овощных культур закрытого грунта от фитопатогенов : рекомендации / РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова, Адлеровская опытная станция ВИР. Краснодар, 2000. 44 с.

Конарев В. Г., Гаврилюк И. П., Губарева Н. К., Алпатьева Н. В., Хакимова А. Г., Пенева Т. И., Конарев А. В., Конарев А. В., Введенская О. И., Перчук И. Н., Сидорова В. В., Иванова Д. И., Тарлаковская А. М., Егги Э. Э., Анисимова И. Н., Лесневич Л. А., Фарбер С. П., Кудрякова Н. В., Демкин П. П., Литовченко М. И. Идентификация сортов и регистрация генофонда культурных растений по белкам семян = Identification of varieties and registration of the genofond of cultivated plants by seed proteins / составитель В. В. Сидорова ; под редакцией В. Г. Конарева ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2000. 186 с.

Характеристика видов *Aegilops* L. и *Triticum* L. по белкам-антигенам зерновки : (методические указания и каталог образцов) / составители: А. Г. Хакимова, И. П. Гаврилюк ; под редакцией А. В. Конарева, О. П. Митрофановой ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2000. 24, [2] с. : табл., ил.

2001

Особенности изучения помологических признаков видов и сортов рода *Prunus* Mill. в связи с созданием генетической и стерженной коллекций : методические указания / составитель В. Л. Витковский ; редактор В.А. Драгавцев ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2001. 89 с.

2002

Диагностика и методы учета злаковых тлей : методические рекомендации / [подготовили: М. Н. Берим, Е. Е. Радченко] ; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Москва : Росинформагротех, 2002. 21, [1] с. : табл.

Оценка сортов зерновых культур по адаптивности и другим полигенным системам : (методические указания) / под ред. В. А. Драгавцева ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2002. 78, [2] с. : ил., табл.

Dragavtsev V. A. Algorithms of an ecologo-genetical survey of the genofond and methods of creating the varieties of crop plants for yield, resistance and quality : (Methodical recommendations. New approaches) / Russian Academy of Agriculture Sciences, State Research Centers of the Russian Federation, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR). 2nd ed. St. Petersburg : VIR, 2002. 39, [1] p.

2003

Изменчивость возбудителя ринхоспориоза ячменя при бесполом размножении : методические указания / [составитель Г. С. Ковалова] ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2003. 28, [1] с. : ил.

Якуткин В. И., Ахтулова Е. М. Мониторинг вирулентности возбудителя ложной мучнистой росы и оценка устойчивости подсолнечника к болезни : (методические рекомендации) / РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений. Санкт-Петербург, 2003. 24, [1] с. : ил., табл.

2004

Поморцев А. А., Кудрявцев А. М., Упельник В. В., Конарев В. Г., Конарев А. В., Гаврилюк И. П., Губарева Н. К., Пенева Т. И., Сидорова В. В., Березкин А. Н., Малько А. М., Смирнова Л. А., Бунин М. С., Кононков П. Ф., Гинс В. К., Старцев В. И., Добруцкая Е. Г., Фарбер С. П. Методика проведения лабораторного сортового контроля по группам сельскохозяйственных растений / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Москва, 2004. 96 с.

2005

Изучение и поддержание в живом виде мировой коллекции лука и чеснока : методические указания / В. В. Пережогина, В. И. Кривченко, А. Е. Соловьева, В. В. Шумилина, Ю. В. Погромский ; под редакцией В.И. Буренина ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 109 с. : ил., табл.

Изучение устойчивости смородины к тлям : методические указания / составители: Л. В. Ермолаева, Т. В. Арсеньева ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2005. 31 с. : ил., табл.

Научная организация производства товарной земляники в крестьянских и фермерских хозяйствах Краснодарского края : методические рекомендации / составитель В. Н. Подорожный. Крымск, 2005. 26 с.

2006

Мартынов С. П., Добротворская Т. В. Генеалогический подход к анализу генетического разнообразия зерновых культур с помощью информационно-аналитической системы генетических ресурсов : (методические указания) / под редакцией О. П. Митрофановой ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2006. 87, [1] с. : табл., ил.

2007

Антошкина М. С., Добруцкая Е. Г., Гинс В. К., Старцев В. И., Фарбер С. П. Методические рекомендации по анализу белков семян пупавковых культур методом электрофореза / РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт селекции и семеноводства овощных культур, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Москва, 2007. 25 с.

Добренков Е. А. Содержание и оформление контрольных работ по генетике и селекции растений : методические указания для студентов заочной формы обучения факультета аграрных технологий / Майкопский государственный технологический университет, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова, Филиал Майкопская опытная станция ВИР. Майкоп, 2007. 12 с. (Сер. Учебно-методическое пособие).

Изучение морфоструктуры и топографии нектарников в цветках некоторых видов растений технического использования : методические указания / составители: Т. Е. Вахрушева, Л. Ф. Харитонова, В. А. Гаврилова, Л. П. Подольная, Н. Г. Конькова, А. Г. Дубовская, И. А. Петросян ; под редакцией В. А. Гавриловой ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2007. 36, [2] с. : табл., ил.

Причко Т. Г., Алехина Е. М., Ефимова И. Л., Луговской А. П., Еремин Г. В., Артюх С. Н., Кузнецова А. П., Шафоростова Н. К., Яковенко В. В., Подорожный В. Н., Можар Н. В., Ульяновская Е. В., Алферов В. А., Бунцевич Л. Л., Говорущенко С. А., Богатырева С. В., Сабдан Т. А. Апробация посадочного материала плодовых, ягодных и орехоплодных культур в южной зоне плодоводства : методические рекомендации / Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства Россельхозакадемии. Краснодар, 2007. 116 с.

Эндوفитные грибы рода *Neotyphodium* – выявление и идентификация у овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.) : методические рекомендации / составители: Т. В. Шеленга, А. В. Конарев, Н. И. Дзюбенко ; под редакцией Н. И. Дзюбенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2007. 35 с. : рис., портр.

2008

Возделывание ягодных культур в личных подсобных хозяйствах : (методические рекомендации) / составители: Т. Г. Причко, В. В. Яковенко, В. П. Попова, Н. А. Холод, Л. А. Хилько, В. Н. Подорожный. Краснодар : СКЗНИИСИВ, 2008. 27 с.

Интенсивная технология выращивания плодов сливы русской : (методические рекомендации) / составители: Г. В. Еремин, А. В. Проворченко ; Управление по виноградарству, винодельческой промышленности и садоводству Краснодарского края ; СКЗНИИСИВ РАСХН. Краснодар, 2008. 15 с.

Радченко Е. Е., Кривченко В. И., Солодихина О. В., Ригин Б. В., Тырышкин Л. Г., Одинцова И. Г., Лоскутов И. Г., Коновалова Г. С., Лебедева Т. В., Хохлова А. П., Ковалева М. М., Колесова М. А., Антонова О. Ю., Фролов А. Н., Вилкова Н. А., Нефедова Л. И., Гулятьева Е. И., Гагкаева Т. Ю., Семенова А. Г., Пеша Х. О. Изучение генетических ресурсов зерновых культур по устойчивости к вредным организмам : методическое пособие / под редакцией Е. Е. Радченко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Москва, 2008. 416, [15] с. : ил., цв. ил., табл.

2010

Анисимова И. Н., Алпатьева Н. В., Тимофеева Г. И. Скрининг генетических ресурсов растений с использованием ДНК-маркеров: основные принципы, выделение ДНК, постановка ПЦР, электрофорез в агарозном геле : (методические указания) / под редакцией Е. Е. Радченко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 31, [1] с. : табл.

Изучение генетического контроля устойчивости зерновых самоопыляющихся культур к болезням : (методические указания) / составитель Л. Г. Тырышкин ; под редакцией В. Д. Кобылянского ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 34, [1] с. : ил., табл.

Интенсивная технология выращивания плодов персика и нектарина : (методические рекомендации) / составитель В. Г. Еремин ; Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, Крымская опытно-селекционная станция. Крымск, 2010. 19 с.

Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР : пополнение, сохранение и изучение : (методические указания) / [М. А. Вишнякова, Т. В. Буравцева, С. В. Булынец, М. О. Бурляева, Е. В. Семенова, И. В. Сеферова, Т. Г. Александрова, И. И. Яньков, Г. П. Егорова, Т. В. Герасимова, Е. В. Другова] ; под редакцией М. А. Вишняковой ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 142 с. : ил., табл.

Ленивцева М. С. Изучение устойчивости косточковых культур к коккомикозу : методические указания / РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 28, [1] с. : ил., табл.

Методические указания по поддержанию и изучению мировой коллекции картофеля : [методические указания] / составители: С. Д. Киру, Л. И. Костина, Э. В. Трускинов, Н. М. Зотеева, Е. В. Рогозина, Л. В. Королева, В. Е. Фомина, С. В. Палеха, О. С. Косарева, Д. А. Кирилов ; под редакцией С. Д. Киру ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 27, [1] с.

Семенова Л. Г., Добренков Е. А., Бандурко И. А. Методическое пособие по выполнению и защите выпускной квалификационной работы для студентов специальности 310200 «Агрономия» / Майкопский государственный технологический университет, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова, Филиал Майкопская опытная станция ВИР. Майкоп, 2010. 26 с.

Семенова Л. Г., Добренков Е. А., Бандурко И. А. Методическое пособие по выполнению и защите выпускной квалификационной работы для студентов специальности 110201 «Агрономия» / Майкопский государственный технологический университет, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова, Филиал Майкопская опытная станция ВИР. Изд. доп. и перераб. Майкоп, 2010. 32 с.

2011

Интенсивная технология выращивания плодов черешни : (методические рекомендации) / Г. В. Еремин, О. В. Еремина, Г. Н. Жуков, В. М. Кареник ; Крымская ОСС Россельхозакадемии ; ООО «Агрофирма «Красный сад». Крымск : КОСС, 2011. 43 с.

Коваленко Н. Н. Выращивание посадочного материала садовых культур с использованием зеленого черенкования : методические рекомендации. Краснодар, 2011. 54 с.

Причко Т. Г., Еремин Г. В., Луговской А. П., Ульяновская Е. В., Артюх С. Н., Можар Н. В., Ефимова И. Л., Чепинога И. С., Шафоростова Н. К., Алехина Е. М., Кузнецова А. П., Гасанова Т. А., Еремина О. В., Богатырева С. В., Доля Ю. А., Яковенко В. В., Подорожный В. Н., Алферов В. А., Бунцевич Л. Л. Апробация посадочного материала плодовых, ягодных и орехоплодных культур в южной зоне плодоводства : методические рекомендации / Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства Россельхозакадемии. 2-е изд., перераб. и доп. Краснодар, 2011. 121 с.

Сохранение вегетативно размножаемых культур в *in vitro*- и криоколлекциях : (методические указания) / составители: С. Е. Дунаева, Г. И. Пендинен, О. Ю. Антонова, Н. А. Швачко, Н. Н. Волкова, Т. А. Гавриленко ; под редакцией Т. А. Гавриленко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2011. 64 с., [4] л. цв. ил., табл.

Хатев Э. Б. Селекция тетраплоидной кукурузы на повышенную семенную плодovitость : (методические рекомендации) : практические рекомендации для генетиков и селекционеров, специалистов сельского хозяйства / РАСХН, Министерство сельского хо-

зяйства и продовольствия Кабардино-Балкарской Республики, Кабардино-Балкарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства. Нальчик : Изд-во М. и В. Котляровых (ООО "Полиграфсервис и Т"), 2011. 47, [1] с. : ил.

2012

Злотина М. М., Киселева А. А., Потокина Е. К. Использование аллель-специфичных маркеров генов *VRN* и *PPD* для экспресс-диагностики фотопериодической чувствительности и потребности в яровизации мягкой пшеницы и ячменя : (методические рекомендации) / РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2012. 28, [1] с. : ил., табл.

Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса / составители: И. Г. Лоскутов, О. Н. Ковалева, Е. В. Блинова ; под редакцией И. Г. Лоскутова ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Изд. 4-е, доп. и перераб. Санкт-Петербург : ВИР, 2012. 63, [1] с. : табл.

Статистические методы анализа и моделирования : методические указания по выполнению контрольной работы для студентов направления 010400.68 «Прикладная математика и информатика» / составители: Л. Ю. Новикова, О. Ю. Тарасова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики. Санкт-Петербург, 2012. 23 с.

2013

Егги Э. Э. Идентификация сортов люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.) с использованием электрофоретического спектра полипептидов белков семян : методические указания / под редакцией И. П. Гаврилюк ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2013. 26 с. : ил.

Еремин Г. В., Сафаров Р. М. Интенсивные технологии возделывания сливы русской : (методические рекомендации) / РАСХН, Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, Крымская опытно-селекционная станция. Крымск, 2013. 35 с. : ил., табл., цв. ил.

Современная организация выращивания товарной земляники в Краснодарском крае : методические рекомендации / [составитель В. Н. Подорожный] ; РАСХН, Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, Крымская опытно-селекционная станция. Крымск, 2013. 42 с. : ил., табл.

2014

Еремин В. Г., Еремина О. В. Интенсивная технология выращивания плодов персика и нектарина : (научно-практические рекомендации) / Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, Крымская опытно-селекционная станция. Крымск, 2014. 24 с., [2] л. цв. ил., табл.

Интенсивная технология выращивания плодов черешни : методические рекомендации / [составитель О. В. Еремина] ; Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, Крымская опытно-селекционная станция. Крымск, 2014. 59 с. : ил., цв. ил., табл.

Клональное микроразмножение косточковых плодовых культур и их подвоев : научно-методические рекомендации / [составители: Н. И. Медведева, В. Н. Подорожный, Н. Н. Коваленко] ; Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, Крымская опытно-селекционная станция. Крымск, 2014. 23 с. : ил., табл.

Технология выращивания томата в Северо-Кавказском регионе : методические рекомендации / [составитель Б. С. Новиков] ; Северо-Кавказский зональный научно-исследовательский институт садоводства и виноградарства, Крымская опытно-селекционная станция. Крымск, 2014. 43, [1] с., [2] л. цв. ил., табл.

Шипилина Л. Ю., Чухина И. Г. Методические рекомендации по полевой практике по ботанике / Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова. Санкт-Петербург, 2014. 100 с.

2015

Ермолаева Л. В., Хмелинская Т. В. Изучение устойчивости моркови к вредителям : методические указания / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2015. 18, [1] с. : ил., табл.

Изучение и сохранение мировой коллекции ржи : методические указания / составители: В. Д. Кобылянский, И. В. Сафонова, О. В. Солодухина, Н. И. Аниськов ; под редакцией В. Д. Кобылянского ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Изд. 2-е, доп. и перераб. Санкт-Петербург : ВИР, 2015. 43, [1] с. : табл., ил.

Использование антибиотиков в культуре *in vitro* : методические рекомендации / составитель Ю. В. Чесноков ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2015. 47 с. : табл.

Романенко А. А., Кильдюшкин В. М., Лавренчук Н. Ф., Ширинян М. Х., Солдатенко А. Г., Кулик В. А., Животовская Е. Г., Левштанов С. А., Кузнецова Т. Е., Бойко А. П. Рекомендации по применению дефеката для известкования кислых почв Краснодарского края / Краснодарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. П.П. Лукьяненко. Краснодар : ЭДВИ, 2015. 39 с.

2016

Беседин А. Г., Путина О. В. Технология выращивания гороха овощного селекции филиала Крымская ОСС ВИР в Краснодарском крае : методические рекомендации / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Филиал Крымская опытно-селекционная станция ВИР. Крымск, 2016. 28 с.

Егги Э. Э. Идентификация сортов козлятника восточного (*Galega orientalis* Lam.) с использованием электрофореза 11S глобулина семян : методические указания / под редакцией И. П. Гаврилюк ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2016. 23 с. : ил., табл.

Использование культуры зародышей *in vitro* для получения раносозревающих сортов черешни и ее отдаленных гибридов : методические указания / составители: Н. Н. Коваленко, Н. В. Поливарова ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Филиал Крымская опытно-селекционная станция ВИР. Крымск, 2016. 39 с.

Хатефов Э. Б. Методы создания и идентификации тетраплоидной кукурузы / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург, 2016. 27 с.

Юшев А. А., Сорокин А. А., Тихонова О. А., Орлова С. Ю., Кислин Е. Н., Радченко О. Е., Пупкова Н. А., Шлявас А. В. Коллекция генетических ресурсов плодовых и ягодных растений : сохранение, пополнение, изучение : методические указания / под редакцией: А. А. Юшева, И. Г. Чухиной ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2016. 87 с. : табл.

2017

Гаврилова В. А., Конькова Н. Г., Кутузова С. Н., Гавриленко Т. А., Пендинен Г. И., Дунаева С. Е., Подольная Л. П., Петросян И., Фань Я. С., Цзэн С. Ц., Чжан Ц. Ч., Шэнь Г. Методические указания по возделыванию кок-сагыза (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) = Kok-saghyz (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) cultivation guidelines / под научной редакцией: С. Н. Кутузовой (русская часть текста); Фань Янь Синь, Цзэн Сян Цзюнь, Чжан Цзи Чуань, Шэнь Гуан (китайская часть текста); Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2017. 70 с. : ил., табл., цв. ил. Издание на русском и китайском языках.

Дунаева С. Е., Пендинен Г. И., Антонова О. Ю., Швачко Н. А., Ухатова Ю. В., Шувалова Л. Е., Волкова Н. Н., Гавриленко Т. А. Сохранение вегетативно размножаемых культур *in vitro* и крио коллекциях = Preservation of vegetatively propagated crops *in vitro* and cryo collections : методические указания / под научной редакцией Т. А. Гавриленко; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. 2-е изд., расширенное и доп. Санкт-Петербург : ВИР, 2017. 71 с., [4] л. ил.

Подорожный В. Н. Научная организация производства товарной малины в крестьянских и фермерских хозяйствах Краснодарского края : методические рекомендации / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР. Крымск : Просвещение-Юг, 2017. 47 с.

2018

Анисимова И. Н., Алпатьева Н. В., Абдуллаев Р. А., Карабичина Ю. И., Кузнецова Е. Б. Скрининг генетических ресурсов растений с использованием ДНК-маркеров: основные принципы, выделение ДНК, постановка ПЦР, электрофорез в агарозном геле = Screening of plant genetic resources with the use of DNA markers: basic principles, DNA isolation, PCR setup, agarose gel electrophoresis : (методические указания) / под редакцией Е. Е. Радченко; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 46, [1] с. : ил.

Вишнякова М. А., Сеферова И. В., Буравцева Т. В., Бурляева М. О., Семенова Е. В., Филипенко Г. И., Александрова Т. Г., Егорова Г. П., Янков И. И., Булынец С. В., Герасимова Т. В., Другова Е. В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение = VIR global collection of grain legume crop genetic resources: replenishment, conservation and studying : (методические указания) / под редакцией М. А. Вишняковой; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 143 с. : ил., табл.

Керв Ю. А., Сидорова В. В. Анализ и регистрация линий, сортов и гибридов кукурузы методом электрофореза зеина = Analysis and registration of maize lines, varieties and hybrids by zein electrophoresis technique : (методические указания) / под редакцией А. В. Конарева; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 27, [1] с. : ил., цв. ил.

Хатефов Э. Б., Матвеева Г. В. Оценка образцов кукурузы на устойчивость к холоду = Evaluation of maize accessions for cold resistance : методические указания / под научной редакцией И. А. Косаревой; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 14, [1] с. : цв. ил.

Хатефов Э. Б., Матвеева Г. В. Получение редиплоидных линий кукурузы = Development of rediploid maize lines : (методические указания) / под редакцией Э. Б. Хатефова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 22, [1] с. : ил., табл., цв. ил.

2019

Алпатьева Н. В., Антонова О. Ю., Радченко Е. Е., Абдуллаев Р. А., Карабичина Ю. И., Анисимова И. Н. ПЦР-диагностика вредных организмов гуара = PCR diagnostics for harmful organisms guar : методические указания / под научной редакцией Е. К. Потокиной; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2019. 35, [1] с. : ил., табл.

Корнюхин Д. Л., Артемьева А. М., Абремская С. С. Методы повышения всхожести и энергии прорастания семян сельскохозяйственных культур семейства Brassicaceae Burnett = Methods of raising srrd germination rate and germination energy in crops from the family Brassicaceae Burnett : методические указания / под редакцией А. М. Артемьевой; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2019. 16 с. : ил., табл.

Кузьмин С. В., Медведев А. В., Бухаров А. Ф. Гибридное семеноводство кабачка при свободном опылении, основанное на применении этиленпродуцентов : методические рекомендации / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР, Федеральный научный центр овощеводства, Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства (ВНИИО) – филиал ФНЦО. Крымск : Просвещение-Юг, 2019. 21 с.

Романова О. И. Сохранение коллекций перекрестноопыляющихся культур (гречиха) = Preserving collections of cross-pollinated crops (buckwheat) : методические указания / под редакцией И. Г. Лоскутова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2019. 20 с. : табл.

Смекалова Т. Н., Озерская Т. М., Дзюбенко Н. И. Методические указания по проведению экспедиционных обследований ВИР = Guidelines for VIR's plant explorations / под редакцией Л. В. Аверьянова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2019. 43, [1] с.

Хатефов Э. Б., Матвеева Г. В. Определение потенциальной зерновой продуктивности початков и фертильности пыльцы растений автотетраплоидной кукурузы = Assessing potential grain productivity per ear and pollen fertility in autotetraploid maize plants : методические указания / под редакцией Э. Б. Хатефова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2019. 15, [1] с. : цв. ил.

Хатефов Э. Б., Матвеева Г. В. Селекция многопочатковой кукурузы с синхронным цветением початков = Breeding of multiple-ear maize with flowering synchrony in ears : методические указания / под редакцией Э. Б. Хатефова; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2019. 23, [1] с. : цв. ил.

2020

Еремина О. В. Современное интенсивное производство культуры черешни : методические рекомендации / под редакцией А. В. Солонкина ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР. 2-е изд., перераб. и доп. Крымск : Просвещение-Юг, 2020. 117 с.

Коваленко Н. Н., Поливарова Н. В., Гладких С. В. Получение межвидовых гибридов косточковых плодовых культур биотехнологическими методами : научно-методическое пособие / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР. Краснодар : Просвещение-Юг, 2020. 44 с.

Пискунова Т. М. Изучение и поддержание в живом виде мировой коллекции тыквы, кабачка, патиссона, крукнека = Studying the global collection of pumpkin, marrow, pattypan and crookneck squashes and its maintenance in viable conditions : (методические рекомендации) / под редакцией А. М. Артемьевой ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2020. 47 с. : табл.

Хатефов Э. Б., Асадова Г. М. Создание дигиплоидных линий кукурузы = Development of dihaploid maize lines : (методические указания) / под редакцией Е. Е. Радченко ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2020. 44 с. : цв. ил., табл.

2021

Беседин А. Г., Путина О. В. Конвейер сортов гороха овощного селекции Крымской ОСС филиала ВИР и технология их выращивания в Краснодарском крае : методические рекомендации / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР. Краснодар : Просвещение-Юг, 2021. 39 с.

Соколова Д. В. Выращивание свеклы столовой с целью выделения бетанина в условиях Ленинградской области РФ = Table beet cultivation for the extraction of betanin in the environments of Leningrad province, Russian Federation : (методические рекомендации) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2021. 43, [1] с. : ил., цв. ил., табл.

2022

Изучение коллекции генетических ресурсов ягодных культур МОС ВИР : методические указания / составители: Л. Г. Семенова, Е. А. Добренков ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, Майкопская опытная станция – филиал ВИР. Майкоп : Магарин О. Г., 2022. 61 с. : ил., табл.

Щенникова И. Н., Шешегова Т. К., Кокина Л. П., Зайцева И. Ю., Ковалева О. Н. Биоресурсы ячменя ярового для селекции новых коммерческих сортов в условиях Волго-Вятского региона : методическое руководство. Киров : Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 2022. 28 с.

**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*
Корректурa: *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 28.09.2023. Формат 70×100¹/₈.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 30,75. Тираж 100 экз. Заказ № 380/1.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР),
редакционно-издательский сектор ВИР

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42

Индивидуальный предприниматель Юшкевич Галина Викторовна
192286, г. Санкт-Петербург, Альпийский пер., д. 45

