

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

**ТРУДЫ
ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ,
ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ, том 185
выпуск 1**

(основаны Р. Э. Регелем в 1908 г.)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2024**

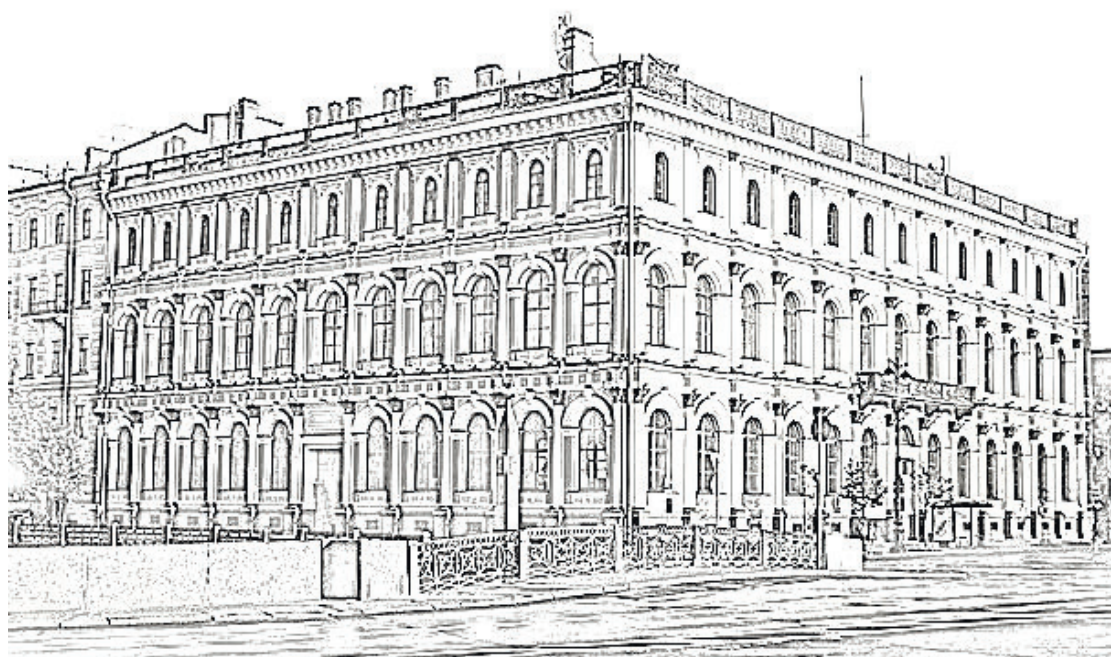
**PROCEEDINGS
ON APPLIED BOTANY, GENETICS
AND BREEDING, vol. 185
issue 1**

(founded by Robert Regel in 1908)

**ST. PETERSBURG
2024**

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)



Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции

2024 Том 185 выпуск 1

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1
<https://elpub.vir.nw.ru>

Научный рецензируемый журнал
Издается с 1908 г.



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)

Зуев Евгений Валерьевич, канд. с.-х. 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)

Солодухина 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 Ирина 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

2024 Volume 185 issue 1

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1
<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

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

Editorial council

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

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

Andre Jean Berville, Dr., France

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

Andreas Börner, Dr., Germany

Axel Diederichsen, Dr., Canada

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

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

Nikolai Friesen, Dr. habil., Professor, Germany

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

Karl Hammer, Dr., Professor, Germany

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

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

Republic of Belarus

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

Alexey I. Morgounov, 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

СОДЕРЖАНИЕ

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Худоногова Е.Г., Половинкина С.В. Онтогенетические особенности <i>Saposhnikovia divaricata</i> (Turcz.) Schischk. при интродукции в условиях Предбайкалья	9
Шипилина Л.Ю., Хмелинская Т.В. Коллекции дикорастущей <i>Daucus carota</i> L., сохраняющиеся в ВИР	16

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Белозерова А.А., Базюк Д.А., Боме Н.А. Комплексная оценка мутантов ярового ячменя по элементам урожайности	27
Григорьев А.В., Пилькевич Р.А., Лукичева Л.А., Губанова Т.Б., Горина В.М. Особенности водного режима и фотосинтеза гибридных форм алычи в условиях суховея	39
Иващенко А.Д., Шерстюкова Т.П., Хасбиуллина О.И., Рогозина Е.В. Проявление селекционно ценных признаков у межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР в условиях Камчатского края	51
Киселева Г.К., Ульяновская Е.В., Схаляхо Т.В., Караваяева А.В. Устойчивость яблони к стрессам зимнего периода в условиях Краснодарского края	64
Петров В.С., Мarmorштейн А.А., Панкин М.И., Цику Д.М., Ларькина М.Д. Метеорологические условия для вегетации перспективных сортов винограда в Черноморской агроэкологической зоне виноградарства	74
Петрова Л.В., Новикова Л.Ю., Алексеева А.В., Лоскутов И.Г. Изменение климата и урожайность овса посевного (<i>Avena sativa</i> L.) в Якутии	86
Попов В.С., Саликова А.В., Перчук И.Н., Конькова Н.Г., Егорова Г.П., Вишнякова М.А., Шеленга Т.В. Экспресс-оценка основных показателей хозяйственной ценности в образцах муки люпина узколистного с помощью ИК-спектроскопии	99
Попов В.С., Шеленга Т.В., Ковалева О.Н., Хорева В.И. Методические аспекты использования БИК-спектрометрии для определения биохимических показателей зерна ячменя	109

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Гараева Н.Ш., Пономарев С.Н., Пономарева М.Л. Адаптивные особенности образцов озимой тритикале коллекции ВИР	118
Лоскутов И.Г., Блинова Е.В., Новикова Л.Ю. Изучение разнообразия алюмоустойчивости образцов овса из коллекции ВИР	129

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Михайлова А.С., Соколова Д.В., Швачко Н.А., Попов В.С., Хлесткина Е.К. Аллельные различия ключевых генов биосинтеза беталаинов у контрастных по окраске корнеплода образцов свеклы столовой коллекции ВИР	139
Орловская О.А., Вакула С.И., Хотылева Л.В., Кильчевский А.В. Состав высокомолекулярных субъединиц глютеина и качество клейковины у линий пшеницы с чужеродным генетическим материалом	152

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

Архестова Д.Х., Якутлова А.А., Хаудов А.Д., Сокурова Л.Х., Кулемина Т.В. Эффективность ISSR-маркеров для выявления variability генома образцов проса посевного (<i>Panicum miliaceum</i> L.)	161
--	-----

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Зотеева Н.М., Пороховинова Е.А., Фатеев Д.А., Чалая Н.А. Устойчивость листьев и клубней диких видов картофеля к <i>Phytophthora infestans</i> и взаимосвязь этих признаков	172
---	-----

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Бурмистров Н.А., Жиганова Е.С., Соловова Н.С. Экологическая адаптивность сортов яровой твердой пшеницы (<i>Triticum durum</i> Desf.) саратовской селекции	184
---	-----

ОБЗОРЫ

Агаханов М.М., Багмет Л.В., Тихонова Н.Г., Ерастенкова М.В., Кислин Е.Н., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К. Коллекция ВИР и гербарий ВИР (WIR) для сохранения, расширения и использования генетического разнообразия винограда	191
Зеленский Г.Л., Зеленская О.В. Селекция риса на повышение его продуктивности (обзор)	212
Шергина А.А., Курина А.Б. Андрогенез и гиногенез в культуре томата (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) <i>in vitro</i>	224

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

Соколова Д.В., Пискунова Т.М. Буренин Валентин Иванович. Вся жизнь посвящена науке	233
Выборочный список «Каталогов мировой коллекции ВИР» по картофелю за 1963–2018 гг.	241

CONTENTS

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

Khudonogova E.G., Polovinkina S.V. Ontogenetic features of <i>Saposhnikovia divaricata</i> (Turcz.) Schischk. introduced into the environments of the Cis-Baikal Region	9
Shipilina L.Yu., Khmelinskaya T.V. Collections of the wild <i>Daucus carota</i> L. preserved at VIR	16

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Belozerova A.A., Bazyuk D.A., Bome N.A. Comprehensive evaluation of spring barley mutants according to their yield components	27
Grigoriev A.V., Pilkevich R.A., Lukicheva L.A., Gubanov T.B., Gorina V.M. Features of the water regime and photosynthesis in hybrid forms of cherry plum under the dry wind season conditions	39
Ivashchenko A.D., Sherstyukova T.P., Khasbiullina O.I., Rogozina E.V. Breeding value of potato hybrid clones from the VIR collection revealed in the environments of Kamchatka Territory	51
Kiseleva G.K., Ulyanovskaya E.V., Skhalyakho T.V., Karavaeva A.V. Winter stress resistance of apple tree under the conditions of Krasnodar Territory	64
Petrov V.S., Marmorshtein A.A., Pankin M.I., Tsiku D.M., Larkina M.D. Meteorological conditions for growing promising grape cultivars in the Black Sea agroecological zone of viticulture	74
Petrova L.V., Novikova L.Yu., Alekseeva A.V., Loskutov I.G. Climate change and crop yield of oats (<i>Avena sativa</i> L.) in Yakutia	86
Popov V.S., Salikova A.V., Perchuk I.N., Konkova N.G., Egorova G.P., Vishnyakova M.A., Shelenga T.V. Rapid assessment of the main economic value indicators in lupine flour samples using infrared spectroscopy	99
Popov V.S., Shelenga T.V., Kovaleva O.N., Khoreva V.I. Methodological aspects of using NIR spectroscopy to assess biochemical indicators in barley grain	109

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

Garaeva N.Sh., Ponomarev S.N., Ponomareva M.L. Adaptive features of winter triticale accessions from the VIR collection	118
Loskutov I.G., Blinova E.V., Novikova L.Yu. Evaluation of aluminum tolerance diversity in <i>Avena sativa</i> L. from the VIR collection	129

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Mikhailova A.S., Sokolova D.V., Shvachko N.A., Popov V.S., Khlestkina E.K. Allelic differences in the key genes of betalain biosynthesis in table beet accessions with contrasting root color from the VIR collection	139
Orlovskaya O.A., Vakula S.I., Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V. Composition of high-molecular-weight glutenin subunits and gluten quality in wheat lines with alien genetic material	152

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

Arkhestova D.Kh., Yakhutlova A.A., Khaudov A.D., Sokurova L.Kh., Kulemina T.V. Effectiveness of ISSR markers for detecting genomic variability in <i>Panicum miliaceum</i> L. accessions	161
--	-----

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

- Zoteyeva N.M., Porokhvinova E.A., Fateev D.A., Chalaya N.A.**
Leaf and tuber resistance to *Phytophthora infestans* and relationship between these traits in wild potato species172

BRIEF REPORTS

- Gaponov S.N., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Tsetva I.S., Milovanov I.V., Burmistrov N.A., Zhiganova E.S., Solovova N.S.**
Environmental adaptability of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars developed in Saratov184

SURVEYS

- Agakhanov M.M., Bagmet L.V., Tikhonova N.G., Erastenkova M.V., Kislin E.N., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K.**
The plant germplasm and herbarium (WIR) collections maintained at VIR
as contributors to grape genetic diversity conservation, expansion and utilization191

- Zelensky G.L., Zelenskaya O.V.**
Rice breeding for higher crop productivity (a review)212

- Shergina A.A., Kurina A.B.**
Androgenesis and gynogenesis in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) *in vitro*224

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

- Sokolova D.V., Piskunova T.M.**
Valentin I. Burenin. The entire life was dedicated to science233

- Selective list of the Catalogues of the VIR Global Collection on potato published in 1963–2018**241

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья

УДК 581.522

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-9-15



Онтогенетические особенности *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. при интродукции в условиях Предбайкалья

Е. Г. Худогова, С. В. Половинкина

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Иркутская область, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Геннадьевна Худогова, doky2015@yandex.ru

Актуальность. Род Сапожниковия (*Saposhnikovia* Schischk.) – монотипный род, свойственный югу Восточной Сибири, Дальнему Востоку, Монголии, Маньчжурии, Корею. На территории Байкальской Сибири, в Забайкалье произрастает сапожниковия растопыренная (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk.), в Предбайкалье вид не встречается. Корни, трава и плоды *S. divaricata* применяются в восточной медицине в качестве противовоспалительного, жаропонижающего средства. Вид является перспективным для введения в отечественную медицинскую практику. В настоящее время вид стремительно сокращает свой ареал из-за неконтролируемого сбора корней для лечебных целей. Решением проблемы рационального использования и сохранения вида являются интродукционные исследования.

Материалы и методы. Изучение онтогенетических особенностей *S. divaricata* проводилось на территории опытного поля Иркутского государственного аграрного университета в течение трех лет. Определение возрастного состава вида проводили в соответствии с методикой Т. А. Работнова, учитывали работы Л. Б. Заугольной с соавторами и Е. Л. Нухимовского.

Результаты и выводы. *S. divaricata* – надземно-двусемядольное полурозеточное растение; лабораторная всхожесть семян – 87–90%, полевая всхожесть – 85–88%. Особи в первый год жизни проходят стадии прегенеративного периода, на зимний период уходят в виргинильном состоянии. В генеративное состояние на второй год жизни вступает около 6%, на третий год – все особи. Максимальная масса корней зафиксирована у виргинильных растений второго года жизни (12,48 г). *S. divaricata* – среднеперспективный вид для интродукции в условиях Предбайкалья.

Ключевые слова: проростки, всходы, ювенильные особи, виргинильные (вегетативные) особи, генеративные особи, масса корней

Благодарности: работа выполнена в рамках темы научно-исследовательской работы «Биология, экология и продуктивность полезных растений в условиях Восточной Сибири», № АААА-А19-119032090027-8.

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

Для цитирования: Худогова Е.Г., Половинкина С.В. Онтогенетические особенности *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. при интродукции в условиях Предбайкалья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):9-15. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-9-15

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-9-15

Ontogenetic features of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. introduced into the environments of the Cis-Baikal Region

Elena G. Khudonogova, Svetlana V. Polovinkina

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk Province, Russia

Corresponding author: Elena G. Khudonogova, doky2015@yandex.ru

Background. *Saposhnikovia* (*Saposhnikovia* Schischk.) is a monotypic genus occurring in the south of Eastern Siberia, the Far East, Mongolia, Manchuria, and Korea. *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. grows in Baikal Siberia and Transbaikalia, but does not occur in the Cis-Baikal Region. Roots, grass and fruits of *S. divaricata* are used in Oriental medicine as an anti-inflammatory and antipyretic agent. The species is promising for introduction into domestic medical practice. Currently, its area of distribution is rapidly shrinking due to the uncontrolled collection of roots for medicinal purposes. Plant introduction studies can solve the problem of sustainable utilization and conservation of the species.

Materials and methods. Ontogenetic features of *S. divaricata* were studied in the experimental field of Irkutsk State Agrarian University for three years. The age composition of the species was analyzed according to T. A. Rabotnov's methodology, taking into account the publications by L. B. Zaugolnova with coauthors and E. L. Nukhimovsky.

Results and conclusions. *S. divaricata* is an aboveground two-seeded semi-deciduous plant; its seed germination rate is 87–90% in the laboratory, and 85–88% in the field. Its plants in the first year of their life pass through the stages of the pregenerative period and proceed into the winter season in a virginal state. About 6% of the plants enter the generative state in the second year of life, and all the rest do it in the third year. The highest root weight was recorded in virginal plants in their second year of life (12.48 g). *S. divaricata* is a species of mediocre prospects for introduction into the environments of the Cis-Baikal Region.

Keywords: germinants, juvenile plants, virginal (vegetative) plants, generative plants, root weight

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the research topic "Biology, ecology and productivity of useful plants in Eastern Siberia", No. AAAA-A19-119032090027-8.

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

For citation: Khudonogova E.G., Polovinkina S.V. Ontogenetic features of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. introduced into the environments of the Cis-Baikal Region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):9-15. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-9-15

Введение

Сапожниковия растопыренная (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk.) – многолетний гемикриптофит, ксерофит, относится к роду Сапожниковия (*Saposhnikovia* Schischk.), семейству Сельдерейные (Apiaceae Lindl. [Umbelliferae Juss.]). Род *Saposhnikovia* – монотипный род, свойственный югу Восточной Сибири, Дальнему Востоку, Монголии, Маньчжурии, Корею. В Восточной Сибири произрастает на территории Забайкалья по луговым каменистым степям и на залежных землях (Banshchikova et al., 2020), в Предбайкалье не встречается.

Взрослые особи *S. divaricata* достигают высоты 30–80 см, стебли растения одиночные, ребристые, от основания ветвистые, боковые побеги восходящие, почти равные главному стеблю, иногда превышающие главный стебель в длину. Прикорневые листья дважды/трижды перистораздельные или дважды/трижды перисторазсеченные (длиной 6–20 см, шириной 2–4 см); листья многочисленные, на коротких сплюснутых, при основании расширенных черешках. Корень вертикальный, толстый (толщиной до 1,5–2 см). Зонтики многочисленные, образующие на верхушке щитковидную метелку. Плоды – яйцевидные двураздельные семянки (длина семянок – 7–8 мм, ширина – 3–4 мм) с продольными выступающими ребрышками (Shishkin, 1951; Budantsev, 2010).

В растении содержатся эфирные масла, дубильные вещества, полиацетиленовые соединения, витамин Е, хромоны (цимифугин, гамаудол и их гликозиды), 5-О-метилвисамминол и гликозиды (перв-О-глюкозилцимифугин, втор-О-глюкозилгамаудол, 4'-О-β-D-глюкозил-5-О-метилвисамминол), кумарины (скополетин, бергаптен, изоимператорин, мармезин, декурсинол, оксипеуцеданин гидрат и (-)-прерупторин В), высшие жирные кислоты (линолевая, пальмитиновая), флавоноиды, полисахариды. *S. divaricata* издавна применяется в восточной медицине в качестве эффективного противовоспалительного средства для лечения ревматизма, артралгии, генерализованных и головных болей, при простудных заболеваниях, инсультах, аллергических ринитах, лихорадке, в качестве анальгезирующего, противопаркинсонического средства (Urbağova, 2019). Экспериментальные исследования показали, что полисахариды, полученные из *S. divaricata*, могут подавлять рак молочной железы (Ding et al., 2020). Вид является перспективным для введения в отечественную медицинскую практику. Высокая биологическая активность *S. divaricata*, изученная в Забайкалье и в Монголии, свидетельствует о необходимости дальнейшего всестороннего изучения вида (Urbağova, 2019; Batsukh et al., 2020).

На юге восточной части Сибири и на Дальнем Востоке естественные популяции вида в настоящее время находятся под угрозой исчезновения из-за возросших заготовок корней для фармацевтических целей, в связи с чем интродукционные исследования, направленные на сохранение этого ценного растения, являются особенно актуальными. Результаты изучения первичной интродукции *S. divaricata* в Центральном сибирском ботаническом саду СО РАН свидетельствуют о том, что потенциальная семенная продуктивность особи составляет более 45 тысяч семязачатков (процент семенификации – 45%). Авторы пришли к выводу, что *S. divaricata* в условиях лесостепной зоны Сибири является среднеперспективным видом для интродукции (Elisafenko et al., 2021).

Интродукция растений позволит сохранить биоразнообразие, расширить видовой состав ценных лекар-

ственных растений, придать искусственным растительным сообществам большую устойчивость, высокую биологическую продуктивность и обеспечить сохранность экологической среды (Korelina, Batakova, 2021). Основой интродукции является изучение адаптации видов к условиям среды (Khudonogova et al., 2019), прохождения вида к образованию плодов и семян, в связи с чем изучение онтогенетических особенностей новых и перспективных для медицины растений в условиях конкретного региона является актуальным. Исследования по изучению онтогенеза и морфологических параметров *S. divaricata* первого года жизни на территории Иркутского района впервые были начаты сотрудниками Иркутского государственного аграрного университета (ГАУ) в 2020 г. (Polovinkina, 2021) и продолжены авторами в 2021–2022 гг. Результаты исследований освещены в этой работе.

Цель исследования – изучение онтогенетических особенностей *S. divaricata* при выращивании в культуре в условиях Предбайкалья.

Материалы и методы

Изучение онтогенетических особенностей *S. divaricata* проводили на территории опытного поля Иркутского ГАУ (Иркутский район) в период вегетации растений в течение трех лет (2020–2022). Почвы серые, близкие к нейтральным, лесные (содержание гумуса – 3–5%, подвижного азота – 20–40 мг/кг, фосфора – 10–15 мг/100 г, калия – 10–15 мг/100 г) (Ryabinina, 2012). Сбор семян *S. divaricata* осуществляли естественных популяций вида в Забайкалье (Читинская область). Посев семян проводили в начале мая широкорядным способом в четырехкратной повторности.

Определение возрастного состава ценопопуляций полезных растений проводили в соответствии с методикой Т. А. Работнова (Rabotnov, 1950), при этом учитывали критерии выделения возрастных состояний и особенности хода онтогенеза у растений различных биоморф, предложенные Л. Б. Заугольной с соавторами (Zaugolnova et al., 1988), а также принципы и методы изучения возрастной структуры ценопопуляций Е. Л. Нухимовского (Nukhimovskiy, 1997).

Результаты и обсуждение

Климат района исследования резко континентальный, самый холодный месяц – январь (до минус 50°C), самый теплый месяц – июль (около +17,7°C). Среднегодовое количество осадков составляет 430–600 мм. Длительность вегетационного периода – 148 дней (Berkin, 1993).

Лабораторная всхожесть семян *S. divaricata* составляет 87–90%, семена не требуют предварительной скарификации или стратификации, в лабораторных условиях семена прорастают на 9–15-й день. Масса 1000 семян – 3 г. В полевых условиях всхожесть семян также довольно высокая (85–88%), но не дружная – семена всходят на 10–20-й день. У растений формируется проросток с двумя семядольными листьями, стержневой корешок длиной 2,3–5,5 см, семядоли линейные, узкоэллиптические (11–15 мм длиной и 1,8–3,0 мм шириной), постепенно переходящие в черешки, на верхушке заостренные. У всходов появляются 1–3 настоящих листа (длиной 1,5–2,6 мм, шириной 0,5–0,7 мм), рассеченность листовой пластинки

у последующих листьев усложняется, появляются 3-4 тройчатораздельных листа (длиной 4,0–5,5 мм, шириной 0,9–1,3 мм) (рисунок).

Семядольные листья желтеют и засыхают, растение постепенно переходит в ювенильное состояние, формируется компактная бессемядольная вегетативная розетка или розетка из дважды/трижды перистых черешковых листьев в количестве 6-7 штук. Стержневый корень увеличивается до 12–16 см. Нижняя часть главного побега нарастает моноподиально. Продолжительность ювенильного состояния – 16–31 день.

Имматурное состояние характеризуется формированием бессемядольных розеточных особей. Количество перистораздельных листьев в розетке увеличивается до 8–12 и более (длиной от 12 до 25 см, шириной 5–10 см). От стержневого корня начинают отрастать боковые корешки, стержневой корень увеличивается в длину до 21 см, 0,2–0,5 см в толщину. Продолжительность имматурного состояния – до 45 дней.

В виргинильном (вегетативном) состоянии у растений формируется розеточный кустистый корневищный ризокормус (Nukhimovsky, 1997) и крупные многочисленные дважды/трижды перисторассеченные листья. Длина корня увеличивается до 12–30 см, диаметр корня – до 1,0–1,3 см. Молодые вегетативные особи *S. divaricata* первого года жизни уходят в зиму.

Вегетация растений наступает в начале мая. На второй год жизни из виргинильного в генеративное состоя-

ние переходят немногие особи (около 6%), образуя унурепродуктивный полурозеточный акронекротный монокуормус (Nukhimovsky, 1997). Остальные особи остаются в вегетативном состоянии.

В генеративном состоянии у растений формируются одиночные стебли: от основания растопыренно-ветвистые, голые, ребристые, высотой 50–70 см. Прикорневые листья – на сплюснутых черешках, при основании расширенных во влагалище; листовые пластинки 6–22 см длиной и 1,6–5 см шириной, дважды/трижды перистые, верхние доли листа сидячие, перистораздельные, нижние доли листа черешковые, перисторассеченные. Стеблевые листья похожи на прикорневые, но более мелкие, с более узкими долями. Главный побег заканчивается зонтиком, зонтики соцветий белые, мелкие, многочисленные, с 6–12 неодинаковыми по длине лучами, обвертки нет, зонтики 4–10-цветковые, обверточки – из 4–8 плечатых ланцетовидных листочков. Корень вертикальный, на корневой шейке видны многочисленные бурые прикорневые листья или их остатки.

На третий год жизни все особи вступают в генеративное состояние, формируют многочисленные побеги со щитковидными зонтиками (длиной 2–6 см), цветение наблюдается в июле, плодоношение происходит в августе – начале сентября, процент семенификации вида составляет 20–25%. В генеративном состоянии у особей второго-третьего годов жизни наблюдается угнетение корневой системы, рост корней приостанавливается,

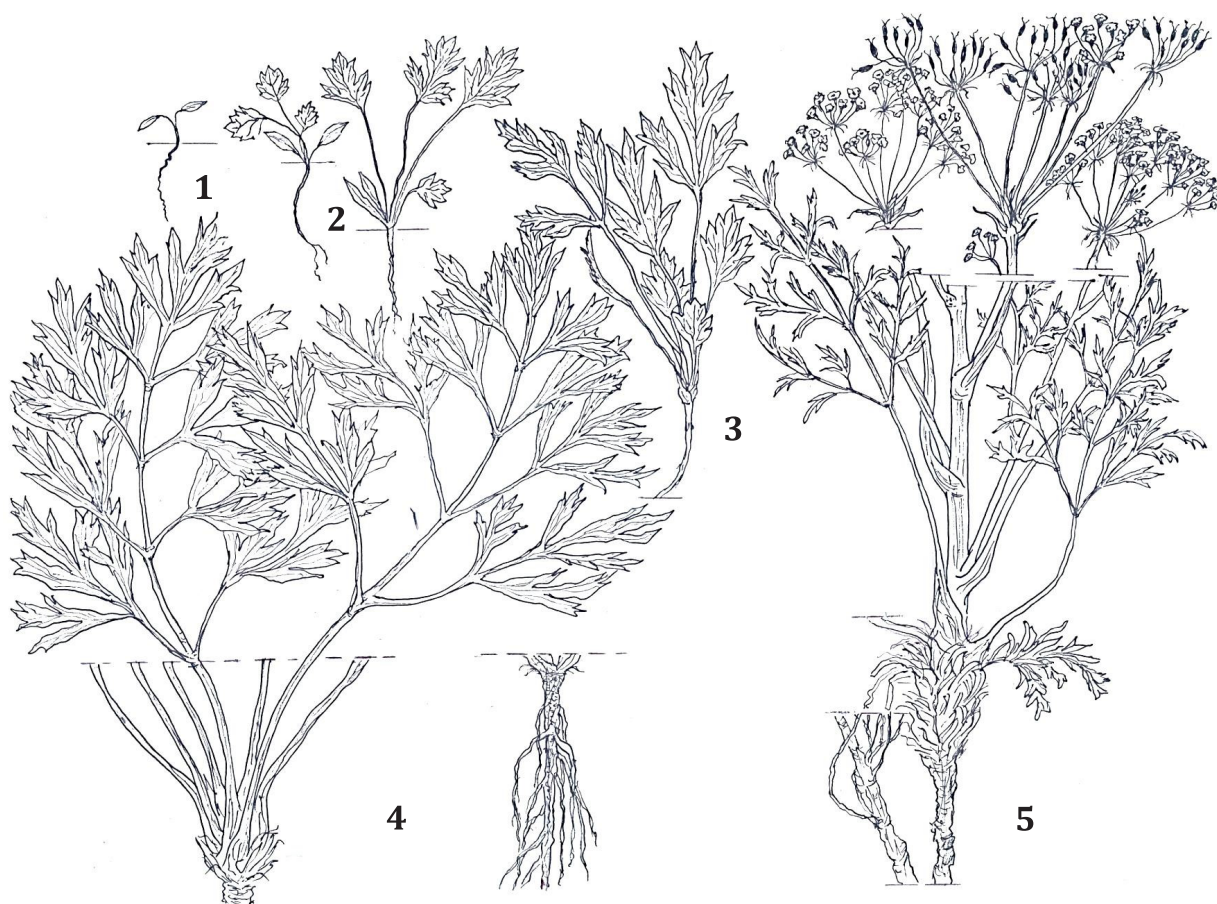


Рисунок. Онтогенез *S. divaricata* (Turcz.) Schischk. в условиях культуры в Предбайкалье: 1 – проростки; 2 – всходы; 3 – ювенильные особи; 4 – виргинильные (вегетативные) особи; 5 – генеративные особи

Figure. Ontogenesis of *S. divaricata* (Turcz.) Schischk. cultivated under the Cis-Baikal conditions: 1 – germinant; 2 – seedling; 3 – juvenile plant; 4 – vegetative plant; 5 – generative plant

надземные побеги третьего года жизни постепенно засыхают, растение отмирает.

Для лечебных целей применяют плоды, траву и корни *S. divaricata*, однако чаще всего заготавливают корни растений (особенно популярные в медицинской практике Китая). Сбор корней вида приводит к истощению природных популяций. Результаты исследований параметров и массы корней приведены в таблице. Масса корней виргинильных особей второго года жизни составляет 12,48 г (возд.-сух.), у генеративных растений наблюдается угнетение корневой системы, вес корней по сравнению с вегетативными особями уменьшается в 2,8 раз (4,5 г). Масса травы (надземной части) составляет 3,48 ± 0,96 г (возд.-сух.) с одной особи в первый год жизни; 23,09 ± 2,47 г (возд.-сух.) на второй год и 26,5 ± 8,12 г (возд.-сух.) на третий год жизни.

особи (от 50 дней до 3 лет). В генеративное состояние на второй год жизни вступает незначительный процент особей (около 6%), на третий год вступают все особи. Максимальная масса корней зафиксирована у виргинильных (вегетативных) особей второго года жизни (12,48 г), надземной массы – у особей третьего года жизни (26,5 г). Угнетение корневой системы генеративных особей может быть связано с биологическими особенностями монокарпических видов. Результаты изучения онтогенетических и биоморфологических особенностей вида свидетельствуют о том, что *S. divaricata* можно отнести к среднеперспективным для интродукции в условиях лесостепной зоны Предбайкалья (в культуре вид сохраняется до трех лет, сбор корней возможен на второй год жизни, на третий год растение формирует плоды и семена).

Таблица. Масса корней *Saposhnikovia divaricate* (Turcz.) Schischk.

Table. Root weight of *Saposhnikovia divaricate* (Turcz.) Schischk.

Возрастные состояния	Длина главного корня, см	Диаметр корней, см	Масса корней (одной особи), г (возд.-сух.)
Виргинильные особи первого года жизни (2020 г.)	10,93 ± 0,38	0,40 ± 0,03	1,15 ± 0,55
Виргинильные особи второго года жизни (2021 г.)	21,14 ± 2,63	1,57 ± 0,42	12,48 ± 1,80
Генеративные особи (2021 г.)	13,60 ± 1,45	0,52 ± 0,09	4,50 ± 0,66
Генеративные особи (2022 г.)	13,82 ± 1,90	0,50 ± 0,06	4,51 ± 0,74

Примечание: M ± m – среднее значение; «±» – ошибка среднего
Note: M ± m – mean value; “±” – error of the mean

S. divaricata – многолетний монокарпик, типичный ксерофит, жизненный цикл в условиях культуры Предбайкалья составляет 3 года, в первый год жизни вид проходит ювенильную и иматурную стадии развития, в зимовку уходит в вегетативное состояние; на второй год жизни большинство особей остаются в виргинильном состоянии, в генеративное состояние из них вступают около 6% растений, на третий год жизни в генеративное состояние переходят остальные особи. У всех растений, вступивших в генеративное состояние, наблюдается замедление роста корневой системы (длина корня уменьшается примерно в 1,5 раз, диаметр – в 3 раза). Масса корней виргинильных особей составляет до 12,48 г, генеративных особей – около 4,5 г. Надземная масса *S. divaricata* второго и третьего года жизни существенно не различается (23,09–26,50 г).

Заключение

S. divaricata – надземно-двусемядольное (Nukhimovskiy, 1997) полурозеточное растение, покой семян неглубокий (9–20 дней), лабораторная всхожесть семян довольно высокая – 87–90%, полевая всхожесть составляет 85–88%. Результаты интродукции *S. divaricata* в условиях культуры Предбайкалья свидетельствуют о том, что в первый год жизни, растения последовательно проходят стадии прегенеративного периода онтогенеза: всходы (проростки), ювенильные особи (длительность данного состояния – от 16 до 31 дня), иматурные особи (около 45 дней), виргинильные (вегетативные)

References / Литература

- Banshchikova E.A., Vakhnina I.L., Zhelibo T.V. *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin in the steppes of South-Eastern Transbaikalia. *Problems of Botany of South Siberia and Mongolia*. 2020;19(1):87-92. [in Russian] (Банщикова Е.А., Вахнина И.Л., Желибо Т.В. *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin в степях юго-восточного Забайкалья. *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*. 2020;19(1):87-92). DOI: 10.14258/pbssm.2020018
- Batsukh Z., Toume K., Javzan B., Kazuma K., Cai S.Q., Hayashi S. et al. Characterization of metabolites in *Saposhnikovia divaricata* root from Mongolia. *Journal of Natural Medicines*. 2021;75(1):11-27. DOI: 10.1007/s11418-020-01430-9
- Berkin N.S. Irkutsk Province (natural environments of administrative districts) (Irkutskaya oblast [prirodnye usloviya administrativnykh rayonov]). Irkutsk: Irkutsk State University; 1993. [in Russian] (Беркин Н.С. Иркутская область (природные условия административных районов). Иркутск: Иркутский государственный университет; 1993).
- Budantsev A.L. (ed.). Plant resources of Russia. Wild flowering plants, their component composition and biological activity. Vol. 3. *Fabaceae – Apiaceae* families (Rastitelnye resursy Rossii. Dikorastushchiye tsvetkovye rasteniya, ikh komponentny sostav i biologicheskaya aktivnost. T. 3. Semeystva Fabaceae – Apiaceae). St. Petersburg; Moscow: KMK; 2010. [in Russian] (Растительные ресурсы России. Дикорастущие цветковые растения, их компонентный состав и биологическая активность. Т. 3. Семейства

- Fabaceae – Ариациеae / под ред. А.Л. Буданцева. Санкт-Петербург; Москва: Товарищество научных изданий КМК; 2010).
- Ding J., Guo Y., Jiang X., Li Q., Li K., Liu M. et al. Polysaccharides derived from *Saposhnikovia divaricata* may suppress breast cancer through activating macrophages. *Oncotargets and Therapy*. 2020;13:10749-10757. DOI: 10.2147/OTT.S267984
- Elisafenko T.V., Korolyuk E.A., Yugrina P.N., Urbagarova B.M., Taraskin V.V. Results of the primary introduction of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. in the Central Siberian Botanical Garden SB RAS. *Flora and Vegetation of Asian Russia*. 2021;14(4):293-302. [in Russian] (Елисафенко Т.В., Королюк Е.А., Югрин П.Н., Урбагарова Б.М., Тараскин В.В. Результаты первичной интродукции *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischk. в Центральном сибирском ботаническом саду СО РАН. *Растительный мир Азиатской России*. 2021;14(4):293-302). DOI: 10.15372/RMAR20210404
- Khudonogova E., Tretyakova S., Mikhlyaeva A., Tungrikova V., Rachenko M. Ecological features of useful plants in natural populations of the Western Baikal Region. In: *SGEM 2019: Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (Bulgaria, 30 June – 6 July 2019)*. Vol. 19, Issue 5.2. Sofia: STEF92 Technology; 2019. p.301-306. DOI: 10.5593/sgem2019/5.2/S20.037
- Korelina V.A., Batakova O.B. Prospects for the introduction of *Symphytum asperum* Lepech. into the Far North of the Russian Federation. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):41-47. [in Russian] (Корелина В.А., Батакова О.Б. Перспективы интродукции *Symphytum asperum* Lepech. в условиях Крайнего Севера РФ. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1):41-47). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-41-47
- Nukhimovsky E.L. Biomorphology fundamentals of seed plants (Osnovy biomorfologii semennykh rasteniy). Moscow: Nedra; 1997. [in Russian] (Нухимовский Е.Л. Основы биоморфологии семенных растений. Москва: Недра; 1997).
- Polovinkina S.V. Morphological features of *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) in the environments of Irkutsk District (Morfologicheskiye osobennosti *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) v usloviyakh Irkutskogo rayona). In: *Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia: Materials of the X International Scientific-Practical Conference; Irkutsk, May 27–28, 2021*. Irkutsk: Irkutsk State Agricultural University; 2021. p.38-39. [in Russian] (Половинкина С.В. Морфологические особенности *Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) в условиях Иркутского района. В кн.: *Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: Материалы X международной научно-практической конференции; Молодежный, 27–28 мая 2021 г.* Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет; 2021. С.38-39). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_47208176_42679879.pdf [дата обращения: 20.02.2022].
- Robotnov T.A. The life cycle of perennial herbaceous plants in meadow cenoses (Zhiznenny tsikl mnogoletnikh travyanistykh rasteniy v lugovykh tsenozakh). In: *Trudy Botanicheskogo instituta im. V.L. Komarova AN SSSR. Ser. 3, Geobotanika. Вып. 6 = Proceedings of the V.L. Komarov Botanical Institute, USSR Academy of Sciences. Ser. 3, Geobotany. Issue 6*. Moscow; Leningrad: Nauka; 1950. p.7-204. [in Russian] (Работнов Т.А. Жизненный цикл многолетних травянистых растений в луговых ценозах. В кн.: *Труды Ботанического института им. В.Л. Комарова АН СССР. Сер. 3, Геоботаника. Вып. 6*. Москва; Ленинград: Наука; 1950. С.7-204).
- Ryabinina O.V. Evaluation of the gray forest soil properties for planting perennial plants. *Vestnik IrGSHA*. 2012;(52):21-28. [in Russian] (Рябинина О.В. Оценка свойств серой лесной почвы под посевами многолетних трав. *Вестник ИрГСХА*. 2012;(52):21-28).
- Shishkin B.K. (ed.). Flora of the USSR (Flora SSSR). Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1951. [in Russian] (Флора СССР / под ред. Б.К. Шишкина. Москва; Ленинград: Академия наук СССР; 1951).
- Urbagarova B.M. Pharmacognostic study of *Saposhnikovia divaricata* (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin) roots and the development of a dry extract based on them (Farmakognosticheskoye issledovaniye sapozhnikovii rastopyrennoy (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin) korney i razrabotka na ikh osnove ekstrakta sukhogo) [dissertation]. Ulan-Ude: Institute of General and Experimental Biology SB RAS; 2019. [in Russian] (Урбагарова Б.М. Фармакогностическое исследование сапожниковии растопыренной (*Saposhnikovia divaricata* (Turcz.) Schischkin) корней и разработка на их основе экстракта сухого: дис. ... канд. фарм. наук. Улан-Удэ: Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН; 2019). URL: <https://www.dissercat.com/content/farmakognosticheskoye-issledovaniye-sapozhnikovii-rastopyrennoi-saposhnikovia-divaricata-turcz> [дата обращения: 20.02.2022].
- Zaugolnova L.B., Zhukova A.A., Komarov A.S., Smirnova O.V. Plant cenopopulations (essays on population biology) (Tsenopulyatsii rasteniy [ocherki populyatsionnoy biologii]). T.I. Serebryakova, T.G. Sokolova (eds). Moscow: Nauka; 1988. [in Russian] (Заугольнова Л.Б., Жукова А.А., Комаров А.С., Смирнова О.В. Ценопопуляции растений (очерки популяционной биологии) / под ред Т.И. Серебряковой, Т.Г. Соколовой. Москва: Наука; 1988).

Информация об авторах

Елена Геннадьевна Худоногова, доктор биологических наук, заведующая кафедрой, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежовского, 664038 Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный, doky2015@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0510-7582>

Светлана Викторовна Половинкина, кандидат биологических наук, доцент, Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежовского, 664038 Россия, Иркутская обл., Иркутский р-н, п. Молодежный, polovinka@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6063-2411>

Information about the authors

Elena G. Khudonogova, Dr. Sci. (Biology), Head of a Department, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhnyy Settle., Irkutsk District, Irkutsk Province 664038, Russia, doky2015@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0510-7582>

Svetlana V. Polovinkina, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Molodezhnyy Settle., Irkutsk District, Irkutsk Province 664038, Russia, polovinka@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6063-2411>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 25.02.2022; одобрена после рецензирования 04.10.2022; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 25.02.2022; approved after reviewing on 04.10.2022; accepted for publication on 04.03.2024.

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 635.13:635.2
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-16-26



Коллекции дикорастущей *Daucus carota* L., сохраняющиеся в ВИР

Л. Ю. Шипилина, Т. В. Хмелинская

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

Автор, ответственный за переписку: Лилия Юрьевна Шипилина, l.shipilina@vir.nw.ru

Морковь – культура, которая широко возделывается по всему миру. Поэтому представляет интерес изучение разнообразия коллекции *Daucus carota* L. в ВИР, так как позволяет оценить исходный потенциал для селекционных и генетических работ. Морковь в настоящее время представлена в коллекции ВИР 3227 образцами, в том числе 236 образцами дикорастущей моркови из 33 стран. В течении семи лет (2016–2022) изучались морфологические признаки 183 образцов дикорастущей моркови, уточнена таксономическая принадлежность у 106. Материал был привезен из стран Евразийского и Африканского континентов.

В гербарии ВИР (WIR) представлены образцы моркови, собранные в различных странах в период проведения экспедиций. Всего Всероссийским институтом генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) было проведено 66 экспедиций, где одним из объектов изучения являлась дикорастущая морковь. Экспедиции охватили территорию России, Европы, Азии, Америки и Африки. В гербарии ВИР хранится 323 образца моркови; 249 из них – образцы дикорастущей *D. carota*. Представлены внутривидовые таксоны *D. carota*. Гербарий культурной моркови насчитывает 74 образца.

Изученные 106 образцов дикорастущей моркови из коллекции ВИР были определены, загербаризированы, смонтированы, внесены в базу данных WIR и инсерированы в коллекцию гербария. В результате проведенной работы в гербарии ВИР хранится 351 образец дикорастущей *D. carota*, а коллекция культурной моркови пополнилась 4 образцами, требующими проверки.

Ключевые слова: гербарий ВИР (WIR), экспедиции, дикорастущая морковь, генетические ресурсы

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM-2022-0006 «Раскрытие научного потенциала гербарной коллекции ВИР как особой специфической единицы хранения мирового агробиоразнообразия для научно обоснованной мобилизации, эффективного изучения и сохранения генофонда культурных растений и их диких родичей» и по проекту FGEM-2022-0003 «Мировые ресурсы овощных и бахчевых культур коллекции ВИР: эффективные пути раскрытия эколого-генетических закономерностей формирования разнообразия и использования селекционного потенциала».

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

Для цитирования: Шипилина Л.Ю., Хмелинская Т.В. Коллекции дикорастущей *Daucus carota* L., сохраняющиеся в ВИР. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024;185(1):16-26. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-16-26

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-16-26

Collections of the wild *Daucus carota* L. preserved at VIR

Lilija Yu. Shipilina, Tatiana V. Khmelinskaya

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

Corresponding author: Lilija Yu. Shipilina, l.shipilina@vir.nw.ru

Carrot is a crop cultivated worldwide. That is why a study of the *Daucus carota* L. diversity maintained at VIR is of interest, since it helps to assess its potential for breeding practice and genetic research. Presently, carrot is represented in the VIR collection by 3,227 accessions, 236 of which are wild carrots from 33 countries. Morphological characters of 183 wild carrot accessions were studied for seven years (2016–2022), and taxonomic affiliations were ascertained for 106 of them. The material was delivered from Eurasian and African countries.

The VIR herbarium (WIR) contains carrot specimens brought by collecting missions from various countries. In total, the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) launched 66 collecting missions whose objectives included wild carrots as one of the priorities. Those expeditions explored the territories of Russia, Europe, Asia, America, and Africa. The herbarium now contains 323 carrot specimens, with 249 belonging to the wild *D. carota* species. Intraspecific taxa of *D. carota* are represented. The herbarium of cultivated carrots consists of 74 specimens.

The studied 106 wild carrot accessions from the VIR collection were identified, herbarized, arranged, incorporated into the WIR database, and placed into the permanent herbarium collection. As a result of this work, the WIR herbarium now contains 351 wild *D. carota* specimens, while the collection of cultivated carrots has been replenished with 4 accessions requiring verification.

Keywords: WIR herbarium, collecting missions, wild carrots, genetic resources

Acknowledgements: the study was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0006 “Disclosing the scientific potential of the herbarium collection at VIR as an independent specific unit of worldwide agricultural biodiversity conservation for scientifically justified mobilization, effective studying and preservation of the genetic diversity of cultivated plants and their wild relatives”, and Project No. FGEM-2022-0003 “Global genetic resources of vegetable and cucurbit crops in the VIR collection: effective ways to disclose ecogenetic patterns in the formation of their diversity and utilization of breeding potential”.

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

For citation: Shipilina L.Yu., Khmelinskaya T.V. Collections of the wild *Daucus carota* L. preserved at VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):16-26. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-16-26

Введение

Основными объектами коллекций ВИР являются культурные растения и их дикие родичи. Часть образцов уникальны: они собраны в местах, которые на сегодняшний день уничтожены в силу геополитических процессов. Еще часть представлена аутентичными, оригинальными образцами, собранными из центров происхождения культуры и часто являющимися предками сортов. Поэтому именно коллекции ВИР содержат наиболее богатое генетическое разнообразие среди аналогичных коллекций мира.

Сегодня морковь является одной из самых популярных овощных культур в мире и культивируется в большинстве стран с умеренным климатом. Морковь, по разным данным, была одомашнена от 4000 до 1100 лет назад в Центральной Азии (Sechkarev, 1971; Iorizzo et al., 2016). Оттуда как культура она распространилась в Европу и Северную Африку, а затем и на другие континенты. Род *Daucus* L. (Apiaceae), к которому относится культурная (культивируемая) морковь, насчитывает от 20 до 60 видов, в зависимости от понимания объема рода (Leupov et al., 2006; Timin et al., 2007; Pimenov, 2020; Luneva, 2023). Первым описал вид *D. carota* К. Линней (1753), объединив в нем дикорастущую и культурную морковь. Во время своих экспедиций Н. И. Вавилов сообщал, что «дикая морковь», под которой он понимал только *Daucus carota*, встречается в большом количестве от Атлантического побережья Восточной Европы до Западного Китая (Vavilov, 1935).

В наше время центрами разнообразия видов моркови являются Средиземноморье и Передняя Азия. Наиболее богаты видами Пиренейский полуостров, с одной стороны, и Ближний Восток – с другой. Во всех случаях растения предпочитают сухие и умеренно влажные районы побережья, луга с песчаной подпочвой, каменистые склоны гор, лесные поляны (Sechkarev, 1971; Sazonova, 1990). В этих странах распространена как аборигенная дикая, так и интродуцированная посевная морковь. Именно здесь различные виды моркови произрастают в диком виде.

В публикации 1935 г. Н. И. Вавилов отмечал, что богатым источником новых, ценных для культурных растений генов являются представители дикорастущей флоры, в том числе и в повышении иммунитета к грибным болезням (Vavilov, 1935). В селекционной работе с морковью использование полезных признаков, переданных от других видов и разновидностей *Daucus carota* L., может дать положительные результаты. В. Л. Комаров (Komarov, 1936) считал доказанным, что морковь своим происхождением обязана исключительно гибридным процессам, главным образом скрещиванию дикорастущих видов. Поэтому именно дикорастущие формы с успехом используются в селекции, а также в качестве модельного объекта для изучения генетики.

Межвидовая гибридизация культурной моркови с дикорастущими видами *Daucus* пока изучена недостаточно, хотя очевидно, что такие виды обладают рядом ценных для селекции признаков и могут применяться с целью передачи генов, например контролирующих устойчивость к вирусным и грибным заболеваниям. Получение исходного материала на основе межвидовой гибридизации включает преодоление самонесовместимости, стерильности гибридов первого поколения, получение последующих поколений, оценку и отбор в расщепляющихся гибридных популяциях (McCollum, 1975; Neuwold, 1983).

Морковь культурная подразделяется на два типа: восточная (азиатская) и западная (европейская). Также широко распространены дикие формы моркови. В результате исследования разнообразия вида *D. carota* мировой коллекции ВИР Б. И. Сечкарев предложил классификацию, где все разнообразие дикорастущей и культурной моркови он отнес к двум подвидам: subsp. *occidentalis* (Rubasch.) Setch. – западный и subsp. *orientalis* (Rubasch.) Setch. – восточный. В пределах каждого подвида на уровне групп разновидностей (convar.) он выделил дикорастущую и культурную морковь:

- subsp. *occidentalis* – convar. *carota* – морковь европейская дикорастущая, convar. *sativus* (Hoffm) Setch. – морковь европейская культурная;
- subsp. *orientalis* – convar. *orientalis* (Rubasch.) Setch. – морковь азиатская дикорастущая, convar. *afghanicus* Setch. – морковь азиатская культурная (Sechkarev, 1971).

Безусловно, расшифрованный геном *D. carota* позволит упорядочить внутривидовую классификацию *D. carota* (Ruhlman 2006; Iorizzo et al., 2013; Spooner et al., 2017; Spooner, 2019), но необходимы внутривидовые молекулярные исследования, которые согласовались бы с морфологическими, анатомическими и эколого-географическими особенностями изучаемых образцов. Поэтому для того, чтобы проводить дальнейшие исследования, потребовалось уточнение систематического положения образцов *D. carota* в коллекции ВИР, что стало целью нашей работы.

Материал и условия проведения исследований

Объект исследования – образцы дикорастущей моркови *D. carota* subsp. *occidentalis* convar. *carota* и *D. carota* subsp. *orientalis* convar. *orientalis* из коллекции ВИР.

В течении семи лет (2016–2022) изучались морфологические признаки 183 образцов дикорастущей моркови коллекции ВИР, первоначально определенные как *D. carota* и нуждающиеся в уточнении их подвида таксономического положения. Материал был привезен из стран Евразийского и Африканского континентов. Образцы высевали и изучали на полях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (Санкт-Петербург) в соответствии с методическими указаниями ВИР (Guidelines for the maintenance..., 1981). Почвы опытного поля дерново-слабоподзолистые, супесчаные по механическому составу, с нейтральной кислотностью (рН = 7,1–7,6). Мощность гумусного горизонта – 23–47 см, содержание гумуса – 2,1–3,0%. Обеспеченность подвижными формами калия средняя, фосфора – высокая.

В период цветения собрали гербарий цветущих растений с корнем и провели определение образцов, так как именно цветки и корень несут в себе морфологические признаки, позволяющие проводить корректное определение подвида и групп разновидностей. При определении таксономической принадлежности образцов *D. carota* мы следовали классификации, предложенной Б. И. Сечкаревым (Sechkarev, 1971).

Результаты исследований

Коллекция моркови ВИР насчитывает 3227 образцов, включая 236 образцов дикорастущей моркови из 33 стран мира.

Коллекция дикорастущей моркови, представленная в ВИР, формировалась в период экспедиций. Для проверки правильности первичного определения таксономической принадлежности отобрали 183 образца, собранные в различных странах (в скобках обозначено количество образцов): Молдова (1), Казахстан (17), Югославия (1), Туркменистан (10), Таджикистан (38), Азербайджан (5), Армения (41), Турция (8), Германия (4), Россия (9), Узбекистан (10), Эфиопия (2), Пакистан (1), Тунис (1), Грузия (2), Украина (1), Дания (2), Франция (3), Киргизия (17), Израиль (2), Афганистан (5), Алжир (2), Нидерланды (1).

В период цветения и созревания семян составили морфологические характеристики, провели определение каждого образца. Как оказалось, 77 из 183 образцов были правильно определены ранее, в момент мобилизации растительного материала в экспедиции. Для остальной части образцов *D. carota*, следуя классификации Б. И. Сечкарева (Sechkaev, 1971), уточнили таксономическую принадлежность (таблица).

Daucus carota L. subsp. *occidentalis* (Rubasch.) Setch. – 18 образцов. Происхождение образцов: Азербайджан, Таджикистан, Турция, Германия, Эфиопия, Казахстан, Киргизия, Армения.

D. carota L. subsp. *occidentalis* Rubasch. convar. *carota* – 10 образцов. Происхождение образцов: Нидерланды, Казахстан, Израиль, Узбекистан, Азербайджан, Армения, Северный Кавказ, Афганистан.

D. carota L. subsp. *orientalis* Rubasch. – 44 образца. Происхождение образцов: Азербайджан, Армения, Таджикистан, Германия, Киргизия (рис. 1. 2), Казахстан, Афганистан, Турция, Германия, Тунис.

D. carota L. subsp. *orientalis* Rubasch. convar. *orientalis* – 30 образцов. Происхождение образцов: Армения, Киргизия, Афганистан, Таджикистан, Дагестан, Узбекистан, Туркменистан, Алжир, Израиль.

В общей сложности была уточнена таксономическая принадлежность 102 семенных образцов дикорастущей моркови; из них в основном каталоге ВИР находятся 71 образец, во временном – 31 образец. Если проследить

Таблица. Уточненная таксономическая принадлежность образцов *Daucus carota* L. в коллекции ВИР
Table. Adjusted taxonomic affiliations of *Daucus carota* L. accessions from the VIR collection

№ деланки	№ по каталогу ВИР	Уточненная таксономическая принадлежность образцов <i>Daucus carota</i> L.	Происхождение	Год репродукции
611	к-3097	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
612	к-3098	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2016
613	к-3099	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Азербайджан	2017
614	к-3100	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Азербайджан	2017
615	к-3101	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Азербайджан	2017
616	к-3102	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2017
617	к-3103	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2017
618	к-3104	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2017
620	к-3106	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2017
621	к-3108	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2017
622	к-3109	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2017
623	к-3110	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Армения	2017
624	к-3111	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Армения	2017
625	к-3112	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2017
626	к-3115	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2016
627	к-3118	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Турция	2016
629	к-3120	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Турция	2016
630	к-3121	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Турция	2016
631	к-3122	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Турция	2016
632	к-3123	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Турция	2016
633	к-3124	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Германия	2016
634	к-3125	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Германия	2016
635	к-3149	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Киргизия	2013

Таблица. Продолжение

Table. Continued

№ делянки	№ по каталогу ВИР	Уточненная таксономическая принадлежность образцов <i>Daucus carota</i> L.	Происхождение	Год репродукции
637	к-3152	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Киргизия	2013
638	к-3153	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Киргизия	2013
639	к-3154	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2013
640	к-3155	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2013
641	к-3156	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2013
642	к-3157	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2013
643	к-3158	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2013
644	к-3233	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Нидерланды	2018
645	к-3274	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Казахстан	2019
646	к-3275	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Афганистан	2019
647	к-3276	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Израиль	2019
648	к-3277	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Таджикистан	2019
649	к-3278	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Узбекистан	2019
650	к-3279	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Таджикистан	2019
651	к-3280	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Дагестан	2019
652	к-3281	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Дагестан	2019
653	к-3282	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Узбекистан	2019
654	к-3283	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
655	к-3284	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
656	к-3285	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
657	к-3286	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
658	к-3287	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
659	к-3288	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
660	к-3289	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
661	к-3290	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Туркмения	2019
662	к-3291	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>afganicus</i> var. <i>schavrovii</i> ?	Туркмения	2019
663	к-3292	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Казахстан	2019
664	к-3293	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2019
665	к-3294	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Киргизия	2019
666	к-3295	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>afganicus</i> var. <i>schavrovii</i> ?	Киргизия	2019
667	к-3296	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Узбекистан	2019
668	к-3297	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>afganicus</i> var. <i>schavrovii</i> ?	Узбекистан	2019
669	к-3298	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Узбекистан	2019

Таблица. Продолжение
Table. Continued

№ делянки	№ по каталогу ВИР	Уточненная таксономическая принадлежность образцов <i>Daucus carota</i> L.	Происхождение	Год репродукции
670	к-3299	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Узбекистан	2019
671	к-3300	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Эфиопия	2019
672	к-3301	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Эфиопия	2019
673	к-3302	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Азербайджан	2019
674	к-3303	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Азербайджан	2019
675	к-3304	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Армения	2019
676	к-3305	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Сев. Кавказ	2019
677	к-3306	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Афганистан	2019
678	к-3307	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch. convar. <i>carota</i>	Афганистан	2019
679	к-3308	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Казахстан	2019
680	к-3309	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Казахстан	2019
681	к-3310	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Афганистан	2019
682	к-3311	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>afganicus</i> var. <i>schavrovii</i> ?	Казахстан	2019
683	к-3312	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Казахстан	2019
684	к-3313	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Узбекистан	2019
685	к-3314	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Алжир	2019
686	к-3315	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Алжир	2019
687	к-3316	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Тунис	2019
688	к-3317	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Израиль	2019
689	вр. к-553	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch. convar. <i>orientalis</i>	Узбекистан	2019
693	вр. к-2574	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2012
694	вр. к-2575	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2012
699	вр. к-2611	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Киргизия	2016
702	вр. к-2615	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2016
703	вр. к-2618	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2016
704	вр. к-2621	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2016
705	вр. к-2660	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Киргизия	2016
707	вр. к-2932	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Турция	2016
708	вр. к-2933	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Германия	2016
709	вр. к-2936	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
710	вр. к-2937	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
711	вр. 2 к-938	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
712	вр. к-2939	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
713	вр. к-2940	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017

Таблица. Окончание

Table. The end

№ делянки	№ по каталогу ВИР	Уточненная таксономическая принадлежность образцов <i>Daucus carota</i> L.	Происхождение	Год репродукции
714	вр. к-2941	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
715	вр. к-2942	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
716	вр. к-2943	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
717	вр. к-2944	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
719	вр. к-2947	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Таджикистан	2017
721	вр. к-2958	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Армения	2018
722	вр. к-2960	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2018
723	вр. к-2961	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Армения	2018
730	вр. к-2969	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Армения	2018
731	вр. к-2972	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2018
732	вр. к-2973	subsp. <i>occidentalis</i> Rubasch.	Армения	2018
733	вр. к-2976	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2018
736	вр. к-2980	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2018
737	вр. к-2981	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2018
738	вр. к-2982	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2018
739	вр. к-2983	subsp. <i>orientalis</i> Rubasch.	Армения	2018

происхождение, то образцы распределились следующим образом: Азербайджан (5), Алжир (2), Армения (21), Афганистан (4), Германия (3), Дагестан (2), Израиль (2), Казахстан (5), Киргизия (15), Нидерланды (1), Северный Кавказ (1), Таджикистан (17), Тунис (1), Туркмения (8), Турция (6), Узбекистан (7), Эфиопия (2).

Как показало наше исследование, 4 образца (к-3291, к-3295, к-3297, к-3311) требуют проверки, дополнительного изучения морфологических признаков. Происхождение образцов: Туркмения, Киргизия, Узбекистан, Казахстан.

В гербарии ВИР (WIR) сохраняют дикорастущую морковь в количестве 249 образцов, а также 74 образца сортов культурной моркови (всего 323 образца *D. carota*). Представлены внутривидовые таксоны *D. carota* subsp. *occidentalis* (Rubasch.) Setch. и *D. carota* subsp. *orientalis* (Rubasch.) Setch. Гербарная коллекция дикорастущей и культурной моркови дополняет сведения о распространении вида, если дублирует материал коллекции моркови ВИР, привезенный из различных стран в период проведения экспедиций, или является единственным свидетельством местонахождения либо места выращивания моркови в обследованных экспедициями районах.

Всероссийским институтом генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) было проведено 66 экспедиций (1919, 1921, 1924, 1925, 1926, 1927, 1928, 1929, 1953, 1955, 1956, 1957, 1958, 1962, 1965, 1966, 1967, 1969, 1970, 1976, 1977, 1981, 1983, 1984, 1986, 1990, 1996, 2012, 2014, 2015, 2023 г.), одним из важнейших объектов изучения которых являлась дикорастущая морковь. Экспедиции охватили европейскую часть России, включая Ленинградскую, Московскую, Воронежскую, Пермскую

и Калининградскую области, Северный Кавказ (Ставропольский край, Адыгейская, Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская, Дагестанская, Ингушская, Чеченская, Северо-Осетинская республики), Краснодарский край, Крым, Кавказское Причерноморье, Дальний Восток, Иркутскую область, Восточную Сибирь с обследованием притрассовой территории Байкало-Амурской магистрали. Экспедиции по территории Европы включили в себя исследования в Австро-Венгрии, Белоруссии, Болгарии, Великобритании, Германии, Дании, Италии, на Кипре, в Нидерландах, Польше, Португалии, Украине, Франции, Швейцарии, Швеции. Азиатские экспедиции охватили территории Юго-Западной Азии (Азербайджан, Армения, Израиль, Иран, Палестина, Персия, Сирия, Турция), Центральной Азии (Киргизия, Узбекистан), Южной Азии (Афганистан, Индия), Восточной Азии (Китай, Япония). Кроме того, были проведены экспедиции на Американском континенте, включая обследование Канады, Аргентины и Мексики, а также экспедиции по территории Африки (Марокко, Эфиопия). Сотрудники ВИР провели определение полученного материала; на гербарных этикетках *D. carota* стоят имена Николая Ивановича Вавилова, Евгении Николаевны Синской, Бориса Ивановича Сечкарева, Александра Михайловича Горского, Петра Михайловича Жуковского, Владимира Люциановича Газенбуша, Виктории Ивановны Мацкевич и других видных ученых.

Сборы моркови производились в различных местах ее обитания, включая степные участки, выходы известняка, окраины лесополос, опушки широколиственных лесов, склоны приморских скал и гор, в полях и вдоль дорог, что согласуется с указаниями распространения мор-



Рис. 1. Образец *Daucus carota* L. subsp. *orientalis* Rubasch. (вр. к-2660) из Киргизии (научно-производственная база «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», делянка 705)
Fig. 1. The accession of *Daucus carota* L. subsp. *orientalis* Rubasch. (temp. k-2660) from Kyrgyzstan (Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, plot 705)



Рис. 2. Гербарный образец WIR-108183 *Daucus carota* L. subsp. *orientalis* Rubasch. (вр. к-2660) из Киргизии
Fig. 2. Herbarium specimen WIR-108183 of *Daucus carota* L. subsp. *orientalis* Rubasch. (temp. k-2660) from Kyrgyzstan

кови у ряда авторов, которые изучают морковь как сорный вид или как элемент флоры (Vinogradova, 2004; Luneva et al., 2023).

В результате проведенной работы гербарий ВИР (WIR) пополнился еще 106 образцами *D. carota*. На данный момент общее количество дикорастущей *D. carota* увеличилось до 351 образца, а гербарная коллекция культурной моркови составила 78 образцов, 4 из которых требуют уточнения.

Коллекция ВИР по своему материалу уникальна, имеет почти столетнюю историю, разнообразна. В ней хранятся самые разные по своему происхождению образцы, являющиеся источниками ценных признаков по различным направлениям селекции. Собранный материал предоставляет генетикам и селекционерам широчайшие возможности для исследований.

References / Литература

- Guidelines for the maintenance and study of root crop plant collections (Metodicheskiye ukazaniya po podderzhaniyu i izucheniyu kollektiy korneplodnykh rasteniy). Leningrad: VIR; 1981. [in Russian] (Методические указания по поддержанию и изучению коллекций корнеплодных растений. Ленинград: ВИР; 1981).
- Heywood V.H. Relationships and evolution in the *Daucus carota* complex. *Israel Journal of Botany*. 1983;32(2):51-65. DOI: 10.1080/0021213X.1983.10676964
- Iorizzo M., Ellison S., Senalik D., Zeng P., Satapoomin P., Huang J. et al. A high-quality carrot genome assembly provides new insights into carotenoid accumulation and asterid genome evolution. *Nature Genetics*. 2016;48(6):657-666. DOI: 10.1038/ng.3565
- Iorizzo M., Senalik D.A., Ellison S.L., Grzebelus D., Cavagnaro P.F., Allender C. et al. Genetic structure and domestication of carrot (*D. carota* subsp. *sativus*) (Apiaceae). *American Journal of Botany*. 2013;100(5):930-938. DOI: 10.3732/ajb.1300055
- Комаров В.Л. The origin of cultivated plants (Proiskhozhdeniye kulturnykh rasteniy). Moscow; 1936. [in Russian] (Комаров В.Л. Происхождение культурных растений. Москва; 1936).
- Leunov V.I., Rybalko A.A., Mikheev Yu.G., Klygina T.E., Khovrin A.N. Breeding and seed production of table carrots (Selektsiya i semenovodstvo morkovi stolovoy). Moscow; 2006. [in Russian] (Леунов В.И., Рыбалко А.А., Михеев Ю.Г., Клыгина Т.Э., Ховрин А.Н. Селекция и семеноводство моркови столовой. Москва; 2006).
- Luneva N.N., Mysnik E.N. Distribution of wild carrots *Daucus carota* L. over the territory of the Russian Federation. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(2):204-212. [in Russian] (Лунева Н.Н., Мысник Е.Н. Распространение моркови дикой *Daucus carota* L. на территории Российской Федерации. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(2):204-212). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-2-204-212
- McCollum G.D. Interspecific hybrid *Daucus carota* × *D. capillifolius*. *Botanical Gazette*. 1975;136(2):201-206.
- Pimenov M.G. Updated checklist of the Umbelliferae of Middle Asia and Kazakhstan: nomenclature, synonymy, typification, distribution. *Turczaninowia*. 2020;23(4):127-257. [in Russian] (Пименов М.Г. Обновленный конспект зонтичных (Umbelliferae) Средней Азии и Казахстана: номенклатура, синонимия, типификация, распространение. *Turczaninowia*. 2020;23(4):127-257). DOI: 10.14258/turczaninowia.23.4.12
- Ruhlman T., Lee S.B., Jansen R.K., Hostetler J.B., Tallon L.J., Town C.D. et al. Complete plastid genome sequence of *Daucus carota*: implications for biotechnology and phylogeny of angiosperms. *BMC Genomics*. 2006;7:222. DOI: 10.1186/1471-2164-7-222
- Sazonova L.V., Vlasova E.A., Voskresenskaya V.V. List of descriptors for the species *Daucus carota* (Klassifikator vida *Daucus carota*). Leningrad: VIR; 1990. [in Russian] (Сазонова Л.В., Власова Э.А., Воскресенская В.В. Классификатор вида *Daucus carota*. Ленинград: ВИР; 1990).
- Sechkaev B.I. Carrots – *Daucus* L. (Morkov – *Daucus* L.). In: *Flora of Cultivated Plants. Root Crop Plants. Vol. XIX (Kulturnaya flora SSSR. Korneplodnye rasteniya. T. XIX)*. Leningrad: Kolos; 1971. С.268-373. [in Russian] (Сечкаев Б.И. Морковь – *Daucus* L. В кн.: *Культурная флора СССР. Корнеплодные растения. Т. XIX*. Ленинград: Колос; 1971. С.268-373).
- Spooner D.M. *Daucus*: taxonomy, phylogeny, distribution. In: P. Simon, M. Iorizzo, D. Grzebelus, R. Baranski (eds). *The Carrot Genome*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2019. p.9-26. DOI: 10.1007/978-3-030-03389-7_2
- Spooner D.M., Ruess H., Iorizzo M., Senalik D., Simon P. Entire plastid phylogeny of the carrot genus (*Daucus*, Apiaceae): Concordance with nuclear data and mitochondrial and nuclear DNA insertions to the plastid. *American Journal of Botany*. 2017;104(2):296-312. DOI: 10.3732/ajb.1600415
- Timin N.I. Dvoenko I.T., Zhevor S.V., Timina L.T., Shmykova N.A. Interspecific hybridization of carrots from the genus *Daucus* L. (guidelines) (Mezhvidovaya gibridizatsiya morkovi roda *Daucus* L. [metodicheskiye rekomendatsii]). Moscow: VNISSOK; 2007. [in Russian] (Тимин Н.И., Двоенко И.Т., Жевора С.В., Тимина Л.Т., Шмыкова Н.А. Межвидовая гибридизация моркови рода *Daucus* L. (методические рекомендации). Москва: ВНИССОК; 2007).
- Vavilov N.I. Botanical and geographic fundamentals of breeding (the doctrine of the source material in breeding) (Botaniko-geograficheskiye osnovy selektsii [ucheniyе ob iskhodnom material v selektsii]). In: N.I. Vavilov (ed.). *Theoretical Bases of Plant Breeding. Vol. 1. General Principles of Plant Breeding (Teoreticheskiye osnovy selektsii rasteniy. T. 1. Obshchaya selektsiya rasteniy)*. Moscow; Leningrad: Selkhozgiz; 1935. p.15-74. [in Russian] (Вавилов Н.И. Ботанико-географические основы селекции (учение об исходном материале в селекции). В кн.: *Теоретические основы селекции растений. Т. 1. Общая селекция растений* / под ред. Н.И. Вавилова. Москва; Ленинград: Сельхозгиз; 1935. С.15-74).
- Vinogradova V.M. Genus 60. Carrot – *Daucus* L. In: N.N. Tzvelev (ed.). *Flora of Eastern Europe. Vol. XI (Flora Vostochnoy Yevropy. T. XI)*. Moscow; St. Petersburg: KMK; 2004. p.409-410. [in Russian] (Виноградова В.М. Род 60. Морковь – *Daucus* L. В кн.: *Флора Восточной Европы. Т. XI* / под ред. Н.Н. Цвелева. Москва; Санкт-Петербург: КМК; 2004. С.409-410).

Информация об авторах

Лилия Юрьевна Шипилина, 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, l.shipilina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7590-3173>

Татьяна Владимировна Хмелинская, 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, thmelinskaya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5425-1268>

Information about the authors

Lilija Yu. Shipilina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.shipilina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7590-3173>

Tatiana V. Khmelinskaya, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, thmelinskaya@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5425-1268>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 06.12.2023; одобрена после рецензирования 04.03.2024; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 06.12.2023; approved after reviewing on 04.03.2024; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.16:631.528
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-27-38



Комплексная оценка мутантов ярового ячменя по элементам урожайности

А. А. Белозерова, Д. А. Базюк, Н. А. Боме

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Алексеевна Белозерова, anna-bel@bk.ru

Актуальность. Необходимость увеличения генетического разнообразия ячменя (*Hordeum vulgare* L.) определяется его ценностью и распространенностью, что особенно важно в контексте меняющегося климата.

Материал и методы. Исследование проведено в 2021 и 2022 г. на экспериментальном участке биостанции «Озеро Кучак», расположенном в Нижнетавдинском районе Тюменской области (57°20'57.3"N, 66°03'21.8"E). Мутантные формы получены при обработке семян сорта 'Зерноградский 813', образцов Dz02-129, С.І. 10995 растворами химического мутагена фосфемид в концентрациях 0,002% ($2 \cdot 10^{-3}$ М) и 0,01% ($1 \cdot 10^{-2}$ М). Выполнена оценка мутантов пятого (M_5) и шестого (M_6) поколений по комплексу селекционно ценных признаков в сравнении с исходными формами и стандартными сортами 'Ача' и 'Абалак'. В лабораторных условиях проведен анализ основных признаков продуктивности, рассчитаны селекционные индексы (индекс потенциала колоса, канадский индекс, индекс линейной плотности колоса, мексиканский индекс, индекс продуктивности растения, финско-скандинавский индекс).

Результаты и заключение. Большинство изученных мутантов в условиях дефицита влаги и повышенных температур превосходили исходные формы по признакам продуктивности. Выделены мутантные образцы со стабильным проявлением признаков независимо от условий вегетационного сезона. Оценка взаимодействия «генотип – среда» с помощью селекционных индексов позволила выявить перспективные мутанты для включения в селекционные программы. На основе корреляционного анализа установлены индексы, тесно связанные с урожайностью зерна: канадский ($r = 0,85$), мексиканский ($r = 0,76$), индекс продуктивности растений ($r = 0,70$), которые можно рекомендовать для отбора стрессоустойчивых форм ячменя.

Ключевые слова: двурядный и многорядный ячмень, химический мутагенез, фосфемид, продуктивность, селекционные индексы

Благодарности: исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FEWZ-2021-0007 «Адаптивная способность сельскохозяйственных растений в экстремальных условиях Северного Зауралья».

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

Для цитирования: Белозерова А.А., Базюк Д.А., Боме Н.А. Комплексная оценка мутантов ярового ячменя по элементам урожайности. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):27-38. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-27-38

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-27-38

Comprehensive evaluation of spring barley mutants according to their yield components

Anna A. Belozerova, Denis A. Bazyuk, Nina A. Bome

University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: Anna A. Belozerova, anna-bel@bk.ru

Background. The need to increase the genetic diversity of barley (*Hordeum vulgare* L.) is determined by its value and cultivation scope, which is especially important in the context of the changing climate.

Material and methods. The study was carried out in 2021 and 2022 at the experimental site of the Lake Kuchak biostation located in Nizhnetavdinsky District, Tyumen Province (57°20'57.3"N, 66°03'21.8"E). Mutant forms were obtained by treating seeds of accessions 'Zernogradsky 813', Dz02-129 and C.I. 10995 with solutions of the chemical mutagen phosphemide at concentrations of 0.002% ($2 \cdot 10^{-3}$ M) and 0.01% ($1 \cdot 10^{-2}$ M). The mutants of the fifth (M_5) and sixth (M_6) generations were evaluated for a set of traits valuable for breeding in comparison with the original forms and reference cultivars 'Acha' and 'Abalak'. The main productivity characters were analyzed in the laboratory, and breeding indices were calculated (ear potential index, Canadian index, ear linear density index, Mexican index, plant productivity index, and Finnish-Scandinavian index).

Results and conclusion. Most of the studied mutants under moisture deficit and elevated temperature conditions were superior to the original forms in their productivity characters. Mutant plant samples with stable manifestation of those traits, irrespective of the growing season conditions, were selected. Assessment of the genotype–environment interaction using breeding indices made it possible to identify promising mutants for inclusion in breeding programs. Correlation analysis helped to identify indices closely related to grain yield: Canadian index ($r = 0.85$), Mexican index ($r = 0.76$), and plant productivity index ($r = 0.70$). They can be recommended for selection of stress-resistant barley forms.

Keywords: two-row and multi-row barley, chemical mutagenesis, phosphemide, productivity, breeding indices

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state task assigned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, No. FEVZ-2021-0007 "Adaptability of agricultural plants under extreme conditions of the Northern Trans-Urals".

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

For citation: Belozerova A.A., Bazyuk D.A., Bome N.A. Comprehensive evaluation of spring barley mutants according to their yield components. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):27-38. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-27-38

Введение

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) является одной из важнейших зерновых культур как в России, так и за рубежом, находя свое применение в пищевой (крупяной, пивоваренной) и зернофуражной промышленности. Благодаря универсальности использования и способности переносить сложные почвенно-климатические условия, культура получила широкое распространение. По состоянию на 2021 г. среди зерновых и зернобобовых культур в Российской Федерации ячмень занимает второе место по посевным площадям (5194,5 тыс. га), уступая лишь пшенице (18321,2 тыс. га). В структуре производства зерновых культур Тюменской области ячмень занимает 118,5 тыс. га (Main results..., 2021). В Западной Сибири урожай зерна этой ценной культуры подвержен большим колебаниям по годам, что отрицательно сказывается на экономике региона; наибольшее снижение (в два-три раза) отмечается в засушливые годы (Nikolaev et al., 2018).

В настоящее время в условиях меняющегося климата, приводящего к возникновению различных неблагоприятных погодных явлений в течение вегетационного периода, продолжает оставаться актуальной необходимость увеличения генетического разнообразия сельскохозяйственных растений с целью получения форм, обладающих качественно новыми селекционно ценными признаками и устойчивостью к факторам внешней среды, с привлечением как классических методов (отбор, гибридизация), так и новых (экспериментальный мутагенез, генная инженерия и др.) (Yemelyev, 2007; Beletskaya, Krotova, 2022; Weisfeld, Bome, 2022).

Использование индуцированного мутагенеза при выведении сортов сельскохозяйственных культур позволяет создавать новый исходный материал за относительно короткий промежуток времени (Yemelyev, 2007; Dudin, Balakhontseva, 2013). Теоретические и прикладные аспекты химического мутагенеза были разработаны И. А. Рапопортом. К настоящему времени открыты сотни различных по структуре химических соединений, приводящих к генетическим изменениям, позволяющим увеличивать естественную изменчивость растений, вызывая огромное разнообразие наследственно измененных форм, многие из которых имеют большое селекционное значение. Особенно эффективным стало применение веществ, относящихся к классу супермутагенов (Krotova, 2015; Nazarenko, 2016).

Одним из перспективных химических мутагенов является фосфемид, эффективность которого в повышении биологического разнообразия культурных растений была изучена на яровой и озимой мягкой пшенице и ячмене (Bome et al., 2017; Tetyannikov, Bome, 2022), в результате чего были получены разнообразные мутантные образцы с ценными биологическими и агрономическими свойствами.

В селекционной практике используют различные индексы с целью определения результативности проведенных ранее отборов на фоне резко меняющихся лимитирующих факторов среды. Так, например, для оценки сортов озимой ржи по хозяйственно-биологическим и адаптивным показателям используют индекс урожайности, мексиканский индекс, финско-скандинавский индекс, индекс перспективности, индекс аттракции, индекс потенциальной продуктивности колоса, индекс отношения массы 1000 зерен к числу зерен в колосе (Ermolaeva et al., 2019; Safonova, Aniskov, 2023).

И. Р. Манукян с соавторами (Manukyan et al., 2018) указывают, что преимущество индексов перед абсолютными величинами заключается в установлении закономерности между этими величинами и уменьшении влияния факторов среды на проявление признака, а также выявлении уникальных генотипов. Если в состав индекса входят количественные признаки, связанные тесной корреляцией, и их изменчивость под влиянием условий среды имеет одинаковый характер, то индекс оказывается менее изменчив, чем сами признаки (Manukyan et al., 2018).

По мнению Л. Т. Мальцевой с соавторами (Maltseva et al., 2020), варибельность селекционных индексов яровой мягкой пшеницы зависит как от генотипа, так и от условий произрастания. В условиях благоприятных по влагообеспеченности, для отбора продуктивных генотипов можно применять мексиканский индекс, канадский индекс, индекс линейной плотности колоса, индекс продуктивности, кроме индекса интенсивности. При жесткой засухе малоэффективен отбор по продуктивности колоса, надежнее – по высоте растений. Селекционные индексы косвенно отражают устойчивость к фитопатогенам за счет массы стебля и массы зерна с колоса. Авторами установлена средняя связь урожайности с индексом интенсивности (0,514–0,596), мексиканским индексом (0,535) и индексом продуктивности (0,520–0,644) (Maltseva et al., 2020).

В качестве наиболее информативного и объективного параметра оценки, по мнению ряда авторов (Safonova, Aniskov, 2022, 2023), рекомендуется индекс продуктивности растений, предложенный И. Р. Манукян с соавторами, так как для его расчета используются три главных элемента: длина колоса, число зерен в колосе, масса зерна с колоса (Manukyan et al., 2018). Он имеет тесную корреляционную связь с продуктивностью и, отражая продуктивность как итог генотип-средового взаимодействия, способствует выявлению устойчивых генотипов, что позволяет предварительно судить об адаптивных свойствах селекционного материала.

Цель данной работы – характеристика мутантов яровой ячменя по элементам урожайности и отбор перспективных форм с использованием селекционных индексов.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования были использованы три образца ячменя (*Hordeum vulgare* L.) из мировой коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова ('Зерноградский 813', к-30453, Россия, var. *erectum*; Dz02-129, к-22934, Эфиопия, var. *nigripallidum*, С.І. 10995, к-30630, Перу, var. *sinicum*) и 44 мутантные формы пятого (M_5) и шестого (M_6) поколений, созданных на их основе, представляющие собой результат многократных отборов. Сравнение мутантных форм проводили с исходными образцами и сортами 'Ача' (к-30243, var. *nutans*) и 'Абалак' (к-31201, var. *nutans*), включенными в Государственный реестр сортов, рекомендованных для Тюменской области.

Мутантные формы получены с использованием химического препарата фосфемид – ди-(этиленмид)-пиримидил-2-амидофосфорной кислоты – в концентрациях 0,002% ($2 \cdot 10^{-3}$ М) и 0,01% ($1 \cdot 10^{-2}$ М). Методика создания мутантов, взятых в исследование, описана в статье Н. А. Боме с соавторами (Bome et al., 2020).

Полевое изучение мутантных форм проводили в 2021 и 2022 г. на экспериментальном участке биостанции Тюменского государственного университета «Озеро Кучак»

(57°20'57.3"N, 66°03'21.8"E). Биостанция расположена в Нижнетавдинском районе Тюменской области. Почва окультуренная дерново-подзолистая, супесчаная по гранулометрическому составу (содержание гумуса – 3,67%, рН – 6,6).

Посев контрольных и опытных вариантов осуществляли на делянках с длиной рядка 1 м, число рядков – 5, междурядье – 20 см, глубина заделки семян – 5-6 см, 500 семян на 1 м². Учеты и наблюдения в течение вегета-

ционный Г. Т. Селяниновым (Selyaninov, 1930), по формуле ГТК = $R/0,1 \times \Sigma t$, где R – сумма осадков, мм; Σt – сумма среднесуточной температуры воздуха > 10°C. Статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с использованием табличного процессора Microsoft Excel и программы Statistica 6.0 (StatSoft, Inc., США).

Вегетационные сезоны в годы проведения исследования значительно различались по гидротермическому режиму (рисунок).

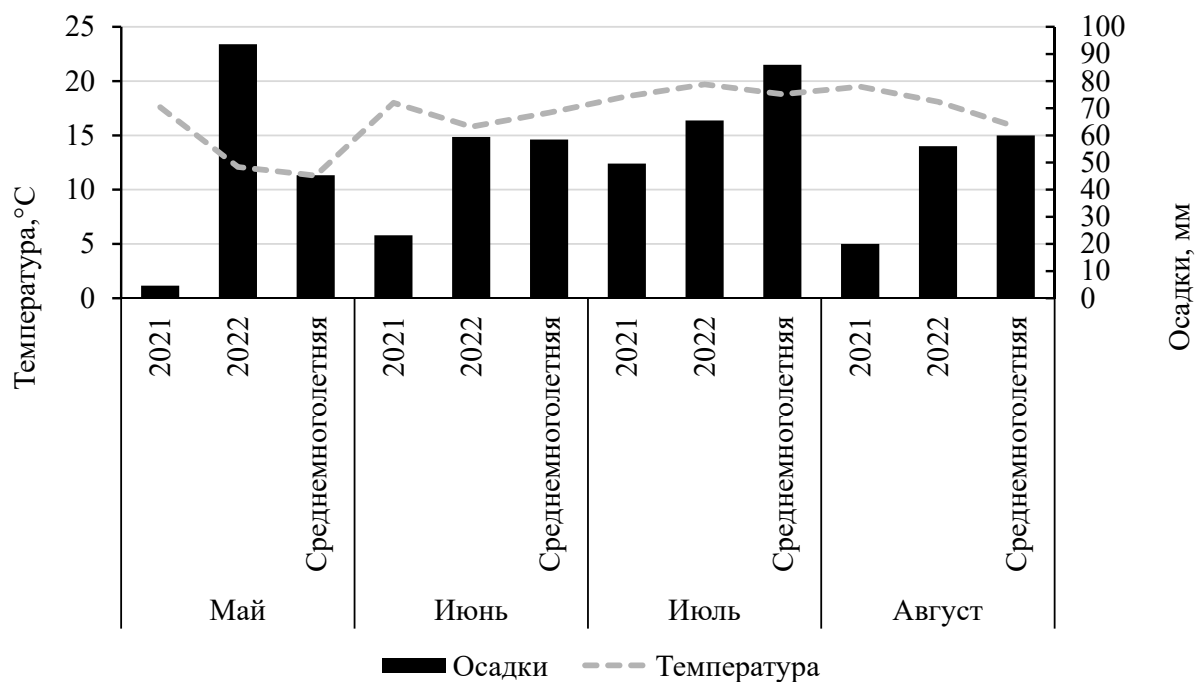


Рисунок. Характеристика вегетационных периодов по гидротермическому режиму в годы исследования (г. Тюмень)

Figure. Characteristics of the growing seasons according to their hydrothermal regime in the years of research (Tyumen)

ционного периода выполняли в соответствии с методическими указаниями по изучению мировой коллекции ячменя и овса (Loskutov et al., 2012). В лабораторных условиях анализировали изменчивость ряда признаков продуктивности (длина колоса, число и масса зерен с колоса, количество продуктивных побегов и урожайность на 1 м²), также учитывали показатели высоты растений в фазу «колошение».

Оценку взаимодействия «генотип – среда» проводили путем расчета ряда селекционных индексов: «индекс потенциала колоса» – отношение длины колоса (см) к высоте растения (см); «канадский индекс (удельный урожай колоса)» – отношение массы зерен с колоса (г) к длине колоса (см); «индекс линейной плотности колоса» – отношение числа зерен с колоса (шт.) к длине колоса (см); «мексиканский индекс» – отношение массы зерен с колоса (г) к высоте растения (см); «индекс продуктивности растения» – отношение произведения числа зерен с колоса (шт.) на массу зерен с колоса (г) к длине колоса (см); «финско-скандинавский индекс» – отношение числа зерен в колосе (шт.) к высоте растения (см) (Dragavtsev, 2009; Manukyan et al., 2018; Safonova, Aniskov, 2022).

Для характеристики вегетационных периодов рассчитан гидротермический коэффициент (ГТК), предло-

По метеорологическим характеристикам 2021 г. можно рассматривать как очень засушливый (ГТК = 0,44). Острый дефицит влаги наблюдался в мае в период формирования всходов, количество осадков составило 10,2% от среднего многолетнего значения («Условная норма») на фоне повышенных среднесуточных температур воздуха. В период с июня по август количество осадков изменялось от 33,3 до 57,7% от нормы. Превышение температуры по отношению к среднему многолетнему значению также отмечалось в июне и августе. ГТК в период вегетации варьировал от 0,33 в августе до 0,86 в июле.

Более благоприятные условия для роста и развития растений отмечены в вегетационный сезон 2022 г., который по влагообеспеченности и температуре можно охарактеризовать как влажный (ГТК = 1,44). При этом наблюдалось неравномерное распределение осадков по отдельным месяцам с избытком влаги в мае (превышение нормы на 107,3%) и значительным недобором осадков в июле (76,2% от среднего многолетнего значения). По обеспеченности теплом вегетационный сезон был близок к норме в мае, чуть ниже средней многолетней температуры характеризовался июнь, превышение над нормой отмечалось в июле и августе. Гидротермический коэффициент изменялся от 3,41 в мае (переувлажнение) до 1,01 в августе (слабозасушливые условия).

Результаты исследования и их обсуждение

Урожайность представляет собой сложный комплексный признак, стабильное проявление которого и эффективность реализации определяется генотипом, обеспеченностью растений элементами минерального питания, избытком или недостатком влаги в почве в период формирования колоса (Batakova, Korelina, 2017; Danilova, 2021). Основными элементами структуры урожая, определяющими продуктивность растений зерновых культур, являются высота стебля, длина колоса, число и масса зерен с одного колоса (Moiseev et al., 2022).

В нашем исследовании 44 образца ячменя характеризовались значительной изменчивостью отдельных элементов структуры урожая в разные по метеорологическим характеристикам годы.

Одним из генотипических признаков, влияющих на продуктивность сорта, является длина колоса, которая существенно уменьшается в неблагоприятные по климатическим условиям годы (Batakova, Korelina, 2017). В Тюменской области при дефиците влаги в 2021 г. растения ячменя формировали более короткие колосья с меньшим числом зерновок в них, что приводило к снижению массы зерна с колоса и в конечном итоге повлияло на урожайность (табл. 1). При этом у образца 'Зерноградский 813' не установлено значительных различий по изученным признакам между растениями исходной и мутантных форм как в 2021 г., так и в 2022 г. В зависимости от условий вегетационного периода статистически значимые различия по годам у исходной формы наблюдались по массе зерна с колоса, у мутантных форм – по длине колоса и числу зерен в колосе.

У образца из Эфиопии Dz02-129 в условиях дефицита влаги отмечено преимущество растений исходной формы над мутантами по большинству изученных признаков. Статистически значимые различия по годам у исходной формы выявлены по длине колоса, у мутантных форм – по длине колоса, массе зерна с колоса, числу продуктивных побегов с 1 м² и урожайности.

Преимущество мутантов над исходной формой при недостатке влаги в 2021 г. отмечено у образца из Перу С.І. 10995 по массе зерна с колоса, числу продуктивных побегов с 1 м² и урожайности, в 2022 г. – по урожайности. При сравнении признаков продуктивности по годам установлены значительные различия у исходной формы по признакам колоса (длина, масса и число зерен) и урожайности. Мутантные образцы характеризовались стабильным проявлением изученных показателей (за исключением длины колоса).

При оценке перспективности селекционного материала необходимо проводить анализ полученных данных в сравнении с сортами, рекомендованными для конкретного региона. В нашем исследовании при недостатке влаги в 2021 г. преимущество над стандартами 'Ача' и 'Абалак', урожайность которых составила 103,8 г/м² и 379,3 г/м² соответственно, получили образцы 'Зерноградский 813' и Dz02-129. В более благоприятных условиях 2022 г. урожайность была выше у районированных сортов ('Ача' – 439,8 г/м²; 'Абалак' – 379,3 г/м²). Образец С.І. 10995 характеризовался низкой урожайностью в оба года исследования.

Мутанты на основе образцов 'Зерноградский 813' и С.І. 10995 превышали сорта 'Ача' и 'Абалак' по урожайности в 2021 г. на 52,5–59,3% и 7,5–20,7% соответственно. Мутанты образца из Эфиопии при сравнении со стандартами по урожайности при дефиците

влаги были выше 'Ача' на 36,7% и уступали 'Абалак' на 23,3%.

В 2021 г. наибольшее количество мутантов (31) превосходили по урожайности исходный образец из Перу на 6,21–721% (более чем в 8 раз). У двух форм ЭПІІ5(55) и ЭПІІ1(64), полученных на основе образца из Эфиопии при обработке фосфемидом в концентрации 0,002%, превышение составило 21,68% и 6,74% соответственно. В целом дефицит влаги в период всходов и колошения привел к снижению урожайности у подавляющего числа мутантов этой группы. Мутантные формы на основе сорта 'Зерноградский 813' в условиях 2021 г. по признакам продуктивности находились на уровне контроля. В 2022 г. различия по зерновой продуктивности между исходной и мутантными формами были менее выраженными. Выделились один мутант на основе образца из России, два – из Эфиопии, 26 – из Перу с превышением урожайности на 1,6–156,8%.

По результатам комплексной оценки в контрастных по гидротермическому режиму вегетационных сезонах выделены 12 образцов с относительно стабильным проявлением признаков продуктивности и как перспективные для включения в селекционные программы (табл. 2). Мутант РІ9(37) ('Зерноградский 813', 0,002%) по изученным признакам был на уровне исходной формы в оба года исследования, за исключением числа зерен в колосе в 2022 г. В относительно благоприятных по гидротермическому режиму условиям мутант формировал более высокую урожайность.

Мутант ЭПІІ5(55) (Dz02-129, 0,002%) в 2021 г. превосходил контроль по всем изученным показателям, в то время как в 2022 г. из-за низкого числа продуктивных стеблей на 1 м² сформировал низкую урожайность. По остальным признакам он был на уровне исходной формы.

Большинство мутантов (С.І. 10995, 0,01%) отличались более высокой урожайностью среди всех изученных образцов, но различались по вкладу отдельных признаков, характеризующих продуктивность колоса. Количество мутантов, достоверно превышающих контроль по трем признакам, составило четыре в 2021 г. и один в 2022 г.; по двум признакам – четыре и два соответственно; по одному признаку – один мутантный генотип в 2021 г., остальные находились на уровне контроля. В оба года исследования превышал контроль по всем изученным признакам лишь один мутант – ПІV19(45) 0,01%. К числу лучших также отнесены образцы, которые характеризовались стабильным проявлением большинства признаков продуктивности независимо от условий года – ПІV19(44) 0,01%, ПІІІ2(82) 0,01%.

О значении оптимального сочетания отдельных элементов структуры урожая во взаимосвязи с общей продуктивностью при создании нового исходного материала сообщают и другие исследователи (Kononov, Sidorenko, 1990; Pomelov, Dudin, 2008; Sidorenko et al., 2016).

В качестве дополнительной характеристики мутантных образцов нами были рассчитаны некоторые индексы (табл. 3), используемые в селекции зерновых культур для оценки взаимодействия «генотип – среда». Значение индексов заключается в возможности оценивать и отбирать селекционный материал не по одному признаку, а по их совокупности во взаимосвязи с параметрами продуктивности (Dragavtsev, 2009; Manukyan et al., 2019).

В нашем исследовании в условиях водного стресса растения ячменя формировали более короткую соломи-

Таблица 1. Изменчивость признаков продуктивности мутантных и исходных форм ячменя в разные годы исследования (Нижегородский район, Тюменская область)
Table 1. Variability of productivity characters in mutant and original barley forms in different years of research (Nizhnetavdinsky District, Tyumen Province)

Образец год, признак / Accession, year, character	Длина колоса, см / Ear length, cm		Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.		Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g		Продуктивные побеги, шт./м ² / Productive tillers, pcs./m ²		Урожайность, г/м ² / Yield, g/m ²		
	lim	X ± m _x	lim	X ± m _x	lim	X ± m _x	lim	X ± m _x	lim	X ± m _x	
‘Зерноградский 813’											
2021	1	5,5–6,5	6,2 ± 0,15	17,8–20,4	19,2 ± 0,52	0,55–0,85	0,69 ± 0,05	280–368	335,5 ± 19,67	182,0–304,3	232,7 ± 26,9
	2	6,0–6,4	6,2 ± 0,16	19,2–20,2	19,7 ± 0,66	0,65–0,79	0,72 ± 0,07	282–330	306,0 ± 24,00	214,5–222,8	218,6 ± 4,14
2022	1	6,6–6,9	6,7 ± 0,25	19,5–21,5	20,7 ± 1,03	0,84–1,0	0,95 ± 0,06Δ	199–359	280,0 ± 32,69	185,1–359,0	265,2 ± 36,62
	2	6,6–7,2	6,9 ± 0,18Δ	20,7–23,2	21,9 ± 0,75Δ	0,72–1,04	0,88 ± 0,06	290–341	315,5 ± 25,50	208,8–354,6	281,7 ± 72,92
Dz02-129											
2021	1	4,9–6,5	5,8 ± 0,09	30,2–41,2	37,0 ± 1,27	0,70–1,22	0,89 ± 0,07	278–314	300,5 ± 7,80	214,2–383,1	267,0 ± 39,0
	2	4,5–6,4	5,3 ± 0,13*	27,0–42,8	33,9 ± 1,23	0,17–1,40	0,68 ± 0,07*	152–314	250,4 ± 16,11*	51,34–321,0	164,1 ± 26,16*
2022	1	6,7–8,1	7,1 ± 0,28Δ	37,6–46,2	41,0 ± 2,16	0,87–1,29	1,04 ± 0,10	190–323	267,8 ± 29,86	195,7–393,5	281,5 ± 45,54
	2	6,2–7,7	6,9 ± 0,29Δ	26,8–41,9	38,2 ± 2,55	1,02–1,79	1,26 ± 0,1Δ	139–260	188,6 ± 11,71*Δ	155–361,3	235,9 ± 18,13Δ
C.I. 10995											
2021	1	5,4–6,8	6,1 ± 0,10	35,2–45,2	39,7 ± 0,88	0,38–0,58	0,46 ± 0,05	112–144	128,5 ± 6,55	51,2–65,0	58,0 ± 3,1
	2	5,0–8,7	6,4 ± 0,17	17,6–52,2	39,4 ± 1,27	0,55–1,45	0,94 ± 0,11*	122–464	269,7 ± 13,33*	61,6–474,1	255,2 ± 15,61*
2022	1	6,0–8,1	6,8 ± 0,31Δ	31,0–44,7	37,8 ± 2,49	0,52–1,61	0,97 ± 0,10Δ	98–250	187,3 ± 32,43	77,4–275,0	186,5 ± 42,1Δ
	2	5,9–8,6	7,2 ± 0,28Δ	18,8–50,3	41,1 ± 2,30	0,49–1,69	1,14 ± 0,10	28–390	240,3 ± 12,63	19,3–478,9	275,5 ± 16,9*

Примечание: * – различия с исходной формой; Δ – различия по годам; 1 – исходная форма; 2 – мутантные формы
 Note: * – differences from the original form; Δ – differences by years; 1 – original form; 2 – mutant forms

Таблица 2. Сравнительная характеристика перспективных мутантных образцов ячменя по признакам продуктивности в разные годы исследования
(Нижнетавдинский район, Тюменская область)

Table 2. Comparative description of promising mutant barley accessions according to their productivity characters in different years of research (Nizhnetavdinsky District, Tyumen Province)

Образец / Accession	2021 г.						2022 г.					
	Продуктивные побего, шт./м ² / pcs./m ²	Длина колоса, см / Bar length, cm	Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.	Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g	Урожайность, г/м ² г/м ² / Yield, g/m ² / g/m ²	% к контролю / % to the control	Продуктивные побего, шт./м ² / pcs./m ²	Длина колоса, см / Bar length, cm	Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.	Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g	Урожайность, г/м ² г/м ² / Yield, g/m ² / g/m ²	% к контролю / % to the control
‘Зерноградский 813’												
P19(37) 0,002%	282	6,4 ± 0,18Δ	20,2 ± 0,58Δ	0,79 ± 0,03Δ	222,8	95,9	341	7,2 ± 0,23Δ	23,2 ± 0,61Δ*	1,04 ± 0,06Δ	354,6	133,7
ЭШ5(55) 0,002%	228	6,4 ± 0,17*	42,8 ± 1,50*	1,4 ± 0,05*	321,5	121,7	139	6,6 ± 0,44	34,5 ± 4,23	1,4 ± 0,16	194,6	69,1
Dz02-129												
C.I.10995												
П117(12) 0,01%	294	6,7 ± 0,12*	40,8 ± 1,24*	1,02 ± 0,10	299,9	517,1	156	7,2 ± 0,29	41,0 ± 4,69	1,09 ± 0,10	171,6	92,0
П1В19(44) 0,01%	338	6,6 ± 0,06Δ*	43,4 ± 1,12*	0,91 ± 0,16*	307,6	530,4	241	7,2 ± 0,28Δ	46,2 ± 2,09*	1,33 ± 0,14*	320,5	171,9
П1В19(45) 0,01%	192	8,0 ± 0,19*	52,2 ± 1,46*	1,45 ± 0,14*	278,4	480,0	191	7,9 ± 0,28*	49,9 ± 1,94*	1,55 ± 0,15*	296,1	158,8
ПШ6(76) 0,01%	358	6,4 ± 0,21	38,2 ± 1,74	1,33 ± 0,09*	476,1	821,0	281	6,4 ± 0,17	40,4 ± 1,09	1,23 ± 0,11	345,6	185,3
ПШ6(77) 0,01%	296	6,1 ± 0,17	38,8 ± 0,97	1,07 ± 0,15*	316,7	546,1	236	6,4 ± 0,10	41,8 ± 1,62	1,14 ± 0,09	296,0	158,7
ПШ7(79) 0,01%	288	6,8 ± 0,12*	42,4 ± 1,94	1,0 ± 0,25*	288,0	496,6	199	7,0 ± 0,55	42,0 ± 4,32	1,17 ± 0,21	232,8	124,8
ПШ3(82) 0,01%	194	6,6 ± 0,16*	39,4 ± 2,54	1,12 ± 0,11*	217,3	374,7	328	7,33 ± 0,31	43,7 ± 2,42	1,27 ± 0,12	416,6	223,4
ПШ6(82) 0,01%	232	7,4 ± 0,30*	48,2 ± 0,66*	1,29 ± 0,11*	299,3	516,0	238	7,48 ± 0,27	48,0 ± 1,74*	1,28 ± 0,10*	304,6	163,3
П1В19(86) 0,01%	264	6,5 ± 0,06*	44,4 ± 1,36*	1,12 ± 0,11*	295,7	509,8	216	6,94 ± 0,30	43,7 ± 2,21	1,24 ± 0,15	267,8	143,6
П114(108) 0,01%	216	6,6 ± 0,17*	43,2 ± 1,88	0,74 ± 0,09*	159,8	275,6	203	6,4 ± 0,20	39,6 ± 1,42	0,84 ± 0,05	170,5	91,4

Примечание: контроль – исходный образец; * – различия с исходным образцом; Δ – различия по годам при P < 0,05
Note: the control is the original accession; * – differences from the original accession; Δ – differences by years at P < 0,05

Таблица 3. Оценка перспективных мутантных образцов ячменя по селекционным индексам в разные годы исследования
(Нижнетагдинский район, Тюменская область)
Table 3. Assessment of promising mutant barley accessions according to breeding indices in different years of research
(Nizhnetavdinsky District, Tyumen Province)

Образец / Accession	2021 г.							2022 г.										
	ИПК / EPI	КИ / CI	ИПЛ / ILED	МИ / MI	ИПП / PPI	ФСИ / FSI	ИПК / EPI	КИ / CI	ИПЛ / ILED	МИ / MI	ИПП / PPI	ФСИ / FSI	ИПК / EPI	КИ / CI	ИПЛ / ILED	МИ / MI	ИПП / PPI	ФСИ / FSI
'Зерноградский 813'	0,085	0,115	3,19	0,010	2,207	0,271	0,084	0,141	3,09	0,012	2,923	0,259	0,084	0,141	3,09	0,012	2,923	0,259
P19(37) 0,002%	0,099	0,123	3,16	0,012	2,493	0,313	0,086	0,144	3,21	0,012	3,351	0,276	0,086	0,144	3,21	0,012	3,351	0,276
Dz02-129	0,087	0,153	6,40	0,013	5,662	0,557	0,063	0,147	5,79	0,009	6,043	0,364	0,063	0,147	5,79	0,009	6,043	0,364
ЭП5(55) 0,002%	0,085	0,220	6,69	0,019	9,429	0,571	0,064	0,212	5,24	0,014	7,321	0,337	0,064	0,212	5,24	0,014	7,321	0,337
С.1. 10995	0,096	0,076	6,61	0,007	3,023	0,635	0,081	0,143	5,58	0,012	5,416	0,450	0,081	0,143	5,58	0,012	5,416	0,450
П117(12) 0,01%	0,095	0,152	6,09	0,014	6,211	0,579	0,092	0,152	5,73	0,014	6,239	0,525	0,092	0,152	5,73	0,014	6,239	0,525
П1V19(44) 0,01%	0,107	0,138	6,58	0,015	5,984	0,701	0,074	0,184	6,40	0,014	8,485	0,474	0,074	0,184	6,40	0,014	8,485	0,474
П1V19(45) 0,01%	0,116	0,181	6,53	0,021	9,461	0,755	0,082	0,196	6,32	0,016	9,793	0,519	0,082	0,196	6,32	0,016	9,793	0,519
П1П6(76) 0,01%	0,099	0,208	5,97	0,021	7,938	0,591	0,067	0,191	6,30	0,013	7,724	0,420	0,067	0,191	6,30	0,013	7,724	0,420
П1П6(77) 0,01%	0,095	0,175	6,36	0,017	6,806	0,605	0,073	0,178	6,51	0,013	7,442	0,473	0,073	0,178	6,51	0,013	7,442	0,473
П1П7(79) 0,01%	0,098	0,147	6,24	0,014	6,235	0,608	0,070	0,168	6,01	0,012	7,048	0,418	0,070	0,168	6,01	0,012	7,048	0,418
П1П3(82) 0,01%	0,104	0,170	5,97	0,018	6,686	0,622	0,077	0,173	5,96	0,013	7,560	0,458	0,077	0,173	5,96	0,013	7,560	0,458
П1П6(82) 0,01%	0,114	0,174	6,51	0,020	8,402	0,742	0,078	0,171	6,42	0,013	8,185	0,498	0,078	0,171	6,42	0,013	8,185	0,498
П1V19(86) 0,01%	0,096	0,172	6,83	0,017	7,650	0,658	0,073	0,179	6,30	0,013	7,818	0,458	0,073	0,179	6,30	0,013	7,818	0,458
П114(108) 0,01%	0,124	0,112	6,55	0,014	4,844	0,813	0,077	0,132	6,19	0,010	5,222	0,478	0,077	0,132	6,19	0,010	5,222	0,478
'Ача'	0,118	0,053	2,04	0,006	0,591	0,240	0,076	0,110	2,53	0,008	1,907	0,192	0,076	0,110	2,53	0,008	1,907	0,192
'Абалак'	0,052	0,106	4,79	0,006	1,676	0,251	0,069	0,120	2,88	0,008	2,173	0,198	0,069	0,120	2,88	0,008	2,173	0,198

Примечание: ИПК – индекс потенциала колоса, см/см; КИ – канадский индекс, г/см; ИПЛ – индекс линейной плотности колоса, шт./см; МИ – мексиканский индекс, г/см; ИПП – индекс продуктивности растений, шт. × г/см; ФСИ – финско-скандинавский индекс, шт./см

Note: EPI – ear potential index, cm/cm; CI – Canadian index, g/cm; ILED – index of linear ear density, pcs./cm; MI – Mexican index, g/cm; PPI – plant productivity index, pcs. × g/cm; FSI – Finnish-Scandinavian index, pcs./cm

ну и колос, что нашло отражение в индексе потенциала колоса, который варьировал в более широких пределах в благоприятных условиях (от 0,054 до 0,128 см/см), чем при дефиците осадков (от 0,068 до 0,124 см/см). У отобранных мутантов отношение длины колоса к высоте растения в 2022 г. было ниже, чем в 2021 г. (см. табл. 3). Близкими значениями, независимо от особенностей вегетационного периода, характеризовался индекс потенциала колоса у исходного сорта 'Зерноградский 813' и мутанта, полученного на основе образца из Перу, П117(12) 0,01%.

В исследованиях И. П. Сафоновой и Н. И. Аниськова (Safonova, Aniskov, 2023) на озимой ржи к числу лучших по данному показателю отнесены сорта с индексом потенциала колоса от 0,09 и выше. В нашем исследовании в 2021 г. у большинства образцов ячменя отношение длины колоса к высоте растения превышало 0,09, а в 2022 г. только один мутантный образец П117(12) 0,01% выделился по этому показателю (0,092).

Определить степень засухоустойчивости сорта можно на основе канадского индекса, который используют в зонах, где типична весенне-летняя засуха (Safonova, Aniskov, 2022, 2023).

В литературных источниках встречаются сведения, что при отборе по канадскому индексу теряется часть засухоустойчивых генотипов, и отмечается, что для условий Западной Сибири, где типичной считается весенне-летняя засуха, этот индекс непригоден (Kocherina, Dragavtsev, 2008; Maltseva et al., 2020). В последние годы, по нашим наблюдениям, в Тюменской области продолжительность и сроки наступления засушливых периодов в течение вегетации растений изменились, что позволяет использовать канадский индекс.

По величине удельного урожая колоса в 2021 г. выделились три мутантных образца, у которых канадский индекс превышал 0,180 г/см, в 2022 г. – четыре образца, что позволяет говорить об их потенциальной засухоустойчивости. В целом данный показатель у изученных мутантов варьировал от 0,031 до 0,220 г/см в 2021 г. и от 0,080 до 0,235 г/см в 2022 г.

Индекс линейной плотности колоса дает возможность получить информацию по взаимосвязи «генотип – среда» (Safonova, Aniskov, 2023). Отношение числа зерен с колоса к длине колоса у большинства мутантов, полученных на основе многорядных образцов, превышало 6 шт. на 1 см длины колоса, у двурядных образцов, в том числе у стандартов, индекс линейной плотности составлял от 2 до 5 зерновок на 1 см. В 2021 г. к числу лучших по этому показателю отнесены девять мутантных форм, в 2022 г. – восемь. У ряда образцов в оба года исследования отмечено стабильное проявление индекса линейной плотности колоса: П1V19(44) 0,01%, П1V19(45) 0,01%, П1I6(77) 0,01%, П1I7(79) 0,01%, П1I6(82) 0,01%, П1V19(86) 0,01%, П114(108) 0,01%. Данный показатель варьировал в условиях дефицита влаги от 2,51 до 7,10 шт./см, в благоприятных условиях – от 2,51 до 6,59 шт./см.

Мексиканский индекс учитывает продуктивность колоса во взаимосвязи с высотой растения, показывая способность соломины нести нагрузку колоса и устойчивость к полеганию (Safonova, Aniskov, 2022, 2023). Под действием теплового и водного стрессоров образцы ячменя в 2021 г. отличались низкорослостью и меньшей массой зерна с растения по сравнению с 2022 г.; за счет

этого у большинства перспективных мутантов мексиканский индекс был выше, чем в более благоприятных условиях. По данному показателю в 2021 г. выделились четыре образца: ЭП15(55) 0,002%, П1V19(45) 0,01%, П1I6(76) 0,01%, П1I6(82) 0,01%, у которых отношение массы зерна к высоте растения превышало 0,018 г/см. В 2022 г. максимальное значение мексиканского индекса составило 0,016 г/см (у мутанта П1V19(45) 0,01%). В целом по мутантным образцам индекс изменялся в 2021 г. от 0,03 до 0,021 г/см, в 2022 г. – от 0,05 до 0,016 г/см.

И. Р. Манукян с соавторами (Manukyan et al., 2019) отмечают невысокую информативность таких индексов, как полтавский, мексиканский, канадский и индекс линейной плотности колоса, так как связь между показателями, на основе которых они получены, не прямая, а косвенная. Поэтому авторами был предложен индекс продуктивности растений, который рассчитывается по трем главным признакам колоса: длина, число и масса зерен с колоса. В исследованиях И. Р. Манукян с соавторами на озимой пшенице установлено, что абсолютные значения индекса продуктивности растений широко варьируют, что повышает его информативность и увеличивает точность оценки адаптивных свойств селекционного материала (Manukyan et al., 2019).

В нашем исследовании индекс продуктивности растений изменялся в широких пределах (1,133–9,461 шт. × г/см в 2021 г., 2,113–10,280 шт. × г/см в 2022 г.); минимальная величина этого показателя отмечена у стандартных образцов в оба года исследования. При недостаточной влагообеспеченности и в относительно благоприятных условиях к числу лучших по индексу продуктивности растений отнесены образцы П1V19(45) 0,01%, П1I6(82) 0,01%; кроме того, по данному показателю выделились ЭП15(55) 0,002% (2021 г.), П1V19(44) 0,01% (2022 г.).

Финско-скандинавский индекс позволяет дать характеристику генотипа по зернообразующей способности (Safonova, Aniskov, 2022). Большинство мутантных образцов по зернообразующей способности превосходили исходные формы в оба года исследования. В целом у изученных мутантов диапазон варьирования финско-скандинавского индекса в 2021 г. составил 0,281–0,813 шт./см, в 2022 г. – 0,212–0,547 шт./см. В условиях дефицита влаги растения ячменя отличались более высокой зернообразующей способностью; у лучших образцов величина финско-скандинавского индекса превышала в 2021 г. 0,7 шт./см, в 2022 г. – 0,5 шт./см.

По комплексу индексов среди лучших мутантов выделился один – П1V19(45) 0,01%, стабильно превышавший исходную форму по признакам продуктивности в оба года исследования. В засушливых условиях высокими значениями отдельных индексов также отличались мутанты ЭП15(55) 0,002%, П1V19(44) 0,01%, П1I6(82) 0,01% и П114(108) 0,01%.

Использование селекционных индексов, имеющих достоверную корреляционную связь с урожайностью, является одним из важнейших этапов селекционной работы (Zenkina, Aseeva, 2020). По нашим результатам в условиях недостаточной влагообеспеченности отмечается тесная корреляция между урожайностью и канадским индексом ($r = 0,85$), мексиканским индексом ($r = 0,76$) и индексом продуктивности растений ($r = 0,70$), тогда как в благоприятных условиях связь урожайности с перечисленными индексами ослабевает.

Заключение

У изученных генотипов прослеживается общая закономерность реакции на водный и тепловой стресс в 2021 г., проявившаяся в снижении урожайности и ее составляющих. Наибольшая чувствительность к неблагоприятным факторам среды наблюдалась по длине колоса и массе зерна с колоса.

Ценность для практической селекции представляют 12 мутантных образцов, характеризующиеся стабильным проявлением признаков продуктивности в меняющихся условиях среды.

На основе селекционных индексов выделены потенциально засухоустойчивые генотипы П1V19(44), П1V19(45), П1П6(82), созданные с помощью химического мутагена фосфемиды после обработки семян образца из Перу (С.1. 10995, к-30630) в концентрации 0,01%, а также ЭП15(55) после обработки образца из Эфиопии (Dz02-129, к-22934) в концентрации 0,002%.

Полученные данные позволяют говорить о целесообразности использования трех индексов (канадский, мексиканский, индекс продуктивности растений) для отбора перспективных форм ячменя в стрессовых условиях.

References / Литература

- Batakova O.B., Korelina V.A. The effect of yield structure elements on spring barley (*Hordeum vulgare* L.) productivity in the environments of Russia's Extreme North. *Proceedings of Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(3):50-58. [in Russian] (Батакова О.Б., Корелина В.А. Влияние элементов структуры урожая на продуктивность ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) в условиях Крайнего Севера РФ. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(3):50-58). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-3-50-58
- Beletskaya Ye.Ya., Krotova L.A. Creation of innovative breeding material for sustainable grain production of soft wheat. *Modern Management Technology*. 2022;2(98):9801. [in Russian] (Белецкая Е.Я., Кротова Л.А. Создание инновационного селекционного материала для устойчивого зернового производства мягкой пшеницы. *Современные технологии управления*. 2022;2(98):9801). DOI: 10.24412/2226-9339-2022-298-1
- Bome N.A., Tetjannicov N.V., Weisfeld L.I., Kolokolova N.N., Wasserman L.A., Goldstain V.G. et al. The content of starch and amylose in the grain of mutant populations of barley. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2020;(4):243-250. [in Russian] (Боме Н.А., Тетяников Н.В., Вайсфельд Л.И., Колоколова Н.Н., Вассерман Л.А., Гольдштейн В.Г. и др. Содержание крахмала и амилозы в зерне мутантных популяций ячменя. *Химия растительного сырья*. 2020;(4):243-250). DOI: 10.14258/jcprgm.2020048010
- Bome N.A., Weisfeld L.I., Korolev K.P., Tetiannikov N.V. Reaction of various types of plants M_1 on the action of the chemical mutagen of phosphemide. *Modern Science Success*. 2017;1(9):121-124. [in Russian] (Боме Н.А., Вайсфельд Л.И., Королёв К.П., Тетяников Н.В. Реакция различных видов растений M_1 на воздействие химического мутагена фосфемиды. *Успехи современной науки*. 2017;1(9):121-124).
- Danilova T.N. Influence of hydrogels on indicators of the harvest structure of grain crops under model soil dry "dryer" and in field conditions. *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2021;64(3):31-39. [in Russian] (Данилова Т.Н. Влияние гидрогелей на показатели структуры урожая зерновых культур в условиях модельной почвенной засухи «засушник» и в полевых условиях. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2021;64(3):31-39). DOI: 10.24412/2078-1318-2021-3-31-39
- Dragavtsev V.A. Ecologogenetic organization of polygenic traits of plants and the theory of selection indices. *Molecular and Applied Genetics*. 2009;9:7-13. [in Russian] (Драгавцев В.А. Эколого-генетическая организация полигенных признаков растений и теория селекционных индексов. *Молекулярная и прикладная генетика*. 2009;9:7-13).
- Dudin G.P., Balakhontseva L.N. Mutational variability of barley affected by potassium carbonate and red emission. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2013;10(108):32-37. [in Russian] (Дудин Г.П., Балахонцева Л.Н. Мутационная изменчивость растений ячменя под влиянием карбоната калия и излучения красного диапазона. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2013;10(108):32-37).
- Ermolaeva T.Ya., Nuzhdina N.N., Goverdov D.V., Salmanova N.A., Fedotova N.M. Comparative evaluation of winter rye varieties by economic and biological indicators. *Advances in Current Natural Sciences*. 2019;(7):14-20. [in Russian] (Ермолаева Т.Я., Нуждина Н.Н., Говердов Д.В., Салманова Н.А., Федотова Н.М. Сравнительная оценка сортов озимой ржи по хозяйственно-биологическим показателям. *Успехи современного естествознания*. 2019;(7):14-20).
- Kocherina N.V., Dragavtsev V.A. Introduction to the theory of ecological and genetic organization of polygenic traits of plants and the theory of breeding indices (Vvedeniye v teoriyu ekologo-geneticheskoy organizatsii poligennykh priznakov rasteniy i teoriyu selektsionnykh indeksov). St. Petersburg: STsDB; 2008. [in Russian] (Кочерина Н.В., Драгавцев В.А. Введение в теорию эколого-генетической организации полигенных признаков растений и теорию селекционных индексов. Санкт-Петербург: СЦДБ; 2008).
- Konovalov Yu.B., Sidorenko V.S. Association of yield and productivity of spring barley cultivars with yield structure components and other indicators (Svyaz urozhaynosti i produktivnosti sortov yarovogo yachmenya s elementami struktury urozhaya i drugimi pokazatelyami). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1990;(4):74-81. [in Russian] (Коновалов Ю.Б., Сидоренко В.С. Связь урожайности и продуктивности сортов ярового ячменя с элементами структуры урожая и другими показателями. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 1990;(4):74-81).
- Krotova L.A. Chemical mutagenesis as a method of creating an initial material for breeding wheat. *Research and Scientific Electronic Journal of Omsk SAU*. 2015;2(2):3. [in Russian] (Кротова Л.А. Химический мутагенез как метод создания исходного материала для селекции мягкой пшеницы. *Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ*. 2015;2(2):3). URL: <http://e-journal.omgau.ru/index.php/2015-god/2/19-statya-2015-2/145-00034> [дата обращения: 11.10.2023].
- 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 sokhraneniyyu mirovoy kollektzii 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).

- Main results of the agricultural microcensus of 2021. Statistical collection (Osnoynye itogi sel'skoxozyaystvennoy mikroperepisi 2021 goda. Statisticheskiy sbornik). Moscow: Federal Service of State Statistics; 2022. [in Russian] (Основные итоги сельскохозяйственной микропереписи 2021 года. Статистический сборник. Москва: Федеральная служба государственной статистики; 2022). URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Census_agr_2021_final.pdf [дата обращения: 28.09.2023].
- Maltseva L., Filippova E., Bannikova N., Kataeva N. Efficiency of selection in breeding indeces in the contrasting conditions of the Trans-Urals. *Vestnik Bashkir State Agrarian University*. 2020;2(54):32-38. [in Russian] (Мальцева Л.Т., Филиппова Е.А., Банникова Н.Ю., Катаева Н.В. Эффективность отбора по селекционным признакам в контрастных условиях Зауралья. *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2020;2(54):32-38). DOI: 10.31563/1684-7628-2020-54-2-32-38
- Manukyan I.R., Basieva M.A., Miroshnikova E.S., Abiev V.B. Usage of a new plant productivity index for evaluation of winter wheat breeding material. *Volga Region Farmland*. 2019;2(2):34-39. DOI: 10.26177/VRF.2019.2.2.009
- Manukyan I.R., Basiyeva M.A., Abiyev V.B. The evaluation of the productivity of breeding samples of winter wheat in the conditions of a foothill zone of the Central Caucasus. *Volga Region Farmland*. 2018;4(49):78-83. [in Russian] (Манукян И.Р., Басиева М.А., Абиев В.Б. Оценка продуктивности селекционных образцов озимой пшеницы в условиях предгорной зоны Центрального Кавказа. *Нува Поволжья*. 2018;4(49):78-83).
- Moiseev S.A., Ryabkin E.A., Kargin V.I., Kamalikhin V.E. Influence of sowing dates on the yield structure of spring barley (Vliyaniye srokov seva na strukturu urozhaya yarovogo yachmenya). *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya = Trends in the Development of Science and Education*. 2022;(81-1):13-15. [in Russian] (Моисеев С.А., Рябкин Е.А., Каргин В.И., Камалихин В.Е. Влияние сроков сева на структуру урожая ярового ячменя. *Тенденции развития науки и образования*. 2022;(81-1):13-15). DOI: 10.18411/trnio-01-2022-04
- Nazarenko N.N. Rate and spectra of chromosomal aberrations after action of some chemical mutagens. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016;21(5):1897-1901. [in Russian] (Назаренко Н.Н. Частота и спектр хромосомных aberrаций после воздействия некоторыми химическими мутагенами. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016;21(5):1897-1901). DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-5-1897-1901
- Nikolaev P.N., Popoluzhkhin P.V., Anisimov N.I., Yusova O.A., Safonova I.V. Evaluation of the adaptive properties of spring barley varieties according to their yield capacity in the environments of the Near-Irtysh area in Omsk Province. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(2):96-105. [in Russian] (Николаев П.Н., Пополухин П.В., Аниськов Н.И., Юсова О.А., Сафонова И.В. Оценка адаптивных свойств ярового ячменя по урожайности в условиях Омского Прииртышья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(2):96-105). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-2-96-105
- Pomelov A.V., Dudin G.P. Evaluating mutants of spring barley obtained when treating seeds with fungicides. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2008;6(186):26-31. [in Russian] (Помелов А.В., Дудин Г.П. Оценка мутантов ярового ячменя, полученных при обработке семян фунгицидами. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2008;6(186):26-31).
- Safonova I.V., Aniskov N.I. Agroecological assessment of winter rye varieties by economic, biological and adaptive indicators. *Perm Agrarian Journal*. 2023;1(41):63-71. [in Russian] (Сафонова И.В., Аниськов Н.И. Агроэкологическая оценка сортов озимой ржи по хозяйственно-биологическим и адаптивным показателям. *Пермский аграрный вестник*. 2023;1(41):63-71). DOI: 10.47737/2307-2873_2023_41_63
- Safonova I.V., Aniskov N.I. The importance of a comprehensive assessment of breeding indices and stress resistance parameters of winter rye varieties. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2022;6(221):16-26. [in Russian] (Сафонова И.В., Аниськов Н.И. Значимость комплексной оценки селекционных индексов и параметров стрессоустойчивости сортов озимой ржи. *Аграрный вестник Урала*. 2022;6(221):16-26). DOI: 10.32417/1997-4868-2022-221-06-16-26
- Selyanin G.T. To the methodology of agricultural climatology (K metodike sel'skoxozyaystvennoy klimatografii). *Contributions to Agricultural Meteorology*. 1930;2(22):45-91. [in Russian] (Селянин Г.Т. К методике сельскохозяйственной климатологии. *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. 1930;2(22):45-91).
- Sidorenko V.S., Naumkin D.V., Kostromicheva V.A., Starikova Zh.V., Uhova F.V. Prospects of selection of the naked barley and oats in the Central Russia. *Legumes and Groat Crops*. 2016;1(17):78-83. [in Russian] (Сидоренко В.С., Наумкин Д.В., Костромичева В.А., Старикова Ж.В., Ухова Ф.В. Перспективы селекции голозерного ячменя и овса в Центральной России. *Зернобобовые и крупные культуры*. 2016;1(17):78-83).
- Tetyannikov N.V., Bome N.A. Studies on mutagenic effect of phosphemide in barley. *Proceedings on Applied Botany Genetics and Breeding*. 2022;183(4):141-151. [in Russian] (Тетяников Н.В., Боме Н.А. Исследование мутагенного эффекта фосфемиды на ячмене. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(4):141-151). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-141-151
- Weisfeld L.Y., Bome N.A. Theoretical aspects of chemical mutagens and phenotypic growth activators developed by I.A. Rapoport (A review). *Biosfera. Interdisciplinary Journal of Basic and Applied Sciences*. 2022;14(3):245-253. [in Russian] (Вайсфельд Л.И., Боме Н.А. Теоретические аспекты химических мутагенов и фенотипических активаторов роста растений, разработанные И.А. Рапопортом (обзор литературных источников). *Биосфера. Междисциплинарный научный и прикладной журнал*. 2022;14(3):245-253). DOI: 10.24855/biosfera.v14i3.689
- Yemelyev S.A. Evaluation of the Bios-1 barley variety's mutant form. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2007;8(34):13-16. [in Russian] (Емелев С.А. Оценка мутантных форм ячменя сорта Биос-1. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2007;8(34):13-16).
- Zenkina K.V., Aseeva T.A. Promising triticale breeding lines for the Far Eastern region. *Far East Agrarian Bulletin*. 2020;1(53):13-19. [in Russian] (Зенкина К.В., Асеева Т.А. Перспективные селекционные линии тритикале для Дальневосточного региона. *Дальневосточный аграрный вестник*. 2020;1(53):13-19). DOI: 10.24411/1999-6837-2020-11002

Информация об авторах

Анна Алексеевна Белозерова, кандидат биологических наук, доцент, Тюменский государственный университет, 625003 Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6, anna-bel@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3948-5167>

Денис Александрович Базюк, аспирант, младший научный сотрудник, Тюменский государственный университет, 625003 Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6, bazjukdenis97@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7676-9260>

Нина Анатольевна Боме, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующая кафедрой, Тюменский государственный университет, 625003 Россия, Тюмень, ул. Володарского, 6, bomena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5467-6538>

Information about the authors

Anna A. Belozerova, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen 625003, Russia, anna-bel@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3948-5167>

Denis A. Bazyuk, Postgraduate Student, Associate Researcher, University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen 625003, Russia, bazjukdenis97@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7676-9260>

Nina A. Bome, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Head of a Department, University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen 625003, Russia, bomena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5467-6538>

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 19.10.2023; одобрена после рецензирования 21.01.2024; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 19.10.2023; approved after reviewing on 21.01.2024; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 634.22:631.526.3:581.132

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-39-50



Особенности водного режима и фотосинтеза гибридных форм алычи в условиях засухи

А. В. Григорьев, Р. А. Пилькевич, Л. А. Лукичева, Т. Б. Губанова, В. М. Горина

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, Ялта, Россия

Автор, ответственный за переписку: Александр Викторович Григорьев, alex_grigoriev_1994@mail.ru

Актуальность. В статье представлены результаты изучения засухоустойчивости гибридных форм алычи. В ходе исследований определяли водоудерживающую способность листьев и флуоресценцию хлорофилла при имитации условий, близких к засухе.

Материалы и методы. Изучение параметров водного режима пяти генотипов алычи проводили в 2021 и 2022 г. Для эксперимента брали листья четырех гибридных форм алычи селекции Никитского ботанического сада и контрольного сорта алычи гибридной 'Румяная Зорька' (*Prunus rossica* Erem.). Согласно методике Г. Н. Еремеева и А. И. Лищука, для оценки функционального состояния фотосинтетического аппарата при развитии водного стресса в условиях засухи у алычи была проведена серия экспериментов по контролируемому увяданию листьев при температуре воздуха +27°C, относительной влажности 30%. Опыты проводили в климатической камере Binder. Определение флуоресценции хлорофилла осуществляли на портативном флуориметре «Флоратест». Основой измерений явились показатели кривой индукции флуоресценции хлорофилла (ИФХ), полученной на нативных листьях. Контролем служили листья сорта 'Румяная Зорька' в состоянии полного оводнения.

Результаты и обсуждение. У исследуемых образцов прослеживается зависимость показателей флуоресценции хлорофилла листьев от содержания влаги. Выявлено, что гибриды реагируют на засуху по-разному. С относительно повышенной способностью удерживать влагу в процессе обезвоживания выделяется форма 12/26, листья которой медленнее отдают влагу и лучше восстанавливают тургор. Она является перспективной для выращивания в районах с недостаточным водообеспечением. Самой низкой потенциальной засухоустойчивостью отличается форма 99/36. Формы 99/14 и 9/28 заняли промежуточное положение.

Ключевые слова: *Prunus cerasifera* Ehrh., устойчивость к засухе, индукция флуоресценции хлорофилла, водоудерживающая способность

Благодарности: исследования проводили в рамках государственного задания № FNNS-2022-0008 «Пополнить, изучить генофонд южных плодовых, орехоплодных и ягодных культур и на его базе создать новые сорта с комплексом хозяйственно ценных признаков для промышленного садоводства», порученного Никитскому ботаническому саду – Национальному научному центру РАН.

Исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Физиолого-биохимические методы исследования растительных объектов» Никитского ботанического сада – Национального научного центра РАН (Ялта, Россия).

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

Для цитирования: Григорьев А.В., Пилькевич Р.А., Лукичева Л.А., Губанова Т.Б., Горина В.М. Особенности водного режима и фотосинтеза гибридных форм алычи в условиях засухи. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):39-50. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-39-50

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-39-50

Features of the water regime and photosynthesis in hybrid forms of cherry plum under the dry wind season conditions

Alexander V. Grigoriev, Ruslana A. Pilkevich, Lyubov A. Lukicheva, Tatyana B. Gubanova, Valentina M. Gorina

Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, Yalta, Russia

Corresponding author: Alexander V. Grigoriev, alex_grigoriev_1994@mail.ru

Background. The results of a study on the drought resistance of cherry plum hybrid forms are presented. Water retention capacity of leaves and chlorophyll fluorescence were measured under the simulated conditions close to the dry wind season.

Materials and methods. The water regime parameters were studied for five cherry plum genotypes in 2021 and 2022. Leaves of four hybrid forms developed at the Nikita Botanical Gardens and the reference cherry plum hybrid cultivar 'Rumyanaya Zorka' (*Prunus rossica* Erem.) were taken into the experiments. Using the guidelines by G. N. Ereemeev and A. I. Lishchuk, a series of experiments on controlled leaf wilt at the air temperature of +27°C and relative humidity of 30% were conducted on cherry plum to assess the functional state of the photosynthetic apparatus during the development of water stress under dry wind conditions. The experiments were carried out in a Binder climate chamber. Chlorophyll fluorescence was measured using a portable Floratest fluorometer. The measurements were based on the parameters of the chlorophyll fluorescence induction curve (CFI) obtained on native leaves. The leaves of cv. 'Rumyanaya Zorka' in the state of complete watering served as the reference.

Results and discussion. Dependence was identified between chlorophyll fluorescence and moisture content in the leaves of the studied samples. The hybrids were found to respond to drought in different ways. A relatively increased ability to retain moisture during dehydration was observed in form 12/26 whose leaves gave off moisture more slowly and restored their turgor better. It is promising for cultivation in areas with insufficient water supply. Form 99/36 had the lowest potential drought resistance. Forms 99/14 and 9/28 occupied an intermediate position.

Keywords: *Prunus cerasifera* Ehrh., drought resistance, chlorophyll fluorescence induction, water retention capacity

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of State Task No. FNNS-2022-0008 "Replenish and study the genetic diversity of southern fruit, nut and berry crops, and develop on its basis new cultivars with a set of valuable agronomic traits for industrial horticulture" assigned to the Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the RAS. The studies were carried out on the equipment of the Center for Collective Use "Physiological and Biochemical Methods for Studying Plant Objects", Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the RAS (Yalta, Russia). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Grigoriev A.V., Pilkevich R.A., Lukicheva L.A., Gubanova T.B., Gorina V.M. Features of the water regime and photosynthesis in hybrid forms of cherry plum under the dry wind season conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):39-50. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-39-50

Список сокращений

ФС-2 – фотосистема 2;

F_0 – базовый уровень флуоресценции, зависящий от потерь энергии возбуждения во время миграции по пигментной матрице, а также от содержания молекул хлорофилла, не имеющих функциональной связи с реакционными центрами (РЦ);

FpI – уровень флуоресценции в момент достижения ее временного замедления;

Fm – максимальное значение флуоресценции;

Fst – стационарный уровень флуоресценции (показатель количества хлорофиллов, не принимающих участие в передаче энергии на РЦ);

$Fv = Fm - F_0$ – вариабельная флуоресценция (индикатор фотохимических окислительно-восстановительных процессов);

$(Fm - Fst)/Fm$ – относительная фотосинтетическая активность;

Fv/Fst – коэффициент спада флуоресценции, эффективность квантового выхода фотосинтеза (индекс жизнеспособности);

Fv/Fm – эффективность световой фазы фотосинтеза;

$(FpI - F_0)/Fv$ – количество невосстановленных Q_a в реакционных центрах ФС II;

Fv/F_0 – соотношение констант скоростей первичной фотохимической реакции и общей скорости нефотохимической потери энергии возбуждения в ФС II (Romanov et al., 2010; Goltsev et al., 2014).

Введение

На фоне меняющихся климатических условий повышение продуктивности многолетних плодовых растений за счет сортов, устойчивых к стрессам, особенно к дефициту воды, является одним из важных направлений в селекции плодовых растений. Засуха – стрессовый экологический фактор, участвующий в южных регионах и приводящий к значительному снижению урожая различных культур (Reigosa Roger, Weiss, 2001).

Метеорологические условия последнего десятилетия на территории Республики Крым в период, когда идет закладка цветковых почек и формирование плодов, значительно отличаются от средних многолетних показателей. Это выражается в недостаточном количестве осадков, длительности засушливых периодов, которые отрицательно влияют на устойчивость растений, а также и на их урожайность (Ryabov, 2011; Grigoriev et al., 2022).

Устойчивость к разным типам стрессоров – это часть адаптивного потенциала плодового растения, представляющего собой сложный комплекс физиологических процессов, связанных со спецификой негативных факторов и генотипом растений (Eremeev, Lishchuk, 1974).

Известно, что плодовые косточковые культуры значительно различаются по признаку засухоустойчивости (Eremin, 2008). При недостатке воды в почве в начале вегетационного периода у них происходят функциональные нарушения в виде уменьшения количества запасных веществ, общего прироста, снижения тургора листьев, размера плодов и ухудшения их качества, приостановки развития листового аппарата и ассимиляционной активности листьев, отмирания почек и небольших веточек. При воздействии атмосферной засухи на краях листьев сливы, черешни, персика и других косточковых культур появляются ожоги (Kushnirenko, 1975). В условиях ано-

мального недостатка влаги в почве и в воздухе начинаются нарушения в процессе метаболизма растений, что отрицательно сказывается на общей продуктивности (Ryabov, 2011). В связи с вышеизложенным очевидно, что знание механизмов устойчивости к засухе позволит выделить более засухоустойчивые сорта, минимизировать капитальные затраты на орошение и снизить негативное воздействие на продуктивность плодовых растений (Gorina et al., 2017). Поскольку изменения в первичных процессах фотосинтеза, связанные со стрессовым состоянием, появляются задолго до видимых повреждений, анализ параметров индукции флуоресценции хлорофилла является информативным способом диагностики состояния растений (Goltsev et al., 2014).

Цель работы – выявить влияние засухи на функционирование фотосинтетического аппарата гибридных форм алычи в связи с проблемой их засухоустойчивости.

Материалы и методы

Изучение параметров водного режима пяти генотипов алычи проводили в 2021 и 2022 г. Для эксперимента брали листья четырех гибридных форм алычи: 12/26 ('Румяная Зорька' × 'Пурпуровая'), 9/28 ('Награда', свободное опыление), 99/36 ('Крымская Шаровидная', свободное опыление) и 99/14 ('Оленька', свободное опыление). В создании исходных сортов принимали участие слива русская (*Prunus rossica* Erem.) – 'Румяная Зорька', 'Награда', 'Оленька' (Eremin, 2003); алыча крупноплодная типичная (*P. cerasifera* Ehrh. subsp. *macrocarpa* Erem. et Garscov. var. *macrocarpa*) – 'Пурпуровая' и алыча крупноплодная таврическая (*Prunus cerasifera* Ehrh. subsp. *macrocarpa* Erem. et Garscov. var. *taurica* (Kost.) Erem. et Garscov. – 'Крымская Шаровидная' (Eremin, 2002; Vitkovskiy, 2003). В качестве контроля использовали сорт селекции Никитского ботанического сада 'Румяная Зорька' (*P. rossica*). Исследования осуществляли в первых декадах июля, августа и сентября соответственно. Листья отбирали из средней части кроны с четырех сторон в утренние часы.

Для выявления особенностей водного режима и оценки функционального состояния фотосинтетического аппарата при развитии водного стресса в условиях засухи провели серию экспериментов по контролируемому увяданию гибридных форм и контрольного сорта при температуре воздуха +27°C, относительной влажности 30%. Контролем служили листья в состоянии полного оводнения. Количество листьев в одной пробе не менее 10 шт. Опыты проводили в климатической камере Binder. Определение флуоресценции хлорофилла осуществляли на портативном флуориметре «Флоратест». Основой измерений явились показатели кривой индукции флуоресценции хлорофилла (ИФХ), полученной на нативных листьях.

Показатели потерь влаги в процессе завядания определяли по общепринятой методике (Falkova, 1980). Повторность опытов 3-кратная. Цифровой материал обработан с использованием программы MS Excel 2007. Сбор метеоданных осуществляли на метеостанции Степного отделения (Симферопольский район, с. Новый Сад) (табл. 1).

Результаты и обсуждение

В начале исследований листья всех образцов находились в состоянии полного оводнения. В дальнейшем они подвергались завяданию в лабораторных условиях, ими-

Таблица 1. Агрометеорологические показатели условий проведения эксперимента: июль – сентябрь, Симферопольский район, 2021–2022 гг.**Table 1. Agrometeorological indicators of the experimental conditions: July–September, Simferopol District, 2021–2022**

Агрометеорологические показатели / Agrometeorological indicators	Июль / July		Август / August		Сентябрь / September	
	2021	2022	2021	2022	2021	2022
Средняя температура воздуха, °С	22,4	24,7	23,9	23,5	17,3	15,3
	21,9*		21,1*		16,7*	
Максимальная температура воздуха, °С	30,7	32,2	32,0	31,5	26,2	22,7
	28,1*		27,5*		23,2*	
Сумма осадков, мм	14,0	55,4	20,6	25,0	14,7	51,8
	49*		43*		35*	
Минимальная влажность воздуха, %	45,5	56,5	22,2	23,8	24,0	26,0
	36,5*		26,4*		37,8*	
Максимальная температура на почве, °С	26,1	31,9	25,8	28,2	26,0	24,5
	29,8*		28,0*		25,3*	
Запас продуктивной влаги в метровом слое почвы, мм	30 (10% НВ)		26 (17% НВ)		19 (11% НВ)	

Примечание: * – средние многолетние климатические показатели Степного отделения НБС – ННЦ РАН (1961–1986 гг.)

Note: * – mean long-term climate indicators of the Steppe Department of the NBG – NSC RAS (1961–1986)

тирующих сухостей (температура воздуха +27°C и относительная влажность 30%).

Флуоресценция при физиологически оптимальных температурах испускается преимущественно реакционными центрами хлорофилла *a* фотосистемы-2 (ФС-2) в области длин волн 670–750 нм. Известно, что флуоресценция является неизменным спутником фотосинтеза и ее уровень зависит от интенсивности фотохимических процессов в обратной пропорции: чем меньше фотохимическая работа, тем выше флуоресценция. Слабая флуоресценция типична для жизнеспособности ФС-2, сильная – для ослабленной или ингибированной ФС-2 (Brion et al., 2000).

Проведенные измерения показали, что в июле 2021–2022 гг. оводненность тканей листьев составила от 62,57

до 66,79%, в августе ее показатели снизились на 6–7%. За весь период исследования сравнительно повышенным содержанием воды в листьях отличилась гибридная форма 12/26 (60–67%) (табл. 2).

В эксперименте с контролируемым завяданием в климатической камере листья доводили до потери их тканями 30% влаги. Относительно быстро в июле теряли воду ткани листьев двух форм – 99/36 и 9/28, что не помешало процессам репарации осуществиться на достаточном уровне, то есть после возобновления водообеспечения восстановление тургорности тканей у них проходило с минимальными нарушениями. Практически все исследуемые формы восстановили нормальный тургор тканей до удовлетворительного состояния (82–94%), за исключением гибридной формы 12/26. Несмотря на вы-

Таблица 2. Вододерживающая способность и восстановление тургора листьев алычи, июль (2021–2022 гг.)**Table 2. Water retention capacity and turgor restoration in cherry plum leaves, July (2021–2022)**

Генотип / Genotype	Содержание воды в листьях, % от сырой массы / Water content in leaves, % wet weight	Утрачено воды в процессе увядания, % / Water loss during wilting, %			Листья, восстановившие тургор, % / Leaves that restored turgor, %
		2 часа / 2 hours	3 часа / 3 hours	4 часа / 4 hours	
'Румяная Зорька' (контроль)	64,47	13,65	–	29,75	94
12/26	66,79	19,75	–	30,07	68–70
9/28	62,57	24,53	30,00	–	92
99/36	64,17	30,15	–	–	82
99/14	63,26	20,12	–	28,83	83

сокий уровень восстановления, выявленный при визуальной оценке, изменения в работе ФС-2 были значительными и зависели от генотипа. Так, у контрольного сорта 'Румяная Зорька' и гибридных форм 12/26, 99/36 отмечено снижение вариабельной флуоресценции при достижении 30% водного дефицита и сохранение ее низкого уровня после восстановления водообеспеченности (табл. 3).

Такая ситуация может быть связана с продолжающимся рассеиванием энергии возбуждения в виде тепла и, как следствие, сохранением низкой фотосинтетической активности исследуемых генотипов (Lishchuk, 1991). В процессе завядания у гибридных форм 12/26, 99/36, 9/28 отмечено снижение эффективности квантового выхода фотосинтеза (индекса жизнеспособности) до критических значений и его восстановление до уров-

ня контроля после снятия стресса. Это может быть связано с низкой водоудерживающей способностью гибридных форм 99/36 и 9/28, а также с генетическими особенностями роста и развития листьев растений. Выявлено, что у гибридных форм 99/14 и 99/36 потеря листьями 30% воды вызвала увеличение количества невосстановленных Q_a в реакционных центрах ФС-2. Однако после возобновления водообеспеченности значения этих параметров были близки к контрольным (рис. 1).

В августе динамика водоудерживающей способности в основном оставалась приблизительно на уровне июля. У гибридной формы 99/36 наблюдали небольшое увеличение водоудерживающих сил, но на фоне остальных генотипов именно эта гибридная форма характеризовалась самыми низкими значениями данного параметра.

Таблица 3. Параметры индукционной кривой хлорофилла при развитии водного стресса в листьях гибридных форм алычи, июль (2021–2022 гг.)

Table 3. Parameters of the chlorophyll induction curve during the development of water stress in the leaves of cherry plum hybrid forms, July (2021–2022)

	F_0	F_m	F_{st}	F_v	F_v/F_{st}	F_v/F_m	F_v/F_0	$(F_m - F_{st})/F_m$	$(F_{pl} - F_0)/F_v$
'Румяная Зорька' (контроль)									
контроль	176 ± 6	768 ± 12	256 ± 12	592	2,31	0,77	3,36	0,67	0,11
t = 27°C; RH = 30%	144 ± 5	368 ± 13	128 ± 12	224	1,75	0,61	1,56	0,65	0,14
восстановление	132 ± 7	464 ± 11	125 ± 9	332	2,66	0,72	2,51	0,73	0,22
9/28									
контроль	192 ± 12	832 ± 19	288 ± 9	640	2,22	0,77	3,33	0,65	0,22
t = 27°C; RH = 30%	195 ± 10	608 ± 21	250 ± 11	413	1,65	0,68	2,12	0,59	0,16
восстановление	189 ± 13	704 ± 18	208 ± 8	515	2,47	0,73	2,72	0,70	0,19
99/14									
контроль	208 ± 7	896 ± 12	240 ± 8	688	2,87	0,77	3,31	0,73	0,18
t = 27°C; RH = 30%	136 ± 8	432 ± 11	154 ± 6	296	1,92	0,68	2,18	0,64	0,40
восстановление	144 ± 4	576 ± 19	160 ± 8	440	2,75	0,76	3,05	0,72	0,18
99/36									
контроль	192 ± 7	854 ± 23	320 ± 21	662	2,07	0,78	3,45	0,62	0,16
t = 27°C; RH = 30%	160 ± 8	656 ± 17	192 ± 11	496	2,58	0,76	3,1	0,71	0,22
восстановление	157 ± 8	496 ± 12	160 ± 10	339	2,12	0,68	2,16	0,69	0,24
12/26									
контроль	218 ± 11	912 ± 23	240 ± 10	694	2,89	0,76	3,18	0,74	0,12
t = 27°C; RH = 30%	208 ± 8	704 ± 21	208 ± 9	496	2,38	0,70	2,38	0,70	0,21
восстановление	176 ± 5	640 ± 24	176 ± 9	464	2,64	0,72	2,64	0,72	0,10

Примечание: список сокращений приведен перед «Введением»

Note: the list of abbreviations is given before the Introduction

Таблица 4. Водоудерживающая способность и восстановление тургора листьев алычи, август (2021–2022 гг.)**Table 4. Water retention capacity and turgor restoration in cherry plum leaves, August (2021–2022)**

Генотип / Genotype	Содержание воды в листьях, % от сырой массы / Water content in leaves, % wet weight	Содержание воды в листьях при полном оводнении, % от сырой массы / Water content in leaves at full watering, % wet weight	Утрачено воды в процессе увядания, % / Water loss during wilting, %			Листья, восстановившие тургор, % / Leaves that restored turgor, %
			2 часа / 2 hours	3 часа / 3 hours	4 часа / 4 hours	
'Румяная Зорька' (контроль)	57,86	65,68	20,12	-	28,99	62,5
12/26	60,51	68,51	19,75	-	30,07	77-80
9/28	58,53	63,41	22,26	-	29,88	36-40
99/36	57,35	69,62	25,52	30,03	-	60-62
99/14	57,25	65,82	21,45	-	29,82	65

Таблица 5. Параметры индукционной кривой хлорофилла при развитии водного стресса в листьях гибридных форм алычи, август (2021–2022 гг.)**Table 5. Parameters of the chlorophyll induction curve during the development of water stress in the leaves of cherry plum hybrid forms, August (2021–2022)**

	F ₀	F _m	F _{st}	F _v	F _v /F _{st}	F _v /F _m	F _v /F ₀	(F _m - F _{st})/F _m	(F _{pl} - F ₀)/F _v
'Румяная Зорька' (контроль)									
контроль	160 ± 11	544 ± 23	176 ± 8	384	2,18	0,71	2,40	0,69	0,23
завядание	175 ± 17	544 ± 21	176 ± 6	369	2,10	0,69	2,11	0,69	0,35
восстановление	160 ± 16	576 ± 25	192 ± 12	416	2,17	0,72	2,60	0,67	0,19
9/28									
контроль	192 ± 9	736 ± 10	240 ± 18	544	2,26	0,73	2,83	0,67	0,18
завядание	127 ± 5	368 ± 21	134 ± 15	241	1,80	0,65	1,90	0,63	0,16
восстановление	112 ± 6	432 ± 24	128 ± 11	320	2,5	0,74	2,86	0,70	0,20
99/14									
контроль	176 ± 15	648 ± 19	208 ± 15	472	2,26	0,73	2,68	0,68	0,41
завядание	178 ± 13	576 ± 23	208 ± 14	398	1,91	0,69	2,23	0,64	0,27
восстановление	174 ± 13	640 ± 21	192 ± 12	466	2,43	0,73	2,68	0,70	0,23
99/36									
контроль	160 ± 18	544 ± 21	192 ± 18	384	2,00	0,71	2,40	0,65	0,29
завядание	176 ± 18	464 ± 20	180 ± 16	288	1,60	0,62	1,64	0,61	0,28
восстановление	144 ± 13	480 ± 23	176 ± 12	336	1,90	0,70	2,33	0,63	0,14
12/26									
контроль	176 ± 8	768 ± 24	224 ± 18	592	2,64	0,77	3,36	0,71	2,43
завядание	176 ± 7	496 ± 20	304 ± 15	320	1,05	0,65	1,81	0,39	0,62
восстановление	208 ± 9	432 ± 23	272 ± 17	224	0,82	x	x	x	x

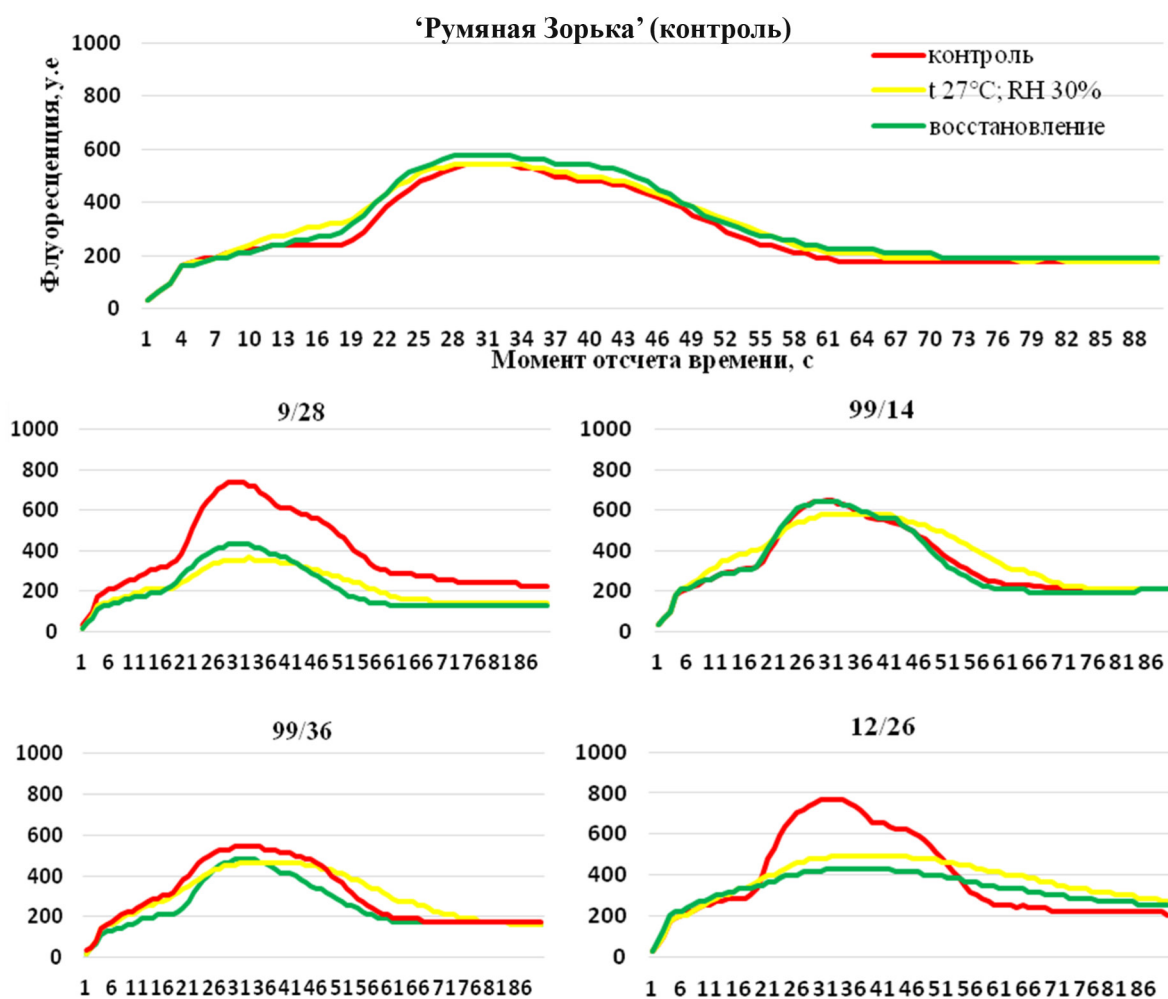


Рис. 2. Индукционные кривые флуоресценции хлорофилла листьев гибридных форм алычи в условиях имитации засухи, август

Fig. 2. Induction curves of chlorophyll fluorescence in the leaves of cherry plum hybrid forms under the simulated dry wind season conditions, August

Таблица 6. Водоудерживающая способность и восстановление тургора листьев алычи, сентябрь (2021–2022 гг.)

Table 6. Water retention capacity and turgor restoration in cherry plum leaves, September (2021–2022)

Генотип / Genotype	Содержание воды в листьях, % от сырой массы / Water content in leaves, % wet weight	Утрачено воды в процессе увядания, % / Water loss during wilting, %		Листья, восстановившие тургор, % / Leaves that restored turgor, %
		1 час / 1 hour	2 часа / 2 hours	
'Румяная Зорька' (контроль)	57,68	17,38	27,44	75–80
12/26	60,87	17,66	26,21	90
9/28	54,57	23,12	32,21	94
99/36	56,07	22,59	33,05	65
99/14	53,78	20,29	29,71	78–80

мы 99/36 при достижении листьями водного дефицита 33% наблюдали снижение варибельной флуоресценции на 27%, значения индекса витальности (Fv/Fst) при этом практически не изменились (табл. 7).

у гибридных форм 99/36 и 12/26 ФС-2 была наиболее чувствительна к условиям эксперимента. Имитация засухи в середине летнего сезона оказывала наиболее значимое влияние на течение процессов фотосинтеза.

Таблица 7. Параметры индукционной кривой хлорофилла при развитии водного стресса в листьях различных гибридных форм алычи, сентябрь (2021–2022 гг.)

Table 7. Parameters of the chlorophyll induction curve during the development of water stress in the leaves of cherry plum hybrid forms, September (2021–2022)

	F_0	Fm	Fst	Fv	Fv/Fst	Fv/Fm	Fv/ F_0	$(Fm - Fst)/Fm$	$(Fpl - F_0)/Fv$
'Румяная Зорька' (контроль)									
контроль	144 ± 11	640 ± 26	208 ± 14	496	2,38	0,77	3,44	0,67	0,23
завядание	128 ± 6	400 ± 21	130 ± 12	272	2,09	0,68	2,12	0,67	0,65
восстановление	144 ± 9	480 ± 18	160 ± 12	336	2,10	0,70	2,33	0,67	0,24
9/28									
контроль	147 ± 7	544 ± 22	192 ± 10	397	2,06	0,73	2,07	0,65	0,23
завядание	125 ± 10	352 ± 17	144 ± 9	227	1,58	0,64	1,82	0,59	0,29
восстановление	120 ± 5	432 ± 20	176 ± 10	312	1,77	0,72	2,60	0,59	0,54
99/14									
контроль	160 ± 13	608 ± 27	208 ± 9	448	2,15	0,74	2,80	0,66	0,36
завядание	176 ± 19	784 ± 29	240 ± 13	608	2,53	0,77	3,45	0,69	0,56
восстановление	112 ± 10	384 ± 19	144 ± 12	272	1,88	0,71	2,43	0,62	0,41
99/36									
контроль	224 ± 15	864 ± 27	240 ± 20	640	2,67	0,74	2,86	0,71	0,33
завядание	192 ± 10	656 ± 29	176 ± 17	464	2,64	0,71	2,42	0,73	0,15
восстановление	128 ± 12	495 ± 21	288 ± 19	367	1,27	x	x	x	x
12/26									
контроль	160 ± 13	560 ± 29	176 ± 14	400	2,27	0,71	2,50	0,69	0,20
завядание	112 ± 9	448 ± 21	144 ± 14	304	2,11	0,68	2,71	0,69	0,37
восстановление	112 ± 7	512 ± 27	160 ± 16	400	2,50	0,78	3,57	0,69	0,20

Относительно стабильной работой фотосинтетического аппарата в условиях имитации засухи в конце летнего периода отличались контрольный сорт 'Румяная Зорька' и гибридная форма 12/26 (рис. 3). Выявленные различия могут быть связаны как с индивидуальными особенностями гибридных форм (сроки жизни листа, его морфофизиологические характеристики), так и с реализацией физиолого-биохимических защитных механизмов (Yakovleva et al., 2005; Gubanova et al., 2019).

Таким образом, имитация условий, близких к засухе, в начале июля при достижении листьями уровня водного дефицита в пределах 30% привела к изменению основных параметров ИФХ у всех изучаемых гибридных форм.

Выявленные изменения имели специфический для исследуемых гибридных форм характер; у большинства из них наиболее высокая устойчивость фотосинтетического аппарата к действию высокой температуры и низкой влажности воздуха отмечена в начале июля. В целом

у формы 12/26 в период после снятия стрессового воздействия высокой температуры и низкой относительной влажности воздуха наблюдали снижение соотношения констант скоростей фотохимической и нефотохимической дезактивации энергии возбуждения и коэффициента спада флуоресценции ниже критической границы жизнеспособности.

Полученные данные свидетельствуют о необратимых изменениях в кислород-выделяющем комплексе и вероятных нарушениях целостности мембранных структур тилакоидов. У формы 99/36 в начале сентября развитие 30-процентного уровня водного дефицита в тканях листьев вызывает значительное снижение варибельной и максимальной флуоресценции и резкое увеличение количества невозстановленных Q_a в реакционных центрах ФС-2, что после окончания стрессового воздействия и восстановления водообеспеченности листьев приводит к полной инактивации фотосинтетических процессов.

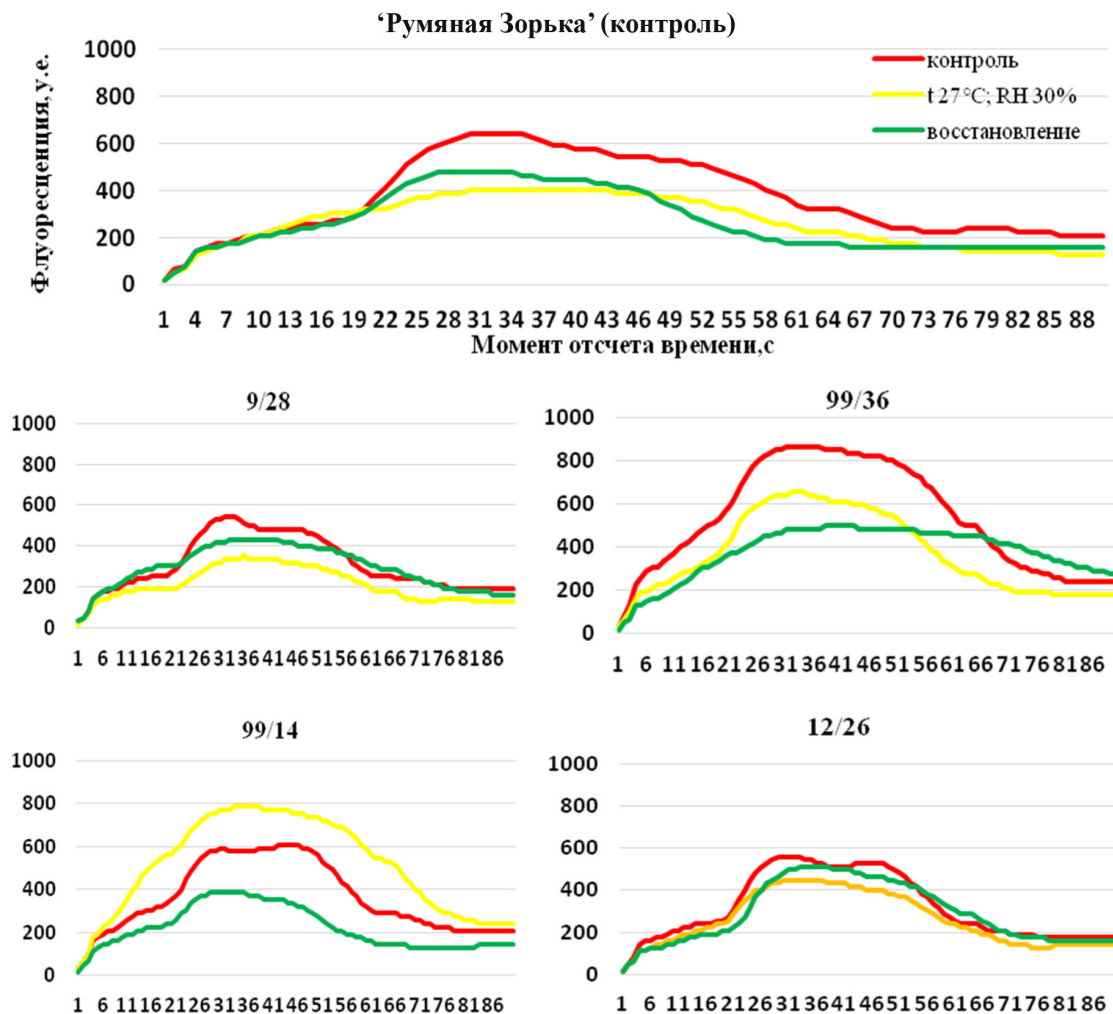


Рис. 3. Индукционные кривые флуоресценции хлорофилла листьев гибридных форм алычи в условиях имитации суховея, сентябрь

Fig. 3. Induction curves of chlorophyll fluorescence in the leaves of cherry plum hybrid forms under the simulated dry wind season conditions, September

Заключение

Установлено, что сорт 'Румяная Зорька' и гибридная форма 99/14 характеризуются достаточно стабильным течением фотосинтетических процессов в течение летнего сезона и способностью фотосистемы-2 восстанавливать работу после действия высокой температуры и низкой влажности воздуха.

В ходе исследований определено, что критическим периодом вегетации для культуры алычи в условиях степного Крыма являются июль и август. Относительно повышенной способностью листьев удерживать влагу в процессе обезвоживания обладают растения сорта 'Румяная Зорька' и формы 12/26. У гибридной формы 99/14 выявлена средняя устойчивость к засушливым факторам. Низкие показатели водного режима демонстрирует гибридная форма 99/36. Потеря 30% влаги превышает границу сублетального водного дефицита у всех изученных объектов (ни в одном случае не было отмечено высокой репарации тканей листьев – более 95%). Для нормального протекания физиологических процессов и сохранения урожайности утрата воды, очевидно, не должна составлять более 20–25%, в зависимости от степени засухоустойчивости генотипа.

References / Литература

- Brion O.V., Korneev D.Yu., Snegur O.O., Kitaev O.I. Instrumental study of the photosynthetic apparatus using chlorophyll fluorescence induction. Guidelines (Instrumentalnoye izucheniye fotosinteticheskogo apparata s pomoshchyu induktsii fluorestsentsii khlorofilla. Metodicheskiye ukazaniya). Kiev; 2000. [in Russian] (Брайон О.В., Корнеев Д.Ю., Снегур О.О., Китаев О.И. Инструментальное изучение фотосинтетического аппарата с помощью индукции флуоресценции хлорофилла. Методические указания. Киев; 2000).
- Eremeev G.N., Lishchuk A.I. Selection of drought-resistant cultivars and rootstocks of fruit plants. Guidelines (Otbor zasukhoustoychivykh sortov i podvoyev plodovykh rasteniy. Metodicheskiye ukazaniya). Yalta: Nikita State Botanical Gardens; 1974. [in Russian] (Еремеев Г.Н., Лищук А.И. Отбор засухоустойчивых сортов и подвоев плодовых растений. Методические указания. Ялта: Государственный Никитский ботанический сад; 1974).
- Eremin G.V. Plum and cherry plum (Sliva i alycha). Kharkov: AST; 2003. [in Russian] (Еремин Г.В. Слива и алыча. Харьков: АСТ; 2003).

- Eremin G.V. Russian plum (*Sliva russkaya*). *Horticulture and Viticulture*. 2002;(6):20-22. [in Russian] (Еремин Г.В. Слива русская. *Садоводство и виноградарство*. 2002;(6):20-22).
- Eremin G.V., Semenova L.G., Gasanova T.A. Physiological features of the formation of adaptability, productivity and quality of fruits in stone fruit crops in the foothill zone of the North-West Caucasus (Fiziologicheskiye osobennosti formirovaniya adaptivnosti, produktivnosti i kachestva plodov u kostochkovykh kultur v predgornoy zone Severo-Zapadnogo Kavkaza). Maikop; 2008. [in Russian] (Еремин Г.В., Семенова Л.Г., Гасанова Т.А. Физиологические особенности формирования адаптивности, продуктивности и качества плодов у косточковых культур в предгорной зоне Северо-Западного Кавказа. Майкоп; 2008).
- Falkova T.V. Determination of sublethal water deficiency in plants (Opredeleniye subletalnogo vodnogo defitsita v rasteniyakh). In: E.A. Yablonsky (ed.). *Guidelines for physiological assessment of plant resistance to adverse environmental conditions (Metodicheskiye ukazaniya po fiziologicheskoy otsenke ustoychivosti rasteniy k neblagopriyatnym usloviyam sredy)*. Yalta; 1980. p.28-34. [in Russian] (Фалькова Т.В. Определение сублетального водного дефицита в растениях. В кн.: *Методические указания по физиологической оценке устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды* / под. ред. Е.А. Яблонского. Ялта; 1980. С.28-34).
- Goltsev V.N., Kalaji M.H., Kouzmanova M.A., Allakhverdiev S.I. Variable and delayed chlorophyll *a* fluorescence – basics and application in plant sciences. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Sciences; 2014. [in Russian] (Гольцев В.Н., Каладжи М.Х., Кузманова М.А., Аллахвердиев С.И. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла *a* – теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2014).
- Gorina V.M., Korzin V.V., Mesyats N.V. Peculiarities of water regime of apricot genotypes under the conditions of Southern Crimea. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2017;2(64):215-217. [in Russian] (Горина В.М., Корзин В.В., Месяц Н.В. Особенности водного режима генотипов абрикоса в условиях южного берега Крыма. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2017;2(64):215-217).
- Grigoriev A.V., Lukicheva L.A., Gorina V.M. Assessment of drought resistance of some hybrid forms of cherry plum (*Prunus cerasifera* Ehrh.) in the steppe zone of Crimea. *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2022;(98):70-75. [in Russian] (Григорьев А.В., Лукичева Л.А., Горина В.М. Оценка засухоустойчивости некоторых гибридных форм алычи (*Prunus cerasifera* Ehrh.) в степной зоне Крыма. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2022;(98):70-75). DOI: 10.21515/1999-1703-98-70-75
- Gubanova T.B., Pilkevich R.A., Kharchenko A.A., Bernatsky I.V. The effect of drought on the photosynthetic apparatus condition in some *Ficus carica* cultivars. *Plant Biology and Horticulture: Theory, Innovation*. 2019;(151):109-119. [in Russian] (Губанова Т.Б., Пилькевич Р.А., Харченко А.А., Бернацкий И.В. Влияние засухи на состояние фотосинтетического аппарата некоторых сортов *Ficus carica*. *Биология растений и садоводство: теория, инновации*. 2019;(151):109-119). DOI: 10.36305/2019-2-151-109-119
- Kushnirenko M.D. Physiology of water exchange and drought resistance of fruit plants (Fiziologiya vodoobmena i zasukhoustoychivosti plodovykh rasteniy). Chisinau: Stiinta; 1975. [in Russian] (Кушниренко М.Д. Физиология водообмена и засухоустойчивости плодовых растений. Кишинев: Штиинца; 1975).
- Lishchuk A.I. Physiological and biophysical methods in fruit crop breeding. Guidelines (Fiziologicheskiye i biofizicheskiye metody v selektsii plodovykh kultur. Metodicheskiye rekomendatsii). Moscow; 1991. [in Russian] (Лищук А.И. Физиологические и биофизические методы в селекции плодовых культур. Методические рекомендации. Москва; 1991).
- Reigosa Roger M.J., Weiss O. Fluorescence techniques. In: M.J. Reigosa Roger (ed.). *Handbook of Plant Ecophysiology Techniques*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2001. p.155-171.
- Romanov V., Galelyuka I., Babenko YV. Portable fluorometer Floratest and specifics of its application. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 2010;7(3):39-44. DOI: 10.18524/1815-7459.2010.3.114470
- Ryabov V.A. Influence of global warming on local climate and possible consequences for fruit crops. *Scientific Works of the PF NUBIP of Ukraine "KATU". Agricultural Sciences*. 2011;(137):127-137. [in Russian] (Рябов В.А. Влияние глобального потепления на местный климат и возможные последствия для плодовых культур. *Наукові праці ПФ НУБІП України «КАТУ». Сільськогосподарські науки*. 2011;(137):127-137).
- Vitkovskiy V.L. Fruit plants of the world (Plodovye rasteniya mira). St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Lan; 2003. [in Russian] (Витковский В.Л. Плодовые растения мира. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань; 2003).
- Yakovleva O.V., Kukarskikh G.P., Krendeleva T.E., Rubin A.B., Talipova E.V. Parameters of chlorophyll fluorescence in leaves of herbaceous plants in different environmental conditions. *Biophysics*. 2005;50(6):959-965.

Информация об авторах

Александр Викторович Григорьев, аспирант, младший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, alex_grigoriev_1994@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8619-4031>

Руслана Адольфовна Пилькевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, pilkevich-r@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4079-4514>

Любовь Алексеевна Лукичева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, luk-lubov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7982-885X>

Татьяна Борисовна Губанова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, gubanova-65@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6096-7211>

Валентина Милентьевна Горина, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр Российской академии наук, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, valgorina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1279-8959>

Information about the authors

Alexander V. Grigoriev, Postgraduate Student, Associate Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, alex_grigoriev_1994@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8619-4031>

Ruslana A. Pilkevich, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, pilkevich-r@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4079-4514>

Lyubov A. Lukicheva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, lukubov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7982-885X>

Tatyana B. Gubanova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, gubanova-65@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6096-7211>

Valentina M. Gorina, Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the Russian Academy of Sciences, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, valgorina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1279-8959>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 04.03.2024
The article was submitted on 17.01.2024; approved after reviewing on 08.02.2024; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 635.21:631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-51-63



Проявление селекционно ценных признаков у межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР в условиях Камчатского края

А. Д. Иващенко¹, Т. П. Шерстюкова¹, О. И. Хасбиуллина¹, Е. В. Рогозина²

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР, Камчатский край, Россия

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

Автор, ответственный за переписку: Елена Вячеславовна Рогозина, rogozinaelena@gmail.com

Актуальность исследования заключается в обновлении генофонда для селекции ранних и среднеранних сортов картофеля в условиях Камчатского края. Использование межвидовых гибридов из коллекции ВИР в качестве родительских форм увеличивает генетическое разнообразие. Выбор родительских пар для скрещивания основан на всесторонней их оценке в конкретных почвенно-климатических условиях. Цель исследования – оценить гибриды картофеля в условиях Камчатского края по комплексу признаков, выделить лучшие родительские формы, создать новые гибридные комбинации и отобрать перспективный селекционный материал.

Материалы и методы. В течение трех лет (2020–2022) в Камчатском НИИСХ в соответствии с общепринятой методикой селекционного процесса картофеля изучены 11 гибридов картофеля, созданных в ВИР. Стандарты – ‘Fresco’ (раннеспелый) и ‘Вулкан’ (среднеранний). В теплице проведены скрещивания с 28 сортами отечественной и зарубежной селекции. Новый селекционный материал оценен в питомнике предварительного испытания по продуктивности и скороспелости.

Результаты. В условиях разной тепло- и влагообеспеченности гибрид 117-2 по продуктивности (899 г/куст) не уступал сортам-стандартам ‘Вулкан’ и ‘Fresco’ (700–739 г/куст). Гибриды 94-5, 99-10-1, 8-1-2004, 8-3-2004, 8-5-2004, 135-3-2005, 135-5-2005, 99-6-6 и 134-2-2006 по большинству признаков соответствуют сортам картофеля в коллекционном питомнике Камчатского НИИСХ, при скрещивании отличаются хорошими показателями ягодообразования и завязываемости семян. Выполнено 140 вариантов скрещиваний, получено 35 комбинаций с участием 10 гибридов и 13 сортов картофеля. Большинство гибридов результативно использованы в скрещиваниях как материнские формы.

Заключение. Использование созданных в ВИР гибридов 94-5, 8-1-2004 и 8-5-2004 в качестве материнских форм при скрещивании с сортами ‘Bellarosa’ и ‘Солнышко’ позволило создать новый материал для селекции картофеля на скороспелость и выносливость в условиях Камчатского края.

Ключевые слова: сорт, исходный материал, скрещиваемость, продуктивность, раннеспелость

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Камчатского научно-исследовательского института сельского хозяйства № 0824-2019-0003 «Разработать ресурсоэнергоэкономные экологически безопасные технологии возделывания сельскохозяйственных культур на основе мобилизации генетических ресурсов растений, использования методов селекции, конструирования адаптивных экосистем» и согласно тематическому плану ВИР по проекту FGEM 0481-2022-0004 «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: Иващенко А.Д., Шерстюкова Т.П., Хасбиуллина О.И., Рогозина Е.В. Проявление селекционно ценных признаков у межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР в условиях Камчатского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):51-63. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-51-63

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-51-63

Breeding value of potato hybrid clones from the VIR collection revealed in the environments of Kamchatka Territory

Anna D. Ivashchenko¹, Tamara P. Sherstyukova¹, Olga I. Khasbiullina¹, Elena V. Rogozina²

¹ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kamchatka Research Institute of Agriculture, branch of VIR, Kamchatka Territory, Russia

² N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Elena V. Rogozina, rogozinaelena@gmail.com

Background. Potato breeding involves planned artificial hybridization between previously selected parental lines. A way to make potato breeding more efficient is to use the diversity of the germplasm and broaden the gene pool of parental lines. Interspecific potato hybrids originated on the elite potato germplasm display a set of valuable traits. The current challenge is to assess the performance of potato hybrids under specific soil and climate conditions to clarify their breeding value. The objective of the study was to evaluate potato hybrids in the environments of Kamchatka Territory according to a set of traits, identify the best parental lines, develop new hybrid combinations, and select promising breeding material.

Materials and methods. Eleven potato hybrids from VIR were studied over three years (2020–2022) in the fields of Kamchatka Research Institute of Agriculture. The hybrids were benchmarked against two reference potato cultivars, 'Fresco' and 'Vulkan', belonging to the early and mid-early maturity groups, respectively. Crosses between the hybrids and 28 potato cultivars were carried out in the greenhouse. The new hybrid material was tested in a preliminary trial nursery for yield and earliness.

Results. Hybrid 117-2 was better in yield (899 g/plant) than cvs. 'Vulkan' and 'Fresco' (700–739 g/plant). Hybrids 94-5, 99-10-1, 8-1-2004, 8-3-2004, 8-5-2004, 135-3-2005, 135-5-2005, 99-6-6, and 134-2-2006 in most traits matched the potato cultivars, manifesting good berry formation and seed setting when crossed. Out of 140 crosses between 11 hybrids and 28 cultivars, 35 crosses between 10 hybrids and 13 cultivars were successful. Most hybrids were effectively used in crossings as maternal forms.

Conclusion. VIR's hybrids 94-5, 8-1-2004, and 8-5-2004 proved the most promising as source material for the development of new early potatoes under the conditions of Kamchatka Territory.

Keywords: cultivar, source material, crossability, yield, earliness

Acknowledgments: the study was conducted within the framework of the state task according to the theme plan of Kamchatka Research Institute of Agriculture, No. 0824-2019-0003 "To develop resource- and energy-efficient environmentally safe technologies of crop cultivation based on plant genetic resources mobilization, use of breeding methods, and construction of adaptable ecosystems", and the theme plan of VIR, Project No. FGEM 0481-2022-0004 "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: Ivashchenko A.D., Sherstyukova T.P., Khasbiullina O.I., Rogozina E.V. Breeding value of potato hybrid clones from the VIR collection revealed in the environments of Kamchatka Territory. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):51-63. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-51-63

Введение

Природные и экономические условия Камчатского края, обусловленные его географическим положением, определяют особенности сельскохозяйственного производства, которое призвано обеспечивать население полуострова собственным картофелем (Ryakhovskaya et al., 2016). Производство высококачественных семян и выращивание сортов картофеля, адаптированных к почвенно-климатическим условиям полуострова, представляют актуальные направления растениеводческой отрасли в Камчатском крае и соответствуют концепции «Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года» (Strategy for the development..., 2022). Короткий вегетационный период на Камчатке (80–90 дней) делает возможным выращивание только ранних и средне-ранних сортов картофеля. Для высокой продуктивности и стабильности картофелеводства необходимо расширение сортимента путем выведения сортов, адаптивных к специфическим условиям северного земледелия, повышения устойчивости картофеля к болезням и вредителям (Ryakhovskaya et al., 2016).

Основной путь создания сортов картофеля – гибридизация родительских линий, дополняющих друг друга по комплексу хозяйственно ценных признаков. Селекция картофеля во всех развитых странах на протяжении XX века и до настоящего времени представляет длительный процесс улучшения популяций гибридов путем увеличения частоты желаемых комбинаций аллелей (генов) в половом потомстве (Bradshaw, 2021; Nagel et al., 2022). Использование уникальных межвидовых гибридов из коллекции картофеля ВИР в качестве источников устойчивости к наиболее вредоносным патогенам и комбинирование их с формами, обладающими другими ценными признаками, увеличивает генетическое разнообразие гибридных популяций и повышает эффективность отечественной селекции картофеля (Simakov et al., 2017). В то же время для обоснованного подбора пар для скрещивания необходима всесторонняя оценка родительских форм в конкретных почвенно-климатических условиях, в том числе по важным селекционным признакам – интенсивности цветения, фертильности, способности к ягодообразованию и завязываемости семян. Параметры отдельных хозяйственно полезных признаков сортов, таких как срок созревания, количество и средняя масса клубней, содержание крахмала и устойчивость к наиболее вредоносным болезням, при возделывании в регионах России могут незначительно варьировать из-за различий почвенно-климатических условий и фитосанитарной ситуации (Simakov et al., 2018). Изучение межвидовых гибридов, созданных на основе образцов диких и культурных родичей картофеля из коллекции ВИР, в разных регионах России актуально, так как позволяет выяснить потенциал их применения в качестве родительских форм для практической селекции картофеля. Цель исследования – оценить межвидовые гибриды из коллекции картофеля ВИР в условиях Камчатского края по комплексу признаков, выделить лучшие родительские формы, создать новые гибридные комбинации и отобрать перспективный селекционный материал.

Материалы и методы

В течение трех лет (2020–2022) в коллекционном питомнике Камчатского научно-исследовательского инсти-

тута сельского хозяйства (Камчатский НИИСХ, Елизовский район, п. Сосновка) изучены 11 клонов межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР, обладающие комплексом ценных признаков (табл. 1).

Клоны межвидовых гибридов, указанные в таблице 1, созданы в ВИР в период с 1999 по 2006 г. методом скрещивания и отбора лучших форм в потомстве гибридных комбинаций с участием дикорастущих и культурных видов, сортов и интродуцированных селекционных линий картофеля (Rogozina et al., 2018).

Клоны межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР изучены в юго-восточном районе Камчатки, где расположены опытные поля Камчатского НИИСХ – местности наиболее обеспеченной и пригодной для выращивания картофеля. Факторами, ограничивающими рост картофеля в условиях Камчатки, являются: короткий безморозный период, холодная, затяжная весна, заморозки (в отдельные годы) в конце августа – начале сентября и неравномерное распределение осадков. Почвы опытных участков Камчатского НИИСХ охристо-вулканические, их отличительные особенности – низкое содержание подвижных элементов питания, слабокислая реакция среды, легкий механический состав и интенсивный промывной режим (Ryakhovskaya et al., 2016).

Метеоусловия периодов вегетации в 2020–2021 гг. были различны, показатели температуры воздуха и количества осадков отличались от средних многолетних значений. Вегетационный период 2020 г. характеризовался достаточным количеством тепла и малым количеством осадков. Среднесуточная температура воздуха составила 10,2–14,0°C, сумма активных температур воздуха (1121°C) была близка к среднемуголетнему значению (1092°C). Осадков за летние месяцы выпало 297,3 мм, что меньше среднегоголетнего значения (369 мм) на 71,7 мм (19,4%). Вегетационный период 2021 г. характеризовался повышенной температурой воздуха и недостатком влаги. Сумма активных температур за вегетацию составила 1297,5°C, что больше среднего многоголетнего значения на 205,5°C. Осадков в летние месяцы выпало 151,3 мм, что меньше среднего многоголетнего значения на 43,8%. Вегетационный период 2022 г. характеризовался повышенной температурой воздуха: среднесуточная температура за июнь, июль, август и сентябрь была выше средней многолетней на 2,3°C, 3,6°C, 1,4°C и 1,6°C соответственно. Сумма активных температур составила 1377°C. Осадков в период вегетации выпало 363,9 мм, что соответствовало норме (369 мм), однако отсутствовала стабильность: в июне выпало 27%, в июле – 66% (вторая декада июля была засушливой), в августе – 151%, а в сентябре – 135,6% от среднего многоголетнего значения.

Клоны межвидовых гибридов из коллекции ВИР оценивали по комплексу признаков в соответствии с общепринятой методикой селекционного процесса картофеля (Methodology of potato..., 1967; Simakov et al., 2006). Ежегодно у клонов межвидовых гибридов картофеля в коллекционном питомнике проводили фенологические наблюдения, оценивали интенсивность цветения и ягодообразование по 9-балльной шкале, поражение болезнями по 9-балльной шкале (где 9 – отсутствие поражения), продуктивность в расчете на одно растение (г/куст), товарные и биохимические качества клубней.

Межвидовые гибриды картофеля из коллекции ВИР были использованы нами в качестве одной из родительских форм в скрещиваниях, которые проводили в 2019–2021 гг. в теплице Камчатского НИИСХ. В качестве вто-

Таблица 1. Происхождение и характеристика межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР**Table 1. Pedigrees and descriptions of interspecific potato hybrids from the VIR collection**

Номер гибрида	Происхождение	Устойчивость к болезням и вредителям (Rogozina et al., 2018)	Другие признаки (Khloruyuk et al., 2021)
94-5	'Bobr' × <i>S. chacoense</i> Bitt. (к-19759)	ER YBK, R ЗКН, R рак	Среднеранний, раннее клубнеобразование
99-10-1	'Bobr' × <i>S. chacoense</i> Bitt. (к-19759)	ER YBK, R ЗКН, S рак	Среднеранний
8-1-2004	<i>S. okadae</i> (к-20921) × <i>S. chacoense</i> (к-19759)	ER YBK, R ЗКН, R рак	Среднеранний
8-3-2004	<i>S. okadae</i> (к-20921) × <i>S. chacoense</i> (к-19759)	ER YBK, R ЗКН, R рак, парша обыкновенная и ризоктониоз	Среднеранний, экологически пластичный
8-5-2004	<i>S. okadae</i> (к-20921) × <i>S. chacoense</i> (к-19759)	ER YBK, R ЗКН, R рак, парша обыкновенная	Среднеспелый
135-3-2005	<i>S. okadae</i> (к-20921) × <i>S. chacoense</i> (к-19759)	R YBK, R ЗКН, R рак, парша обыкновенная, ризоктониоз	Среднеспелый
135-5-2005	<i>S. okadae</i> (к-20921) × <i>S. chacoense</i> (к-19759)	ER YBK, R ЗКН, R рак, парша серебристая	Среднеранний, экологически пластичный
99-6-5	90-6-2 × 'Hertha'	ER YBK, R ЗКН, парша серебристая, ризоктониоз	Среднеранний, высокая продуктивность
99-6-6	90-6-2 × 'Hertha'	ER YBK, R ЗКН, парша обыкновенная, ризоктониоз	Среднеспелый, высокая продуктивность
117-2	'Atzimba' × <i>S. alandiae</i> (к-21240)	R ЗКН, MR фитофтороз, парша и ризоктониоз	Среднеспелый, высокая продуктивность
134-2-2006	24-2 × 'Свитанок Киевский'	R ЗКН, MR к фитофторозу	Среднеранний

Примечание: YBK – Y-вирус картофеля; ЗКН – золотистая картофельная нематода *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Skarbilovich; ER – крайняя устойчивость; R – устойчивость; MR – умеренная устойчивость

Note: YBK – potato virus Y (PVY); ЗКН – golden nematode *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Skarbilovich; ER – extreme resistance; R – resistance; MR – moderate resistance

рой родительской формы в скрещивания вовлекали сорта картофеля отечественной и зарубежной селекции разных по срокам созревания групп: ранней – 'Алёна', 'Жуковский Ранний', 'Жемчужина Камчатки', 'Колымский', 'Каменский', 'Фермер', 'Юбиляр', 'Red Scarlett', 'Bellarosa'; среднеранней – 'Alwara', 'Adretta', 'Вулкан', 'Гейзер', 'Zekura', 'Ирбитский', 'Маяк', 'Рябинушка', 'Отрада', 'Солнышко', гибрид 12-13-90 (Тамара), 'Чародей'; средней – 'Василёк', 'Камчатка', 'Чайка', 'Ладожский', 'Лазарь', 'Сиреневый Туман', 'Петербургский'. Все 28 сортов (партнеров для скрещиваний) исследовали в те же сроки и по тем же методикам, которые указаны выше для межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР. Кроме того, ежегодно для всех родительских форм определяли фертильность пыльцы (методом окрашивания ацетокармином) и проводили опыление в условиях теплицы на интактных растениях при температуре +18...+20°C (Methodology of potato..., 1967). Сорта, имеющие высокофертильную пыльцу, использовали в качестве отцовских

форм, а имеющие стерильную – в качестве материнских без предварительной кастрации цветков.

Сеянцы – первое и последующие клубневые поколения потомства от скрещивания сортов картофеля с клонами межвидовых гибридов – оценивали в селекционном питомнике Камчатского НИИСХ (рис. 1). Сеянцы выращивали в горшечной культуре. В качестве стандарта использованы сорта 'Fresco' (раннеспелый) и 'Вулкан' (среднеранний). Скороспелость созданного в Камчатском НИИСХ нового селекционного материала (потомства от скрещиваний в 2019 г. клонов межвидовых гибридов из коллекции ВИР с сортами картофеля) определяли по результатам оценки массы ботвы и массы клубней во время динамической копки в питомнике предварительного испытания. Сорт или гибрид относят к группе раннеспелых, если отношение массы клубней к массе ботвы близко к 1 (Sherstyukova, 1977). Статистическая обработка опытных данных выполнена в программе Statistica.



Рис. 1. Селекционный питомник картофеля Камчатского НИИСХ, 2023 г.

Fig. 1. Potato breeding nursery at Kamchatka Research Institute of Agriculture, 2023

Результаты

Селекционные и хозяйственно ценные признаки клонов межвидовых гибридов ВИР и сортов картофеля в коллекционном питомнике Камчатского НИИСХ

В 2020–2022 гг. продолжительность вегетации клонов межвидовых гибридов из коллекции ВИР и сортов картофеля, использованных для скрещивания, в коллекционном питомнике Камчатского НИИСХ составила 66–74 дня. Массовое появление всходов отмечено на 20–26-й день после посадки, период от массовых всходов до бутонизации составил 23–28 дней, до цветения – 32–39 дней. Обильное и продолжительное цветение и массовое образование ягод отмечено ежегодно у растений клона 134-2-2006. Умеренное цветение и хорошее ягодообразование отмечено ежегодно у растений клонов 99-6-6, 99-10-1, 8-3-2004 и 8-5-2004. У остальных изученных клонов интенсивность цветения и образование ягод изменялись в зависимости от года испытаний. Наблюдали умеренное и массовое цветение растений клонов 99-6-5, 94-5, 135-3-2005 и 135-5-2005, цветение от умеренного до обильного и продолжительного – у клона 8-1-2004. Ягодообразование от слабого до массового отмечено у клонов 8-1-2004, 117-2, от массового до обильного – у клона 135-3-2005.

Отмечена разная степень поражения альтернариозом и проявления вирусных болезней у клонов межвидовых гибридов. Не поражались альтернариозом растения клона 99-6-5, слабое поражение (7-8 баллов) отмечено у клонов 135-3-2005, 99-6-6, 117-2, среднее поражение (4–6 баллов) – у клонов 8-1-2004, 99-10-1, 135-5-2005, 8-3-2004, 134-2-2006, 8-5-2004, сильное поражение (1–3 балла) отмечено у растений клона 94-5. У сортов 'Fresco' и 'Вулкан' отмечено среднее поражение альтернариозом (4–6 баллов).

Симптомы вирусных болезней отсутствовали у растений клонов 99-6-5, 135-5-2005, 8-3-2004, 8-5-2004, 94-5, обыкновенной мозаикой поражались клоны 99-10-1, 117-2, 134-2-2006, мозаичное закручивание листьев в сочетании с обыкновенной мозаикой наблюдали у клонов 99-6-6, 8-1-2004, 135-5-2005. Сорта 'Fresco' и 'Вулкан' в годы исследований не имели симптомов вирусных болезней.

Продуктивность сортов-стандартов и клонов межвидовых гибридов картофеля варьировала в зависимости от года испытаний. У сорта 'Fresco' высокая продуктивность (1043 г/куст) получена в 2020 г., крайне низкая (542 г/куст) – в 2021 г. (при повышенных температурах и дефиците влаги) и средняя (633 г/куст) – в 2022 г. Продуктивность сорта 'Вулкан' составила 860, 400 и 841 г/куст соответственно. В течение трех лет испытаний у клона 117-2 отмечена самая высокая средняя продуктивность – 899 г/куст – выше, чем у стандартов 'Fresco' (739 г/куст) и 'Вулкан' (700 г/куст). Клоны 99-6-6, 8-1-2004, 8-3-2004 и 8-5-2004 по средней продуктивности (753–810 г/куст) не уступали сортам-стандартам, но по-разному реагировали на условия периода вегетации: превзошли по продуктивности сорта-стандарты в 2022 г. (830–1282 г/куст), в 2021 г. показали продуктивность на уровне стандартов (444–560 г/куст), уступали сортам-стандартам по этому показателю в 2020 г. (310–911 г/куст).

Продуктивность сортов картофеля, используемых для скрещивания, в коллекционном питомнике в годы испытаний была выше, чем у клонов межвидовых гибридов из коллекции ВИР (рис. 2, а). Средняя продуктивность сортов достигала 795 г/куст, клонов межвидовых гибридов – 674 г/куст, различия достоверны по t-критерию: $t = 2,38$, $p = 0,025$. Среди изученных сортов самая высокая продуктивность (среднее за три года исследования) отмечена у сорта 'Сиреневый Туман' (1094 г/куст), продуктивность лучшего среди клонов межвидовых гибридов 117-2 – 899 г/куст. Средняя масса клубней у сортов и клонов межвидовых гибридов составляет 87 и 80 г (рис. 2, б), различия незначительны: $t = 1,04$, $p = 0,30$. Клубни массой более 110 г сформированы у сортов 'Алёна' и 'Жуковский Ранний', среди клонов межвидовых гибридов наиболее крупные клубни (96 г) – у 8-1-2004. Высокая товарность отмечена как у сортов (90%), так и у клонов межвидовых гибридов (86%), различия незначительны: $t = 1,68$, $p = 0,10$.

Содержание крахмала в клубнях сортов и клонов межвидовых гибридов среднее – 12,3 и 13,0% соответственно (рис. 2, в), различия незначительны: $t = 1,46$, $p = 0,15$. Лучшие по этому показателю среди сортов –

‘Василёк’ (14,3%) и ‘Юбиляр’ (14,1%), среди клонов межвидовых гибридов – 94-5 (14,5%). По содержанию витамина С в клубнях сортов и клонов межвидовых гибридов установлена большая амплитуда изменчивости (рис. 2, г). Высокое содержание витамина С (более 15 мг/%) отмечено у сортов ‘Adretta’, ‘Вулкан’, ‘Василёк’, ‘Жуковский Ранний’ и ‘Юбиляр’, у клонов – 99-6-5, 99-10-1, 8-1-2004, 135-5-2005 и 134-2-2006. Вкусовые качества клубней хорошие и отличные (в среднем 7,4 и 7,3 балла; рис. 2, д), различия между сортами и клонами межвидовых гибридов по этому показателю несущественны: $t = 0,21$, $p = 0,87$.

Скрещиваемость

В 2019–2021 гг. выполнено 140 вариантов скрещиваний между клонами межвидовых гибридов из коллекции ВИР и сортами картофеля. В теплицах Камчатского НИИСХ опылено 1455 цветков, получено 35 удачных комбинаций с участием 10 клонов (табл. 2). Из 28 сортов, использованных в качестве второго партнера для скрещивания, оказались результативными комбинации только с 13 сортами: ‘Алёна’, ‘Жуковский Ранний’, ‘Жемчужина Камчатки’, ‘Юбиляр’, ‘Bellarosa’, ‘Alwara’, ‘Adretta’, ‘Вулкан’, ‘Рябинушка’, ‘Солнышко’, ‘Василёк’, ‘Сиреневый Туман’, ‘Петербургский’.

Большинство клонов межвидовых гибридов из коллекции ВИР результативно использованы в скрещиваниях как материнские формы. Клоны 99-6-6 и 134-2-2006 удалось использовать при гибридизации в качестве как материнской, так и отцовской форм, клон 117-2 – только как опылитель. Завязываемость ягод при гибридизации варьировала от 7% до 100% (см. табл. 2) и зависела от комбинации скрещивания и внешних факторов. Так, в комбинации 94-5 × ‘Bellarosa’ в 2019 г. завязываемость ягод составила 100%, среднее число семян в одной ягоде – 158 шт., а в 2021 г. – 41% и 38 шт. соответственно. В комбинации 94-5 × ‘Солнышко’ 100-процентная завязываемость ягод отмечена в 2019 г. и 60-процентная – в 2021 г., среднее число семян в ягоде почти одинаково – 66 и 68 штук. В комбинации 8-1-2004 × ‘Солнышко’ завязываемость ягод также составила 100% в 2020 г. и 45% в 2021 г., среднее число семян в ягоде – 45% и 50 штук соответственно.

В комбинациях скрещиваний клона 135-3-2005 с сортами ‘Bellarosa’, ‘Сиреневый Туман’, ‘Alwara’, ‘Солнышко’ и ‘Василёк’, выполненных в 2020 г., завязываемость ягод варьировала от 7 до 100% (см. табл. 1). Наиболее результативным было скрещивание с сортом ‘Солнышко’: 100-процентная завязываемость ягод, среднее содержание семян – 133 штуки, наименее успешным – скрещивание с сортом ‘Bellarosa’: после опыления 13 цветков получена 1 ягода, содержащая 23 семени.

Хорошая завязываемость ягод (не менее чем у 75% опыленных цветков) и многосемянные ягоды (100 и более семян) получены при опылении клонов 134-2-2006, 94-5, 99-10-1, 8-1-2004 и 8-5-2004 сортом ‘Bellarosa’ в 2019 г., при опылении клона 134-2-2006 пылью сорта ‘Алёна’ в 2020 г., при опылении клона 135-3-2005 пылью сортов ‘Солнышко’ и ‘Василёк’ в 2021 г.

В условиях Камчатского края результативными оказались четыре комбинации скрещиваний, в которых в качестве опылителей использованы клоны межвидовых гибридов: ‘Рябинушка’ × 99-6-6, ‘Петербургский’ × 117-2 и сортов ‘Жуковский Ранний’ и ‘Юбиляр’ с клоном 134-2-2006. Из этих комбинаций наиболее удачно скрещивание ‘Рябинушка’ × 99-6-6 (завязываемость ягод – 66%, среднее число семян в ягоде – 67 шт.), результаты

близки полученным в комбинации 99-6-6 × ‘Вулкан’ (завязываемость ягод – 100%, среднее число семян в ягоде – 75 шт.). При использовании клона 134-2-2006 в качестве опылителя завязываемость ягод слабая – 10–14%, ягоды малосемянные – 22–57 шт. При использовании этого же клона в качестве материнской формы в комбинациях с сортами ‘Bellarosa’, ‘Алёна’, ‘Alwara’ и ‘Вулкан’ завязываемость ягод и число семян в ягоде значительно выше: 33–100% и 60–222 шт. соответственно. Клон 117-2 при опылении сорта ‘Петербургский’ обеспечил 50-процентную завязываемость ягод, но с малым числом семян (см. табл. 2).

Оценка нового селекционного материала

В течение 2020–2022 гг. проведена оценка сеянцев 35 комбинаций от скрещивания клонов 94-5, 99-10-1, 8-1-2004, 8-3-2004, 8-5-2004, 135-3-2005, 135-5-2005, 99-6-6, 117-2 и 134-2-2006 с сортами ‘Алёна’, ‘Жуковский Ранний’, ‘Жемчужина Камчатки’, ‘Юбиляр’, ‘Bellarosa’, ‘Alwara’, ‘Adretta’, ‘Вулкан’, ‘Рябинушка’, ‘Солнышко’, ‘Василёк’, ‘Сиреневый Туман’, ‘Петербургский’. В 2020 г. высеяно 1339 семян, распикировано 589 (44%) сеянцев, отобрано 523 клубня (от 36 до 100 в зависимости от комбинации), в 2021 г. высеяно 1344 семян, распикировано 399 (29%) сеянцев, отобрано 298 клубней (от 15 до 99 штук), в 2022 г. высеяно 3099 семян, распикировано 1615 (52%) сеянцев, отобрано 1068 клубней (от 41 до 100 штук).

Сеянцы семи комбинаций скрещиваний, полученных в 2019 г., прошли оценку в питомниках первого, второго клубневого поколений и предварительного испытания. Это потомство от опыления клонов 134-2-2006, 94-5, 99-10-1, 8-1-2004 и 8-5-2004 сортом ‘Bellarosa’, клона 94-5 – сортом ‘Солнышко’ и комбинации ‘Рябинушка’ × 99-6-6. В 2022 г. среди 22 генотипов пяти комбинаций скрещивания межвидовых гибридов из коллекции ВИР с сортами картофеля выделены высокопродуктивные и скороспелые формы в потомстве четырех комбинаций скрещивания (табл. 3).

Массовое появление всходов у новых гибридных форм картофеля отмечено на 21–32-й день после посадки, период от массовых всходов до бутонизации составил 28–36 дней, до цветения – 34–40 дней. По результатам динамической копки на 70-й день (16 августа) продуктивность гибридов составила от 17 до 1000 г/куст. Выделены формы, продуктивность которых выше, чем у сортов-стандартов ‘Fresco’ и ‘Вулкан’ (рис. 3, 4). Формы с высокой продуктивностью на 70-й день после посадки выделены в потомстве от скрещиваний клонов 94-5, 8-1-2004 и 8-5-2004 с сортом ‘Bellarosa’ и клона 94-5 с сортом ‘Солнышко’. Это гибриды 73-1-22, 73-6-22, 73-12-22 и 73-21-22; 64-13-22, 27-2-22 и 78-21-22 (см. табл. 3). Среди 22 новых селекционных форм выделены шесть раннеспелых: 73-1-22, 73-16-22, 64-7-22, 78-21-22, 78-3-22, 27-7-02, у которых отношение массы клубней к массе ботвы – 1,0–1,7. Продуктивность этих гибридов составляет 367–1000 г/куст. Наибольший интерес представляют новые раннеспелые гибриды 73-1-22 (94-5 × ‘Bellarosa’) и 78-21-22 (8-5-2004 × ‘Bellarosa’), более продуктивные, чем сорта-стандарты. Гибриды 73-20-22, 73-13-22, 73-6-22, 73-21-22, 64-13-22, 78-2-22, 27-2-22 относятся к среднеранней группе спелости (отношение массы клубней к массе ботвы – 0,6–0,8). Среди новых гибридных форм среднеранней группы спелости наибольший интерес представляют гибриды 73-21-22 (94-5 × ‘Bellarosa’) и 27-2-22 (8-1-2004 × ‘Bellarosa’), продуктивность которых выше, чем у сортов-стандартов.

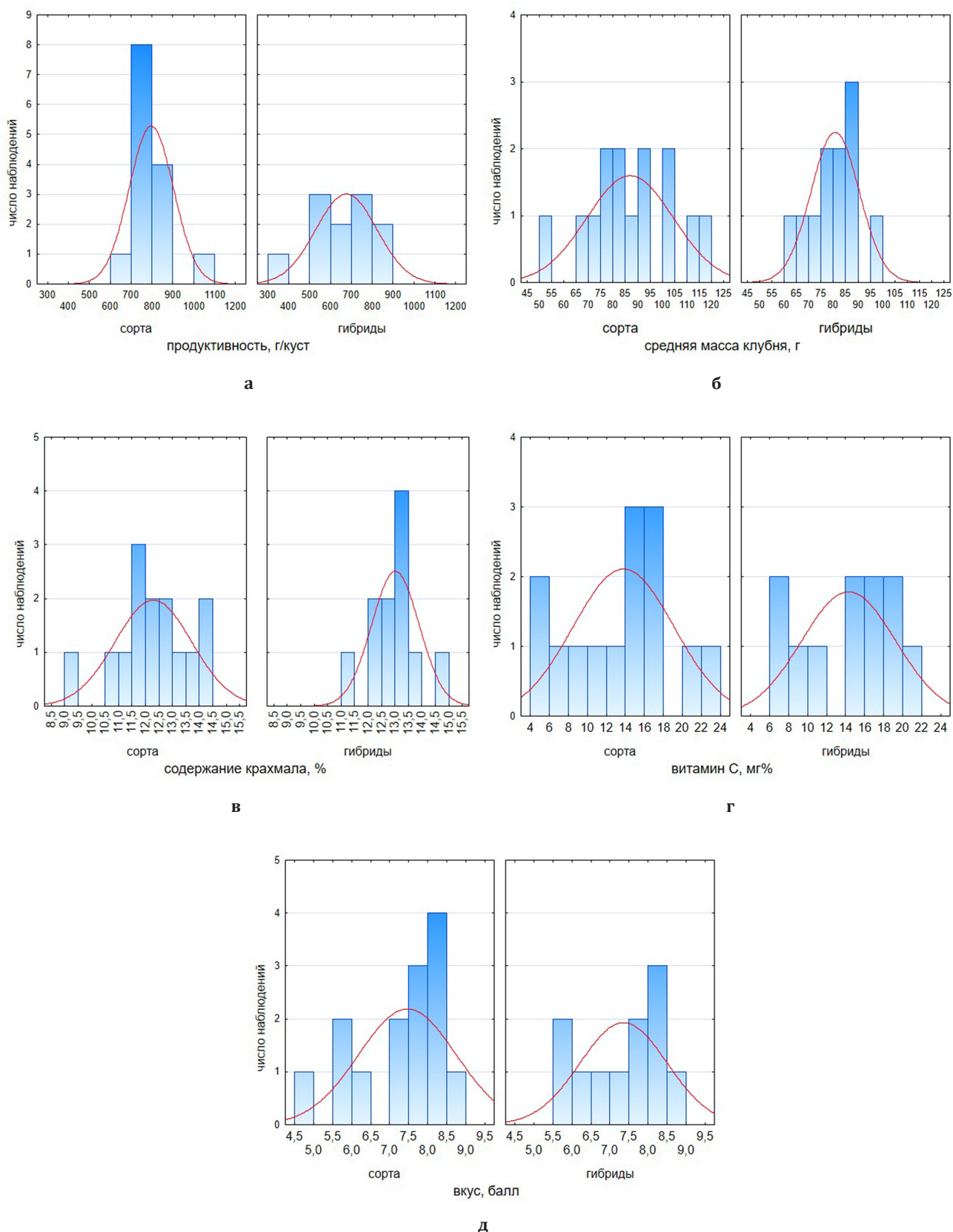


Рис. 2. Продуктивность и качество клубней у сортов (14) и гибридов картофеля (11) в коллекционном питомнике Камчатского НИИСХ в 2020–2022 гг.: а – продуктивность; б – средняя масса клубня; в – содержание крахмала; г – содержание витамина С; д – вкус

Fig. 2. Yield and tuber quality characteristics of potato hybrids (11) and cultivars (14) at the collection nursery of Kamchatka Research Institute of Agriculture (2020–2022): а – yield; б – average tuber weight; в – starch content; г – vitamin C content; д – taste

Таблица 2. Результаты скрещиваний межвидовых гибридов из коллекции ВИР с сортами картофеля, проведенных Камчатским НИИСХ в 2019–2021 гг.**Table 2.** Results of the crosses between interspecific hybrids and cultivars of potato at Kamchatka Research Institute of Agriculture (2019–2021)

Гибрид картофеля / Potato hybrid	Число комбинаций скрещиваний с сортами / Number of crosses with potato cultivars	Число опыленных цветков / Number of pollinated flowers	Завязалось ягод, мин. – макс. (%) / Berries formed, min – max (%)	Средне число семян в одной ягоде, мин. – макс. / Average seed number per berry, min – max
99-6-5	0	46	0	0
99-6-6 (♂♀)	2	5	66–100	67–75
94-5	5	45	42–100	30–158
99-10-1	3	13	40–100	46–110
8-1-2004	2	19	45–100	45–241
8-3-2004	3	19	57–100	21–103
8-5-2004	4	48	12–75	67–207
135-3-2005	5	35	7–100	13–133
135-5-2005	4	11	18–100	30–102
117-2	1	12	50	18
134-2-2006 (♂♀)	6	28	14–100	22–222
Итого:	35	281		

Примечание: ♂♀ – скрещивания результативны при использовании гибридов картофеля в качестве и материнской, и отцовской форм

Note: ♂♀ – the crosses were effective when potato hybrids were used as maternal and paternal forms

Таблица 3. Продуктивность и скороспелость нового поколения гибридов картофеля (учет на 70-й день вегетации, 16.08.2022 г., Камчатский НИИСХ)**Table 3.** Yield and earliness of the new generation of potato hybrids

(assessed on the 70th day of the growing season, Aug. 16, 2022, Kamchatka Research Institute of Agriculture)

Сорт, селекционный номер гибрида / Cultivar or hybrid breeding No.	Происхождение гибрида / Pedigree of the hybrid	Масса ботвы, г/куст / Haulm weight, g/plant	Продуктивность, г/куст / Yield, g/plant	Средняя масса 1 клубня, г / Average weight of 1 tuber, g	Товарность, % / Tuber marketability, %	Отношение массы клубней к массе ботвы / Ratio of tuber weight to haulm weight
'Fresco'		567	466	50	86	0,8
'Вулкан'		667	600	45	83	0,9
73-1-22	94-5 × 'Bellarosa'	934	1000	49	83	1,1
73-2-22	"	700	300	42	61	0,4
73-3-22	"	633	167	–	–	0,3
73-6-22	"	900	633	37	58	0,7
73-9-22	"	534	266	–	–	0,5
73-12-22	"	1633	666	40	60	0,4
73-13-22	"	867	500	56	60	0,6

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Сорт, селекционный номер гибрида / Cultivar or hybrid breeding No.	Происхождение гибрида / Pedigree of the hybrid	Масса ботвы, г/куст / Haulm weight, g/plant	Продуктивность, г/куст / Yield, g/plant	Средняя масса 1 клубня, г / Average weight of 1 tuber, g	Товарность, % / Tuber marketability, %	Отношение массы клубней к массе ботвы / Ratio of tuber weight to haulm weight
73-16-22	"	400	483	37	41	1,2
73-20-22	"	834	533	40	63	0,6
73-21-22	"	1033	833	38	52	0,8
64-7-22	94-5 × 'Солнышко'	233	400	50	50	1,7
64-13-22	"	1000	633	45	71	0,6
27-2-22	8-1-2004 × 'Bellarosa'	900	867	62	81	0,8
27-5-22	"	533	167	38	36	0,3
27-7-02	"	533	533	35	56	1,0
78-2-22	8-5-2004 × 'Bellarosa'	567	566	56	76	0,6
78-3-22	"	333	367	39	82	1,1
78-6-22	"	333	17	-	-	-
78-13-22	"	567	300	40	44	0,5
78-21-22	"	567	650	46	67	1,1
63-9-22	'Рябинушка' × 99-6-6	1167	267	30	38	0,2
63-10-22	"	1033	300	39	39	0,3



Рис. 3. Клубни сортов-стандартов 'Вулкан' и 'Fresco'

Fig. 3. Tubers of cvs. 'Vulkan' and 'Fresco' (references)



Рис. 4. Клубни новых высокопродуктивных гибридов 73-1-22 и 73-21-22 (отбор в комбинации 94-5 × 'Bellarosa')

Fig. 4. Tubers of new high-yielding potato hybrids 73-1-22 and 73-21-22 (selected from the 94-5 × 'Bellarosa' combination)

Обсуждение

Для повышения эффективности селекционного процесса и создания отечественных сортов картофеля нового поколения необходимо постоянное обновление генофонда родительских форм, вовлечение в гибридизацию генетически разнообразного исходного материала (Simakov et al., 2017; Simakov et al., 2020). Первым этапом каждой селекционной программы является сбор информации о потенциальных родительских формах и их точная оценка в конкретных агроэкологических условиях (Bradshaw, 2021). Селекционную ценность родительских форм определяют по результатам изучения их родословных, оценки полового потомства и коэффициентов отбора (Nagel et al., 2022). Выделение исходного материала среди сортов картофеля в коллекции ВИР для селекции на скороспелость, продуктивность, высокое содержание крахмала, устойчивость к ЗКН и фитофторозу рекомендовано осуществлять с применением технологии многоступенчатого скрининга генофонда (Kostina et al., 2010). Нами впервые проведена оценка селекционной ценности клонов межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР в ходе выполнения селекционной программы по созданию новых сортов картофеля для условий Камчатского края.

Изучение клонов межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР в условиях Камчатского края показало, что по большинству параметров хозяйственно ценных признаков клоны соответствуют требованиям, предъявляемым к столовому картофелю. При разной тепло- и влагообеспеченности в период вегетации продуктивность клонов 99-6-6, 8-1-2004, 8-3-2004, 8-5-2004, 117-2 была на уровне или выше, чем продуктивность сортов-стандартов 'Вулкан' и 'Fresco'. Минимальная продуктивность (400–444 г/куст), отмеченная у сорта 'Вулкан' и клонов межвидовых гибридов в 2021 г. (при повышенных температурах и дефиците влаги), эквивалентна

урожайности 16 т/га – необходимой для ранних сортов картофеля (Simakov et al., 2018).

Изучение межвидовых гибридов картофеля из коллекции ВИР, проведенное в условиях Тульской области, выявило клоны высокопродуктивные, экологически пластичные со стабильной урожайностью (Khloryuk et al., 2021). Изучение межвидовых гибридов из коллекции ВИР, проведенное в условиях Московской области, выявило клоны с комплексом ценных признаков, которые были использованы для скрещивания с сортами и селекционными формами Федерального исследовательского центра (ФИЦ) картофеля имени А.Г. Лорха (Simakov et al., 2017).

Результаты испытаний клонов межвидовых гибридов картофеля в условиях Камчатского края подтверждают их селекционную ценность. Способность клона 117-2 стабильно формировать высокий урожай при испытаниях в 2014–2020 гг. в Тульской области сохраняется и в условиях Камчатки. Экологическая пластичность клона 8-3-2004, установленная при выращивании в Ленинградской и Тульской областях, отмечена и в экстремальных условиях Камчатского края. Клоны 135-5-2005, 8-3-2004 и 8-5-2004, у которых отмечена высокая полевая устойчивость к вирусным болезням (на уровне 7–9 баллов) в условиях инфекционного фона в опытах ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха (Московская обл.), не имели симптомов вирусного поражения и при выращивании в питомнике Камчатского НИИСХ.

Клубни, сформированные на растениях клонов межвидовых гибридов, отличаются хорошими потребительскими качествами. Особую ценность представляет высокое содержание витамина С, важным источником которого является раннеспелый картофель. Анализ данных о биохимическом составе клубней показывает, что высокое содержание витамина С характерно для клубней клонов 99-10-1 и 134-2-2006 при выращивании в разных почвенно-климатических условиях: 18,8–20,7 мг/% в усло-

виях Камчатского края и 16–19 мг/% в условиях Московской области (Polivanova et al., 2021).

При скрещивании с сортами картофеля более эффективно использование межвидовых гибридов картофеля в качестве материнских форм. Об этом свидетельствуют результаты гибридной работы, выполненной в ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха (Simakov et al., 2017) и Камчатском НИИСХ. Зависимость результатов от сорта-опылителя и внешних условий хорошо отражает сравнительный анализ скрещивания клонов 8-1-2004 и 135-5-2005 с разными сортами в ФИЦ картофеля имени А.Г. Лорха (Simakov et al., 2017) и в Камчатском НИИСХ. В каждой селекционной программе использованы проверенные опылители с высокой фертильностью. При скрещивании клонов 8-1-2004 и 135-5-2005 с сортами 'Аврора', 'Бриз', 'Дубрава', 'Labadia', 'Киви', 'Валентина', 'Gala' (Simakov et al., 2017) завязываемость ягод составила 33–48%, количество семян в ягоде – 122–188 шт. В комбинациях клонов 8-1-2004 и 135-5-2005 с сортами 'Bellarosa', 'Вулкан', 'Солнышко' завязываемость ягод – 45–100%, количество семян в ягоде – 30–241 шт. (Камчатский НИИСХ)

Результаты гибридизации в условиях Камчатского края указывают на пригодность использования клонов межвидовых гибридов из коллекции ВИР и в качестве опылителей. Малая обсемененность ягод в комбинациях с использованием пыльцы клонов межвидовых гибридов обуславливает необходимость проведения большого числа скрещиваний. В то же время получение потомства от реципрокных скрещиваний не только перспективно для селекции, но представляет интерес и для генетических исследований – изучения особенностей наследования признаков в потомстве клонов межвидовых гибридов картофеля.

Новые раннеспелые и высокопродуктивные гибриды выделены в потомстве от скрещивания среднеранних клонов 94-5 и 8-1-2004 с раннеспелым сортом 'Bellarosa', в потомстве двух среднеранних форм: клона 94-5 с сортом 'Солнышко' или комбинации среднеспелого клона 8-5-2004 с ранним сортом 'Bellarosa'. В комбинации среднераннего сорта 'Рябинушка' и среднеспелого клона 99-6-6 селекционного материала, перспективного для условий Камчатского края, не выделено. Изучение потомства, полученного в комбинациях скрещиваний межвидовых гибридов из коллекции ВИР с сортами картофеля, будет продолжено. Исключительно важным является идентификация наиболее ценных родительских пар для повышения частоты появления форм с ранним сроком созревания. Большой интерес представляет оценка нового поколения гибридов по устойчивости к возбудителям вирусных болезней, глободерозу и раку картофеля.

Заключение

Межвидовые гибриды 94-5, 99-10-1, 8-1-2004, 8-3-2004, 8-5-2004, 135-3-2005, 135-5-2005, 99-6-6 и 134-2-2006 из коллекции ВИР в условиях Камчатского края по большинству хозяйственно ценных признаков соответствуют или незначительно уступают сортам картофеля, при скрещивании отличаются хорошими показателями ягодообразования и завязываемости семян. Использование клонов 94-5, 8-1-2004 и 8-5-2004 в качестве материнских форм при скрещивании с сортами 'Bellarosa' и 'Солнышко' позволило создать новый селекционный материал, перспективный для выведения скороспелых сортов картофеля в условиях Камчатского края.

References / Литература

- Bradshaw J.E. Potato breeding: Theory and practice. Cham: Springer International Publishing; 2021.
- Khlopyuk M.S., Chalaya N.A., Rogozina E.V. Stability of agronomic traits in interspecific hybrid potato clones in the Central Region of European Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):79-89. [in Russian] (Хлопчук М.С., Чалая Н.А., Рогозина Е.В. Стабильность агрономически ценных признаков у клонов межвидовых гибридов картофеля в условиях Центрального региона европейской территории России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):79-89). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-79-89
- Kostina L.I., Fomina V.E., Koroleva L.V., Bychkov D.A., Kosareva O.S. Catalogue of the VIR global collection. Issue 804. Potato: Breeding varieties (initial material selected with a new technology). St. Petersburg: VIR; 2010. [in Russian] (Костина Л.И., Фомина В.Е., Королева Л.В., Бычков Д.А., Косарева О.С. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 804. Картофель: Селекционные сорта картофеля: (исходный материал, выделенный на основе новой технологии). Санкт-Петербург: ВИР, 2010).
- Methodology of potato crop research (Metodika issledovaniya po kulture kartofelya). Moscow: Research Institute of Potato Farming; 1967. [in Russian] (Методика исследований по культуре картофеля. Москва: НИИКХ; 1967).
- 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
- Polivanova O.B., Gins E.M., Moskalev E.A., Voinova M.S., Koroleva A.K., Semenov A.Zh. et al. Quality evaluation, phytochemical characteristics and estimation of beta-carotene hydroxylase 2 (*Chy2*) alleles of interspecific potato hybrids. *Agronomy*. 2021;11(8):1619. DOI: 10.3390/agronomy11081619
- Rogozina E.V., Chalaya N.A., Beketova M.P., Biryukova V.A., Kirpicheva M.A., Kuznetsova M.A., Manankov V.V., Fadina O.A., Khlopyuk M.S., Khavkin E.E. Catalogue of the VIR global collection. Issue 866. Interspecific potato hybrids resistant to disease causative agents. St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Рогозина Е.В., Чалая Н.А., Бекетова М.П., Бирюкова В.А., Кирпичева Т.В., Кузнецова М.А., Мананков В.В., Фаина О.А., Хлопчук М.С., Хавкин Э.Е. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 866. Межвидовые гибриды картофеля, устойчивые к возбудителям болезней. Санкт-Петербург: ВИР; 2018).
- Ryakhovskaya N.I., Gaynatullina V.V., Vlasenko G.P. Agrobiological rationale for seed potato cultivation in the environments of Kamchatka Territory (Agrobiologicheskoye obosnovaniye vozdeliyvaniya semennogo kartofelya v usloviyakh Kamchatskogo kraya). Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2016. [in Russian] (Ряховская Н.И., Гайнатуллина В.В., Власенко Г.П. Агробиологическое обоснование возделывания семенного картофеля в условиях Камчатского края. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2016).
- Sherstyukova T.P. Evaluation of potato hybrids of various origin according to their earliness in the environments of Kamchatka Territory (Otsenka gibridov kartofelya razlichnogo proiskhozhdeniya po skorospelosti v usloviyakh Kamchatskoy oblasti). *Nauchnye trudy Leningradskogo selskokhozyaystvennogo instituta = Scientific Papers of Leningrad Agricultural Institute*. 1977;(298):57-61. [in Russian] (Шерстюкова Т.П. Оценка гибридов картофеля различного происхождения по скороспелости

- сти в условиях Камчатской области. *Научные труды Ленинградского сельскохозяйственного института*. 1977;(298):57-61).
- Simakov E.A., Anisimov B.V., Zhevora S.V., Mityushkin A.V., Meleshin A.A., Apshev Kh.Kh., Zhuravlev A.A., Mityushkin A.V., Zharova V.A., Salyukov S.S., Ovechkin S.V., Gayzatulin A.S., Shanina E.P., Klyukina E.M., Stashevski Z., Zamalieva F.F., Krasnikov S.N., Rogachev N.I., Dergacheva N.V., Cheremisin A.I., Evdokimova Z.Z., Shelabina T.A., Novoselov A.V., Volik N.M., Dolov M.S., Abazov A.Kh., Sergeeva Z.F., Sintsova N.F., Gadzhiev N.M., Lebedeva V.A., Seregina N.I., Dubinin S.V. Potato cultivars bred in Russia (Sorta kartofelya rossiyskoy selektsii). Simakov E.A. (ed.). Moscow; 2018. [in Russian]. (Симаков Е.А., Анисимов Б.В., Жевора С.В., Митюшкин А.В., Мелешин А.А., Апшев Х.Х., Журавлев А.А., Митюшкин А.В., Жарова В.А., Салюков С.С., Овечкин С.В., Гайзатулин А.С., Шанина Е.П., Клюкина Е.М., Сташевский З., Замалиева Ф.Ф., Красников С.Н., Рогачев Н.И., Дергачева Н.В., Черемисин А.И., Евдокимова З.З., Шелабина Т.А., Новоселов А.В., Волик Н.М., Долов М.С., Абазов А.Х., Сергеева З.Ф., Синцова Н.Ф., Гаджиев Н.М., Лебедева В.А., Серегина Н.И., Дубинин С.В. Сорта картофеля российской селекции / под ред. Е.А. Симакова. Москва; 2018).
- Simakov E.A., Anisimov B.V., Zhevora S.V., Mityushkin A.V., Zhuravlev A.A., Mityushkin A.V., Gaizatulin A.S. Current trends in the development of potato breeding and seed production in Russia. *Potato and Vegetables*. 2020;(12):22-26. [in Russian]. (Симаков Е.А., Анисимов Б.В., Жевора С.В., Митюшкин А.В., Журавлев А.А., Митюшкин А.В., Гайзатулин А.С. Актуальные направления развития селекции и семеноводства картофеля в России. *Картофель и овощи*. 2020;(12):22-26). DOI: 10.25630/PAV.2020.49.70.005
- Simakov E.A., Sklyarova N.P., Yashina I.M. (comp.). Guidelines for potato breeding process technology (Metodicheskiye ukazaniya po tekhnologii selektsionnogo protsessa kartofelya). Moscow; 2006. [in Russian] (Методические указания по технологии селекционного процесса картофеля / сост. Е.А. Симаков, Н.П. Скларова, И.М. Яшина. Москва; 2006).
- Simakov E.A., Zharova V.A., Mityushkin A.V., Biryukova V.A., Rogozina E.V., Kiru S.D. The use of genetic resources to increase the efficiency of potato breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2017;178(2):113-121. [in Russian] (Симаков Е.А., Жарова В.А., Митюшкин А.В., Бирюкова В.А., Рогозина Е.В., Киру С.Д. Использование генетических ресурсов картофеля для повышения эффективности селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2017;178(2):113-121). DOI: 10.30901/2227-8834-2017-2-113-121
- Strategy for the development of agro-industrial and fishery complexes of the Russian Federation for the period until 2030 (Strategiya razvitiya agropromyshlennogo i rybokhozyaystvennogo kompleksov Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda). Moscow: Government of the Russian Federation; 2022. [in Russian] (Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года. Москва: Правительство Российской Федерации; 2022). URL: <http://static.government.ru/media/files/G3hzRyrGPbmFAfBFgmEhxTrec694MaHr.pdf> [дата обращения: 28.08.2023].

Информация об авторах

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

Тамара Петровна Шерстюкова, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР, 684033 Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Сосновка, ул. Центральная, 4, shestyukova.tamara@tamara.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8574-4604>

Ольга Ивановна Хасбиуллина, кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Камчатский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ВИР, 684033 Россия, Камчатский край, Елизовский район, с. Сосновка, ул. Центральная, 4, Khasbiullina@kamniish.ru, <https://orcid.org/0000-001-7368-0244>

Елена Вячеславовна Рогозина, 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, rogozinaelena@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2743-068X>

Information about the authors

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

Tamara P. Sherstyukova, Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kamchatka Research Institute of Agriculture, branch of VIR, 4 Tsentralnaya St., Sosnovka Village, Yelizovsky District, Kamchatka Territory 684033, Russia, shestyukova.tamara@tamara.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8574-4604>

Olga I. Khasbiullina, Cand. Sci. (Agriculture), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kamchatka Research Institute of Agriculture, branch of VIR, 4 Tsentralnaya St., Sosnovka Village, Yelizovsky District, Kamchatka Territory 684033, Russia, Khasbiullina@kamniish.ru, <https://orcid.org/0000-001-7368-0244>

Elena V. Rogozina, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, rogozinaelena@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2743-068X>

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 01.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 01.11.2023; approved after reviewing on 23.11.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 631.522/.524
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-64-73



Устойчивость яблони к стрессам зимнего периода в условиях Краснодарского края

Г. К. Киселева, Е. В. Ульяновская, Т. В. Схаляхо, А. В. Караваева

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

Автор, ответственный за переписку: Галина Константиновна Киселева, galina-kiseleva-1960@mail.ru

Актуальность. Физиолого-биохимические исследования устойчивости сортов яблони разного эколого-географического происхождения к зимним стрессам в условиях глобального потепления важны для выявления наиболее адаптивных сортов с целью использования в селекционном процессе. Устойчивость связывается с содержанием углеводов, антоцианов, активностью пероксидазы.

Материалы и методы. Изучались 2 сорта яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ) и 3 зарубежных сорта зимнего срока созревания по общепринятым физиолого-биохимическим методикам.

Результаты и обсуждение. Сорта яблони селекции СКФНЦСВВ 'Орфей' и 'Прикубанское' в сравнении с сортами зарубежной селекции 'Энтерпрайз', 'Флорина', 'Лигол' содержали повышенное содержание общей воды (на 2,5%), крахмала (на 9,5 мг/г), водорастворимых сахаров (на 19,3 мг/г) в побегах в течение зимнего периода. В процессе зимовки у сортов отечественной селекции содержание антоцианов увеличивалось в 2,9–4,3 раза, у остальных сортов – в 2,4–2,8 раза. Закономерностей между уровнем общей активности пероксидазы и зимостойкостью различных сортов яблони не выявлено.

Заключение. Сорта 'Орфей' и 'Прикубанское' обладают повышенной адаптивностью к зимним условиям нестабильного климата юга России и рекомендуются для возделывания в Краснодарском крае, а также для использования в селекционном процессе.

Ключевые слова: *Malus domestica*, зимостойкость, углеводы, антоцианы, пероксидаза

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственной программы FGRE-2022-0001 Министерства науки и высшего образования РФ.

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

Для цитирования: Киселева Г.К., Ульяновская Е.В., Схаляхо Т.В., Караваева А.В. Устойчивость яблони к стрессам зимнего периода в условиях Краснодарского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):64-73. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-64-73

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-64-73

Winter stress resistance of apple tree under the conditions of Krasnodar Territory

Galina K. Kiseleva, Elena V. Ulyanovskaya, Tatyana V. Skhalyakho, Alla V. Karavaeva

North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Krasnodar, Russia

Corresponding author: Galina K. Kiseleva, galina-kiseleva-1960@mail.ru

Background. Physiological and biochemical research on winter stress resistance of apple-tree cultivars of different ecogeographic origin under global warming is important for identifying the most adaptable genotypes for use in breeding practice. Such resistance is associated with the content of carbohydrates and anthocyanins, and the activity of peroxidase.

Materials and methods. Two winter apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine making (NCFSCHVW) and 3 foreign winter cultivars were studied using conventional physiological and biochemical methods.

Results and discussion. The apple-tree cultivars 'Orfey' and 'Prikubanskoye' bred at the NCFSCHVW, when compared with foreign cvs. 'Enterprise', 'Florina' and 'Ligol', demonstrated higher contents of total water (by 2.5 %), starch (by 9.5 mg/g) and water-soluble sugars (by 19.3 mg/g) in shoots during the winter period. In the process of wintering, the anthocyanin content increased 2.9–4.3 times in the domestic cultivars, and 2.4–2.8 times in foreign ones. No regularities were found between the level of total peroxidase activity and winter hardiness of the studied apple cultivars.

Conclusion. Cvs. 'Orfey' and 'Prikubanskoye' showed increased adaptability to the winter conditions in the unstable climate of Southern Russia, and can be recommended for cultivation in Krasnodar Territory and use in breeding practice.

Keywords: *Malus domestica*, winter hardiness, carbohydrates, anthocyanins, peroxidase

Acknowledgements: the work was done within the framework of the FGRE-2022-0001 State Program of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

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

For citation: Kiseleva G.K., Ulyanovskaya E.V., Skhalyakho T.V., Karavaeva A.V. Winter stress resistance of apple tree under the conditions of Krasnodar Territory. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):64-73. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-64-73

Введение

В последние годы в Краснодарском крае произошли существенные климатические изменения. Так, если для 1981–2000 гг. были характерны морозы ранней осенью, то с 2011 г. и по настоящее время морозы преобладают в середине зимы и весной, частота низкотемпературных стрессов возросла с 9 до 33%, или в 3,7 раза, в сравнении с периодом 1981–2000 гг. Вместе с тем за последние десять лет зимы стали менее холодными, что обусловлено общей тенденцией потепления климата в мире. В Краснодарском крае анализ климатических изменений за период 1961–2020 гг. установил, что среднегодовая температура воздуха повысилась на 1,7°C за последние 50 лет. Несмотря на то что яблоня, в сравнении с другими плодовыми культурами (вишня, слива, персик и др.), более зимостойка и морозоустойчива, мягкие теплые зимы зачастую способствовали преждевременному выходу деревьев из зимнего покоя, при этом у некоторых сортов происходило снижение адаптационной устойчивости, приводящее к снижению урожайности (Ulyanovskaya, Belenko, 2021).

Вопросы адаптационной устойчивости возделываемых растений в условиях глобального потепления находятся в центре внимания исследователей всего мира (Kazlouskaya, 2015; Arora, Taulavuori, 2016; Raza et al., 2019; Dalhaus et al., 2020). G. Malagi et al. (2015) установили, что в условиях мягких зим фазы зимнего покоя выявляются нечетко. Фаза глубокого покоя, если она действительно существует в условиях мягких зим, длится очень короткое время. Так, в условиях Бразилии, для которой характерны мягкие зимы с повышенными температурами, растения яблони быстрее переходили из глубокого покоя в вынужденный, чем в условиях Франции (Malagi et al., 2015).

В связи с этим актуальным является физиолого-биохимическое изучение ответных реакций плодовых растений на нестабильные климатические условия. В зарубежной и отечественной литературе проведено достаточно исследований по изучению защитно-приспособительных механизмов адаптации растений к пониженным температурам в условиях глобального изменения климата. В предзимний период в тканях растений происходят различные метаболические перестройки, связанные с накоплением крахмала, белков, сахаров, фенольных и других соединений, которые обладают криопротекторным действием и усиливают адаптационную устойчивость (Krasova et al., 2014; Călugăr et al., 2019; Fernandez et al., 2019; Rachenko M.A., Rachenko A.M., 2020; Krasova et al., 2022).

Достаточно детально изучены физиолого-биохимические особенности устойчивости яблони к неблагоприятным факторам зимнего периода в различных почвенно-климатических зонах. В условиях средней полосы России выявлено, что параметры водного обмена, активность пероксидазы, динамика накопления растворимых сахаров, пролина, аскорбиновой кислоты, антоцианов служат диагностическими показателями зимостойкости различных сортов яблони (Krasova et al., 2012; Krasova et al., 2014).

Китайские исследователи, изучив десять подвоев яблони, выявили, что в механизмах устойчивости к низким температурам задействованы растворимые белки, растворимые углеводы, пролин, антоцианы, ферменты пероксидазы и супероксиддисмутазы (Wang et al., 2018). Имеются данные, свидетельствующие о том, что умень-

шение содержания крахмала и увеличение растворимых сахаров в зимний период связаны с устойчивостью к низким отрицательным температурам. Так, в условиях Турции у сортов яблони разного происхождения (Америка, Турция) высокое содержание растворимых сахаров вследствие гидролиза крахмала обнаружено в середине зимы, а уменьшение сахаров наблюдалось ранней весной (Sivaci, 2006).

Показано, что у недостаточно зимостойких сортов яблони и винограда активность пероксидазы повышалась после зимних стрессов, поскольку побеги и почки морозоустойчивых сортов характеризуются более глубоким изменением свойств коллоидов протоплазмы, вследствие чего они меньше реагируют на изменение температурного фактора в течение зимнего периода (Krasova et al., 2014; Kiseleva et al., 2022). Таким образом, вышеперечисленные параметры можно рассматривать в качестве критериев адаптационной оценки яблони к условиям зимнего периода.

Цель данной работы – оценить адаптационную устойчивость сортов яблони разного эколого-географического происхождения к условиям изменяющегося климата по физиолого-биохимическим параметрам, выделить наиболее зимостойкие сорта для возделывания в условиях Краснодарского края.

Материалы и методы

Растительный материал

Сбор материала проводили в опытно-производственном хозяйстве «Центральное» (г. Краснодар) с ноября по март 2021–2023 гг. Исследования проводили на базе Центра коллективного пользования «Исследовательско-селекционная коллекция генетических ресурсов садовых культур» Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ). Объектами исследований были побеги и кора побегов сортов яблони селекции СКФНЦСВВ и зарубежных сортов зимнего срока созревания. Сорт 'Орфей' – контроль (табл. 1).

Группа сортов на подвое СК2 – 'Энтерпрайз', 'Флорина', 'Орфей' 2013 года посадки при схеме посадки 4 × 1,2 м. Группа сортов на подвое СК4 – 'Лигол', 'Прикубанское' 2010 года посадки при схеме посадки 4,5 × 0,9 м. Основные различия между этими подвоями заключены в силе роста привитых на них деревьев. Подвой СК2 – полукарликовый, СК4 – карликовый. Оба подвоя – селекции СКФНЦСВВ.

Материалом исследования служили однолетние побеги с пяти деревьев каждого изучаемого сорта в пятикратной повторности.

Количественная оценка физиолого-биохимических показателей

Оводненность побегов определяли весовым методом после высушивания навесок в термостате при 105°C до постоянной массы и выражали в % от сырой массы (Galasheva, Krasova, 2013). Крахмал и сахара определяли фотоколориметрическим антроновым методом. В основе метода лежит гидролиз углеводов в серной кислоте с образованием производных фурфурола, которые при взаимодействии с антроном дают комплексное соединение синевато-зеленого цвета. Оптическую плотность растворов измеряли на фотоколориметре ФЭК-56 при длине волны $\lambda = 620$ нм (Leyva et al., 2008). Содержание антоцианов в коре побегов оценивали с помощью фотоколориметра ФЭК-56 по методике, предложенной М. А. Соловье-

Таблица 1. Используемые в исследовании сорта яблони
Table 1. Apple cultivars used in the current study

Название, подвой / Name, rootstock	Происхождение / Origin	Организация, страна селекции / Institution, country of breeding	Год включения в Госреестр* / Year of inclusion in the State Register	Регион допуска / Approved region of cultivation
'Орфей', СК2	Голден Делишес тетраплоидный × OR18T13 ('Вольф Ривер' × М. × <i>atrosanguinea</i> 804/240-57)	СКФНЦСВВ, Краснодар, совместно с ВНИИСПК, Орел, Россия	2019	Северо-Кавказский
'Энтерпрайз', СК2	Получен от скрещивания сортов 'Макинтош' и 'Голден Делишес' и дикой разновидности <i>Malus</i>	Университет Пердью, США	2020	Северо-Кавказский
'Флорина', СК2	Путем многократных скрещиваний с использованием вида <i>Malus floribunda</i> 821 и сортов 'Ром Бьюти', 'Голден Делишес', 'Старкинг', 'Джонатан'	Франция	2000	Центрально-Черноземный, Северо-Кавказский, Нижневолжский
'Лигол', СК4	'Линда' × 'Голден Делишес'	Институт садоводства и цветоводства, Скерневице, Польша	2017	Центрально-Черноземный, Нижневолжский
'Прикубанское', СК4	'Ред Делишес' × 'Опалесцент'	СКФНЦСВВ, Краснодар, Россия	2002	Северо-Кавказский

Примечание: * – Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в Российской Федерации
 Note: * – State Register for Selection Achievements Admitted for Usage in the Russian Federation

вой (Solovyeva, 1988). Активность пероксидазы определяли колориметрическим методом, основанным на определении скорости реакции окисления бензидина (Ermakov, 1987). Обработку данных проводили статистическими методами с использованием программы Microsoft Office Excel 2010 (Dospekhov, 2012).

Результаты и обсуждение

Зимостойкое состояние дерева формируется осенью после снижения интенсивности роста, в процессе закалывания под воздействием постепенного понижения температуры воздуха до низкой положительной и сокращения продолжительности светового дня. В условиях Краснодарского края зимы стали теплее за счет того, что самый холодный месяц года январь в последнее десятилетие имеет стабильные положительные значения среднемесячной температуры воздуха. В январе 2021 г. среднемесячная температура воздуха была +1,9°C, а в январе 2022 г. – +1,1°C. Также в январе (за период 1961–2021 гг.) установлена вероятность повторяемости критических отрицательных температур, которые для плодовых почек яблони составляют –23,0...–28,0°C. В январе 2021 г. минимальная температура воздуха опускалась до –9,3°C, а в 2022 г. – до –13,4°C. Повреждение яблони низкими отрицательными температурами зависит от предшествующих стрессу температур. В осенние месяцы исследуемого периода минимальные температуры воздуха

варьировали от + 2,2 до –5,1°C, а в декабре 2021 и 2022 г. имели значения –12,6°C и –6,7°C соответственно.

В осенний период подготовки к неблагоприятным зимним условиям для яблони характерно увеличение оводненности тканей зимующих побегов (Galasheva, Krasova, 2013). В проведенных нами исследованиях в течение осенне-зимнего периода 2021/2022 г. содержание воды в однолетних побегах яблони существенно не изменялось, значения оводненности варьировали от 47,8 до 50,3%. В течение 2022/2023 г. содержание воды варьировало от 47,5 до 50,5% (табл. 2).

Несколько повышенная оводненность тканей побегов (на 1,9–2,5%) в сравнении с другими изучаемыми сортами отмечена у сортов 'Орфей' и 'Прикубанское' во все месяцы изучаемого периода.

По данным Красовой Н. Г. с соавторами (Krasova et al., 2012), в условиях средней полосы России оводненность побегов яблони колебалась в течение зимнего периода в соответствии с изменениями температуры воздуха и была выше у зимостойких сортов в сравнении с незимостойкими (Krasova et al., 2012). Следовательно, сорта 'Орфей' и 'Прикубанское' – более зимостойкие в сравнении с другими сортами по показателям оводненности побегов.

Как правило, у высокозимостойких сортов в условиях холодных зим отмечается повышенная оводненность тканей побегов и почек, но обнаружен интересный единичный факт: у низкокзимостойкого сорта 'Ева' в услови-

Таблица 2. Оводненность (%) однолетних побегов яблони
(опытно-производственное хозяйство «Центральное», г. Краснодар, 2021–2023 гг.)

Table 2. Water content (%) in one-year-old apple-tree shoots
(Tsentrallye Experiment and Production Farm, Krasnodar, 2021–2023)

Сорт	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
2021/2022 г.					
‘Орфей’	50,3 ± 4,5	49,5 ± 2,3	50,2 ± 3,4	49,7 ± 4,2	52,0 ± 3,6
‘Энтерпрайс’	49,2 ± 3,5	48,5 ± 1,9	48,1 ± 1,6	49,9 ± 3,1	52,1 ± 3,1
‘Флорина’	47,8 ± 3,9	47,8 ± 2,2	48,8 ± 4,1	48,5 ± 2,4	51,9 ± 3,7
‘Лигол’	48,2 ± 3,6	48,5 ± 3,9	48,1 ± 3,5	49,1 ± 5,1	52,5 ± 2,8
‘Прикубанское’	49,5 ± 2,5	50,2 ± 3,7	49,7 ± 4,6	50,1 ± 2,3	52,2 ± 1,6
НСР ₀₅	0,7	0,6	0,4	0,5	0,4
2022/2023 г.					
‘Орфей’	50,4 ± 4,2	49,9 ± 4,2	50,5 ± 1,1	49,5 ± 2,1	52,9 ± 3,1
‘Энтерпрайс’	49,8 ± 3,8	47,5 ± 1,5	49,1 ± 2,1	48,9 ± 3,2	51,7 ± 1,5
‘Флорина’	49,3 ± 2,1	48,1 ± 2,3	48,2 ± 3,1	47,9 ± 4,2	52,9 ± 2,6
‘Лигол’	49,2 ± 4,1	47,7 ± 5,1	48,7 ± 4,5	49,2 ± 3,5	53,3 ± 2,8
‘Прикубанское’	49,8 ± 3,5	50,0 ± 3,4	49,7 ± 3,6	50,3 ± 2,5	52,4 ± 3,1
НСР ₀₅	0,7	0,9	0,8	0,7	0,5

Примечание: НСР₀₅ – наименьшая существенная разность

Note: LSD₀₅ – least significant difference

я мягкой зимы на юге Бразилии содержание воды в почках яблони, особенно в верхушечных, увеличивалось (Schmitz et al., 2015).

В наших исследованиях весной, с возобновлением вегетации после выхода из состояния зимнего покоя, оводненность побегов заметно увеличилась, причем в большей степени у сортов ‘Флорина’ и ‘Лигол’ – на 3,4% в 2021/2022 г. и на 4,1–5% в 2022/2023 г. (см. табл. 2). Наши данные согласуются с данными японских исследователей, которые наблюдали резкое увеличение оводненности побегов молодых яблонь в марте (Botirov, Arakawa, 2021). В условиях средней полосы России увеличение оводненности побегов наблюдалось в апреле при повышении температуры воздуха (Krasova et al., 2012).

Адаптация растений к зимним неблагоприятным условиям сопровождается различными перестройками метаболизма, совокупность которых придает клеткам устойчивость к действию низких повреждающих температур. Важную роль в адаптации растений к пониженным температурам играют углеводы. Накопление сахаров при закалке растений является универсальным явлением. Для повышения осмотического давления на первых фазах закалки в естественных условиях произрастания наиболее важны моносахариды (глюкоза, фруктоза), а позже (для связывания воды) – дисахариды (сахароза). Накопление и динамика содержания крахмала в различных органах плодовых растений также напрямую связаны с погодными условиями и зимостойкостью (Sivaci, 2006; Krasova et al., 2012; Wang et al., 2018).

Нами установлено, что к ноябрю больше всего крахмала накапливалось у сортов ‘Орфей’, ‘Прикубанское’ – 18,6–19,7 мг/г сухого веса, у остальных сортов оно со-

ставляло 10,2–15,2 мг/г сухого веса. Повышенное содержание суммы водорастворимых сахаров (глюкоза, фруктоза, сахароза) в это время также отмечено у сортов ‘Орфей’, ‘Прикубанское’ (42,1–47,4 мг/г сухого веса), у остальных сортов оно составляло 28,1–35,2 мг/г сухого веса (рис. 1).

Под действием низких температур в зимний период происходит гидролиз крахмала, в результате которого синтезируются различные сахара – осмотически активные соединения. Многочисленными исследованиями показано, что сахара обладают хорошо выраженными протекторными свойствами и повышают устойчивость растений к низким отрицательным температурам (Sivaci, 2006; Krasova et al., 2014).

В наших исследованиях у большинства исследуемых сортов в период уменьшения крахмала отмечено повышение содержания суммы водорастворимых сахаров, свидетельствующее о происходящем гидролизе. В первую зиму гидролиз отмечен в декабре 2021 г. после резкого понижения температуры до –12,6°C, в последующую зиму – в январе после резкого понижения температуры до –13,7°C.

В оба года исследований содержание крахмала уменьшалось в большей степени у сортов ‘Орфей’, ‘Прикубанское’ – в 1,8–2,0 раза, у сорта ‘Энтерпрайс’ отмечено увеличение в 1,3–1,4 раза. У сортов ‘Флорина’ и ‘Лигол’ содержание крахмала в течение исследуемого периода существенно не изменялось и составляло 10,2–12,3 мг/г сухого веса (см. рис. 1).

Как правило, накопление водорастворимых сахаров вследствие гидролиза крахмала под воздействием низких отрицательных температур усиливается у морозо-

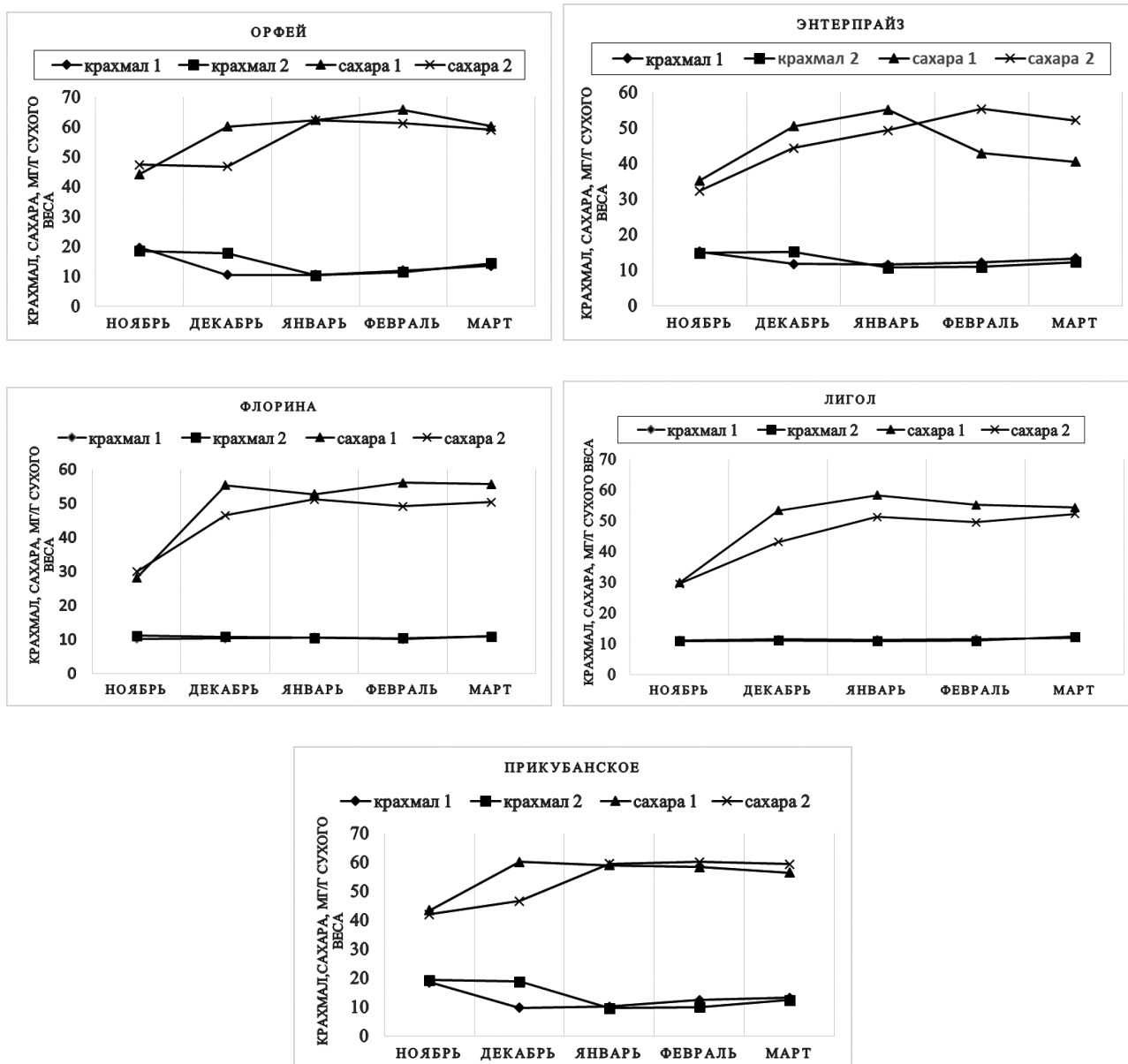


Рис. 1. Динамика содержания углеводов в побегах яблони (опытно-производственное хозяйство «Центральное», г. Краснодар): 1 – 2021/2022 г.; 2 – 2022/2023 г.

Fig. 1. Carbohydrate content dynamics in apple-tree shoots (Tsentrallye Experiment and Production Farm, Krasnodar): 1 – 2021/2022; 2 – 2022/2023

стойких сортов. Следовательно, 'Орфей', 'Прикубанское' можно отнести к сортам, устойчивым к зимним неблагоприятным условиям.

После уменьшения содержания крахмала его количество несколько увеличилось в марте (до 14,4 мг/г сухого веса) в связи с активацией ростовых процессов. Наши данные согласуются с исследованиями других ученых, проведенных в различных климатических условиях (Sivaci, 2006; Krasova et al., 2012; Wang et al., 2018).

В условиях средней полосы России у яблони осенью отмечается повышенное содержание крахмала, в декабре-январе оно резко уменьшается, в конце зимы и начале весны вновь наблюдается увеличение его содержания (Krasova et al., 2012). В условиях Турции также происходили сезонные изменения содержания углеводов в побегах яблони – максимальное содержание крахмала прихо-

дилось на октябрь, а максимальное содержание сахаров – на февраль (Sivaci, 2006).

Антоцианы вносят определенный вклад в реализацию потенциала зимостойкости растений. Во многих исследованиях подтверждена положительная роль этих метаболитов в процессах адаптации и устойчивости растений к охлаждению и замораживанию. Известно, что покровные ткани некоторых зимостойких растений содержат высокие концентрации антоцианов. В проведенных нами исследованиях в ноябре содержание антоцианов в коре изучаемых сортов яблони составляло 4,0–8,9 усл. ед. в зависимости от сорта и года исследования (рис. 2, 3).

В течение зимы у всех сортов содержание антоцианов увеличивалось в ответ на пониженные температуры. Особенно значительное повышение их количества отме-

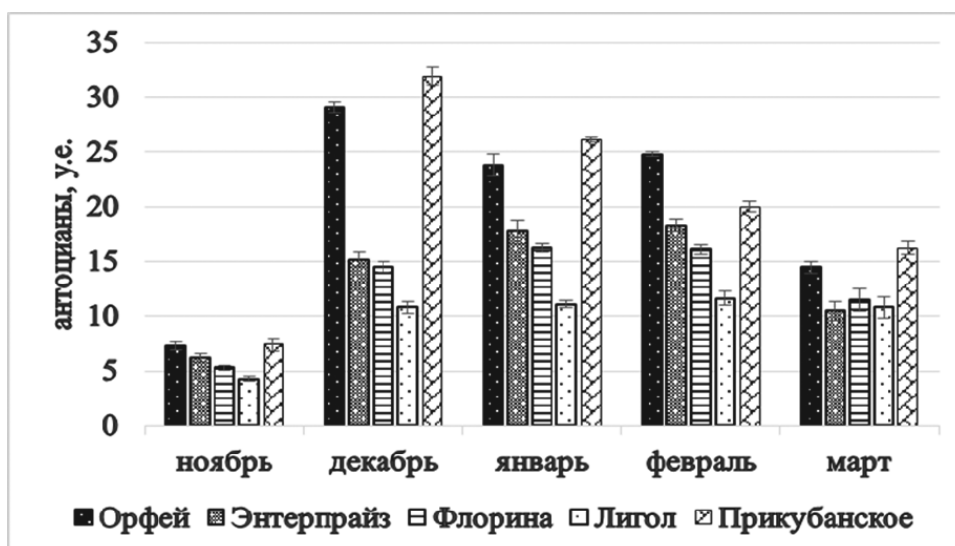


Рис. 2. Динамика содержания антоцианов в коре яблони (опытно-производственное хозяйство «Центральное», г. Краснодар, 2021/2022 г.)

Fig. 2. Anthocyanin content dynamics in apple-tree bark (Tsentrallnoye Experiment and Production Farm, Krasnodar, 2021/2022)

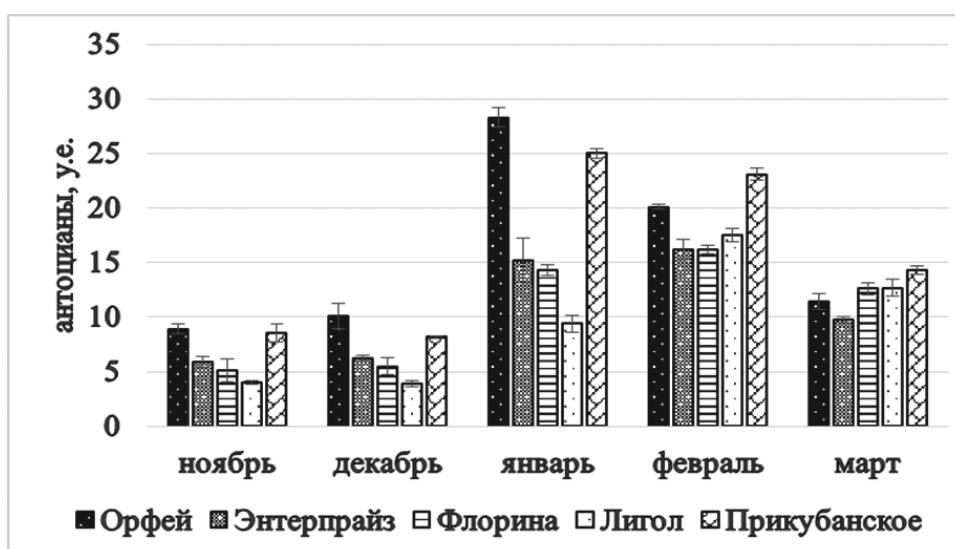


Рис. 3. Динамика содержания антоцианов в коре яблони (опытно-производственное хозяйство «Центральное», г. Краснодар, 2022/2023 г.)

Fig. 3. Anthocyanin content dynamics in apple-tree bark (Tsentrallnoye Experiment and Production Farm, Krasnodar, 2022/2023)

чено в декабре 2021 г. и в январе 2023 г. во время прохождения гидролиза крахмала с образованием водорастворимых сахаров. Это согласуется с предположением китайских исследователей, что избыток углеводов может индуцировать биосинтез антоцианов (Wang et al., 2018).

Так, в декабре 2021 г. содержание антоцианов повысилось в 2,5–4,3 раза в сравнении с ноябрем; в январе 2023 г. – в 2,4–3,1 раза в зависимости от сорта. В большей степени защитная функция антоцианов проявилась у сортов 'Орфей' и 'Прикубанское', у которых наблюдалось увеличение их содержания в 2,9–4,3 раза. У других

изучаемых сортов это увеличение было в 2,4–2,8 раза (см. рис. 2, 3). Это позволяет рассматривать эндогенный уровень антоцианов в качестве индикатора состояния растений и использовать их в целях диагностики на морозостойкость. В марте наблюдалось уменьшение содержания антоцианов в 1,1–1,7 раза в зависимости от сорта (см. рис. 2, 3).

Данные наших исследований согласуются с данными Н. Г. Красовой с соавторами (Krasova et al., 2014), выявивших, что при воздействии низких температур увеличивается содержание антоцианов в зимующих однолетних

побегах и особенно в коре. Показано, что увеличение антоцианов в коре коррелировало с повышением морозостойкости.

В развитие морозоустойчивости растений и процессы адаптации к низким температурам вовлечен фермент пероксидаза. Этот фермент является функционально очень лабильным, способным реагировать на большинство нарушений гомеостаза растений. В большинстве случаев повышение активности пероксидазы свидетельствует о стрессовой реакции и торможении ростовых процессов. Ее активность зависит от фенологической фазы развития растений: в период вызревания тканей –

снижается, в момент выхода почек из состояния покоя – повышается (Krasova et al., 2014; Wang et al., 2018).

В ноябре у всех изучаемых сортов яблони активность пероксидазы составляла 1,8–14,4 усл. ед. на мг белка. В декабре 2021 г. и январе 2023 г. активность пероксидазы резко повышалась в ответ на понижение температуры. В первом случае это повышение было в 1,2–4,8 раза, во вторую зиму – в 1,4–1,9 раза в зависимости от сорта (рис. 4, 5). Наблюдаемое увеличение общей активности пероксидазы вызвано неспецифической защитной реакцией растительного организма на стрессовое воздействие.

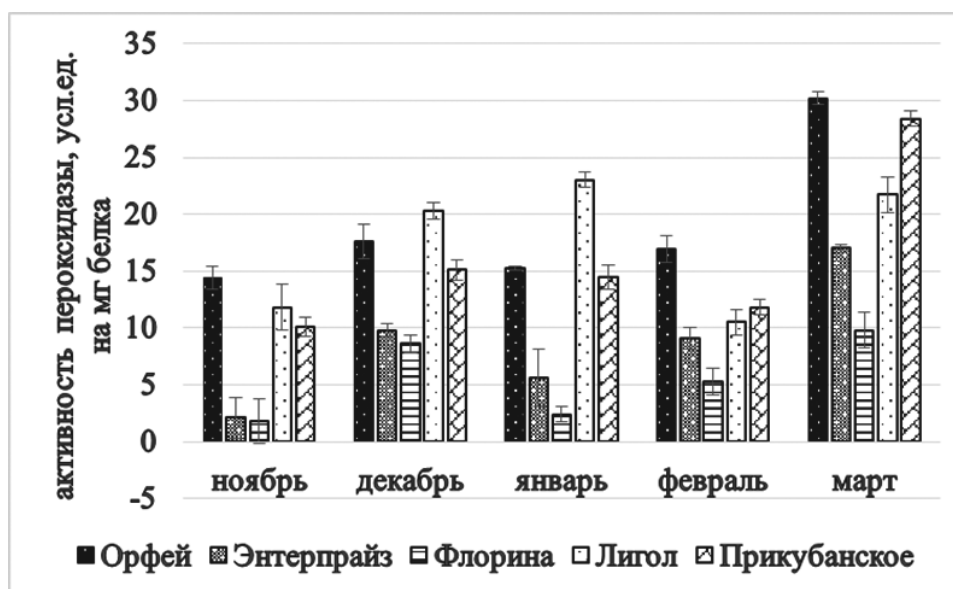


Рис. 4. Динамика активности пероксидазы в побегах яблони (опытно-производственное хозяйство «Центральное», г. Краснодар, 2021/2022 г.)

Fig. 4. Peroxidase activity dynamics in apple-tree shoots (Tsentrалnoye Experiment and Production Farm, Krasnodar, 2021/2022)

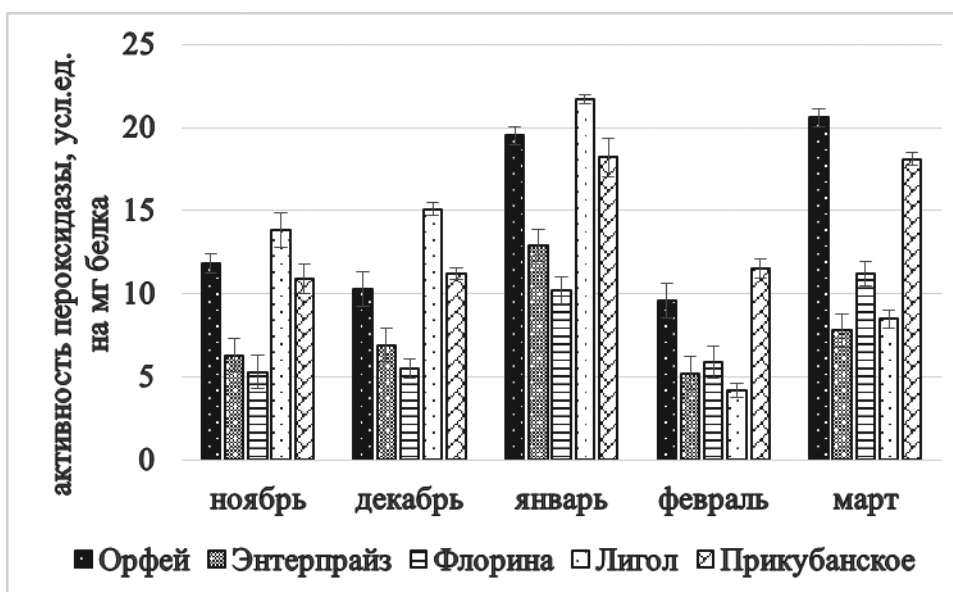


Рис. 5. Динамика активности пероксидазы в побегах яблони (опытно-производственное хозяйство «Центральное», г. Краснодар, 2022/2023 г.)

Fig. 5. Peroxidase activity dynamics in apple-tree shoots (Tsentrалnoye Experiment and Production Farm, Krasnodar, 2022/2023)

В остальные месяцы зимнего периода активность пероксидазы у одних сортов повышалась, у других снижалась – проявлялись индивидуальные особенности сортов. Возможно, это связано с тем, что при нарушении гомеостаза растительного организма происходит не только изменение ее активности, но и изменения в наборе молекулярных форм фермента (изоформ), которые расширяют границы функционирования пероксидазы (Kiseleva et al., 2022). В марте у всех изучаемых сортов активность пероксидазы повышалась в связи с активацией ростовых процессов в 1,5–2,4 раза в сравнении с февралем.

Заключение

Сорта отечественной селекции ‘Орфей’ и ‘Прикубанское’ в сравнении с интродуцированными сортами ‘Энтерпрайз’, ‘Флорина’, ‘Лигол’ обладают повышенной адаптивностью к условиям нестабильного климата юга России и рекомендуются для возделывания и использования в селекционном процессе. Об этом свидетельствуют выявленные физиолого-биохимические особенности:

- повышенная оводненность тканей побегов во все месяцы изучаемого периода (на 1,9–2,5%) в сравнении с другими сортами;

- повышенное накопление крахмала к началу зимовки – 18,6–19,7 мг/г сухого веса, в то время как у остальных сортов оно составляло 10,2–15,2 мг/г сухого веса;

- повышенное содержание суммы водорастворимых сахаров (42,1–47,4 мг/г сухого веса), в отличие от остальных сортов, у которых оно составляло 28,1–35,2 мг/г сухого веса;

- в результате гидролиза содержание крахмала уменьшалось в 1,8–2,0 раза, у остальных сортов оно практически не изменялось;

- в большей степени увеличение содержания антоцианов в 2,9–4,3 раза, в отличие от остальных сортов – в 2,4–2,8 раза.

References / Литература

- Arora R., Taulavuori K. Increased risk of freeze damage in woody perennials *VIS-À-VIS* climate change: Importance of deacclimation and dormancy response. *Frontiers in Environmental Science*. 2016;4:44. DOI: 10.3389/fenvs.2016.00044
- Botirov A., Arakawa O. Root growth changes in the winter planting of young ‘Miyabi Fuji’ apple trees. *International Journal of Horticultural Science and Technology*. 2021;8(3):227-233. DOI: 10.22059/ijhst.2021.315746.428
- Călugăr A., Cordea M.I., Babeş A., Fejer M. Dynamics of starch reserves in some grapevine varieties (*Vitis vinifera* L.) during dormancy. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*. 2019;76(2):185-192. DOI: 10.15835/buasvmcnhort:2019.0008
- Dalhaus T., Schlenker W., Blanke M.M., Bravin E., Finger R. The effects of extreme weather on apple quality. *Scientific Reports*. 2020;10(1):7919. DOI: 10.1038/s41598-020-64806-7
- 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).
- Ermakov A.I. (ed.). Methods of biochemical research on plants (Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy). Leningrad: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Методы биохимического исследования растений / под ред. А.И. Ермакова. Ленинград: Агропромиздат; 1987).
- Fernandez E., Cuneo I.F., Luedeling E., Alvarado L., Farias D., Saa S. Starch and hexoses concentrations as physiological markers in dormancy progression of sweet cherry twigs. *Trees – Structure and Function*. 2019;33(4):1187-1201. DOI: 10.1007/s00468-019-01855-0
- Galasheva A.M., Krasova N.G. Water regime dynamics of apple varieties having different winter hardiness. *Contemporary Horticulture*. 2013;4(8):58-65. [in Russian] (Галашева А.М., Красова Н.Г. Водный режим сортов яблони различной зимостойкости. *Современное садоводство*. 2013;4(8):58-65).
- Kazlouskaya Z.A. Apple breeding in Belarus (Selektsiya yablони v Belarusi). Minsk: Belaruskaya Navuka; 2015. [in Russian] (Козловская З.А. Селекция яблони в Беларуси. Минск: Белорусская наука; 2015).
- Kiseleva G.K., Ilyina I.A., Petrov V.S., Zaporozhets N.M., Sokolova V.V., Vyalkov V.V. Use of the peroxidase enzyme to diagnose the resistance of grape varieties (*Vitis vinifera* L.) to low temperatures. *Horticulture and Viticulture*. 2022;4(4):27-33. [in Russian] (Киселева Г.К., Ильина И.А., Петров В.С., Запорожец Н.М., Соколова В.В., Вялков В.В. Использование фермента пероксидазы для диагностики устойчивости сортов винограда (*Vitis vinifera* L.) к низким температурам. *Садоводство и виноградарство*. 2022;4(4):27-33). DOI: 10.31676/0235-2591-2022-4-27-33
- Krasova N.G., Galasheva A.M., Golyshkina L.V., Yanchuk T.V. The effect of low temperatures on some physiological and biochemical parameters in apple-tree cultivars with different winter hardiness (Vliyaniye nizkikh temperatur na nekotorye fiziologo-biokhimicheskiye pokazateli sortov yablони razlichnoy zimostoykosti). *Bulletin of Agrarian Science*. 2012;3(36):86-90. [in Russian] (Красова Н.Г., Галашева А.М., Гольшикина Л.В., Янчук Т.В. Влияние низких температур на некоторые физиолого-биохимические показатели сортов яблони различной зимостойкости. *Вестник аграрной науки*. 2012;3(36):86-90).
- Krasova N.G., Galasheva A.M., Ozherelieva Z.E., Golyshkina L.V., Makarkina M.A. About resistance of apple genotypes to winter unfavorable conditions. *Agricultural Biology*. 2014;49(1):42-49. [in Russian] (Красова Н.Г., Галашева А.М., Ожерельева З.Е., Гольшикина Л.В., Макаркина М.А. Об устойчивости яблони к неблагоприятным условиям зимнего периода. *Сельскохозяйственная биология*. 2014;49(1):42-49).
- Krasova N.G., Ozherelieva Z.E., Galasheva A.M., Makarkina M.A., Lupin M.V. Assessment of adaptability and fruit quality in new apple cultivars for intensive orchards. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(4):48-59. [in Russian] (Красова Н.Г., Ожерельева З.Е., Галашева А.М., Макаркина М.А., Лупин М.В. Оценка адаптивности и качества плодов сортов яблони для интенсивных садов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(4):48-59). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-48-59
- Leyva A., Quintana A., Sánchez M., Rodríguez E.N., Cremata J., Sánchez J.C. Rapid and sensitive anthrone-sulfuric acid assay in microplate format to quantify carbohydrate in biopharmaceutical products: method development and validation. *Biologicals*. 2008;36(2):134-141. DOI: 10.1016/j.biologicals.2007.09.001

- Malagi G., Sacht M.R., Citadin I., Herter F.G., Bonhomme M., Regnard J.L. et al. The comparison of dormancy dynamics in apple trees grown under temperate and mild winter climates imposes a renewal of classical approaches. *Trees – Structure and Function*. 2015;29(5):1365-1380. DOI: 10.1007/s00468-015-1214-3
- Rachenko M.A., Rachenko A.M. The variation of the content of dehydrin proteins in the bark of *Malus* spp. trees differing in winter hardiness in Southern Cisbaikalia conditions. *Zemdirbyste–Agriculture*. 2020;107(2):185-190. DOI: 10.13080/z-a.2020.107.024
- Raza A., Razaq A., Mehmood S.S., Zou X., Zhang X., Lv Y. et al. Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*. 2019;8(2):34. DOI: 10.3390/plants8020034
- Schmitz J.D., Herter F.G., Regnard J.L., Leit G.B., Bonhomme M., Cochard H. et al. Is acrotonic budburst pattern in spring a typical behavior of the low-chilling apple cultivar 'Eva' in mild winter conditions? An approach combining ex planta single-node cutting test and in planta bud water content during dormancy. *Scientia Horticulturae*. 2015;188:84-88. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.03.024
- Sivaci A. Seasonal changes of total carbohydrate contents in three varieties of apple (*Malus sylvestris* Miller) stem cuttings. *Scientia Horticulturae*. 2006;109(3):234-237. DOI: 10.1016/j.scienta.2006.04.012
- Solovyeva M.A. Assessment of winter hardiness in fruit crops (Otsenka zimostoykosti plodovykh kultur). In: *Diagnostics of Plant Resistance to Stress (Guidelines) (Diagnostika ustoychivosti rasteniy k stressovym vozdeystviyam [metodicheskoye rukovodstvo])*. Leningrad; 1988. p.163-164. [in Russian] (Соловьева М.А. Оценка зимостойкости плодовых культур. В кн.: *Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям (методическое руководство)*. Ленинград; 1988. С.163-164).
- Ulyanovskaya E.V., Belenko E.A. Genetic resources of the genus *Malus* for the creation of modern adaptive apple varieties. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2021;72(6):1-17. [in Russian] (Ульяновская Е.В., Беленко Е.А. Генетические ресурсы рода *Malus* для создания современных адаптивных сортов яблони. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2021;72(6):1-17). DOI: 10.30679/2219-5335-2021-6-72-1-17
- Wang Y.X., Hu Y., Chen B.H., Zhu Y.F., Dawuda M.M., Sofkova S. Physiological mechanisms of resistance to cold stress associated with 10 elite apple rootstocks. *Journal of Integrative Agriculture*. 2018;17(4):857-866. DOI: 10.1016/S2095-3119(17)61760-X

Информация об авторах

Галина Константиновна Киселева, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, galina-kiseleva-1960@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7583-1261>

Елена Владимировна Ульяновская, доктор сельскохозяйственных наук, заведующая лабораторией, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ulyanovskaya_e@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3987-7363>

Татьяна Вячеславовна Схаляхо, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, tShalyho@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4822-1139>

Алла Витальевна Караваева, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, alla.karavaeva.65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6531-309X>

Information about the authors

Galina K. Kiseleva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, galina-kiseleva-1960@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7583-1261>

Elena V. Ulyanovskaya, Dr. Sci. (Agriculture), Head of a Laboratory, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, ulyanovskaya_e@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3987-7363>

Tatyana V. Skhalyakho, Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, tShalyho@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4822-1139>

Alla V. Karavaeva, Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, alla.karavaeva.65@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6531-309X>

Вклад авторов: Киселева Г.К. – 40%; Ульяновская Е.В. – 20%; Схаляхо Т.В. – 20%; Караваева А.В. – 20%.

Contribution of the authors: Kiseleva G.K. – 40%; Ulyanovskaya E.V. – 20%; Skhalyakho T.V. – 20%; Karavaeva A.V. – 20%.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 02.05.2023; одобрена после рецензирования 28.12.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 02.05.2023; approved after reviewing on 28.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 634.8:551.58
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-74-85



Метеорологические условия для вегетации перспективных сортов винограда в Черноморской агроэкологической зоне виноградарства

В. С. Петров¹, А. А. Марморштейн¹, М. И. Панкин¹, Д. М. Цику¹, М. Д. Ларькина²

¹ Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Краснодар, Россия

² Инновационная компания «Таманский биотехнологический центр», Темрюк, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Александровна Марморштейн, am342@yandex.ru

Актуальность. Характер и длительность вегетации растений винограда зависит как от их биологических особенностей, так и от условий среды обитания. Для оптимизации размещения сортов винограда актуальным является изучение метеорологических условий и их влияния на прохождение фаз вегетации сортов винограда разного происхождения.

Материалы и методы. Объектами исследований являются 8 интродуцированных и отечественных сортов винограда. Проводили наблюдения за фенологией по М. А. Лазаревскому, дисперсионный анализ по Б. А. Доспехову, определяли зависимость длины фаз вегетации от метеоусловий с помощью парной корреляции, статистическую значимость по t-критерию Стьюдента. Метеорологические данные взяты из ежедекадных агрометеорологических бюллетеней по Краснодарскому краю. Исследования выполнены в период с 2018 по 2021 г. в агроэкологических условиях Черноморской зоны виноградарства.

Результаты. По показателям обеспеченности теплом и длительности вегетации по классификации М. А. Лазаревского выделены сорта раннего срока созревания – ‘Подарок Дмитрия’, ‘Рилайнс’, ‘Бригантина’ и ‘Анапский Ранний’, среднего – ‘Конкорд’ и ‘Венус’, среднепозднего – ‘Прикубанский’ и позднего – ‘Кехо’. Для вегетации сортов раннего срока созревания потребность в сумме активных температур составляет 2522–2603°C, среднего – 2755–2760°C, среднепозднего – 2835°C и позднего – 2970°C. По международной классификации: ранние – ‘Подарок Дмитрия’, ‘Рилайнс’, ‘Бригантина’ и ‘Анапский Ранний’, среднеранние – ‘Конкорд’, ‘Венус’ и ‘Прикубанский’ и средние – ‘Кехо’. У всех сортов отмечается тесная прямая связь продолжительности вегетации с суммой температур выше +10°C.

Ключевые слова: интродуцированные сорта, отечественные сорта, фенология, зависимость от погодных условий, сроки созревания сортов

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (0498-2022-0004) «Разработка и реализация методологии управления биологическим, продукционным и адаптивным потенциалом ампелоценозов по критериям экологической, эдафической и пищевой безопасности, энергоресурсосбережения в условиях техногенной интенсификации производства и изменений климата».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы, за замечания и рекомендации, которые позволили существенно улучшить статью.

Для цитирования: Петров В.С., Марморштейн А.А., Панкин М.И., Цику Д.М., Ларькина М.Д. Метеорологические условия для вегетации перспективных сортов винограда в Черноморской агроэкологической зоне виноградарства. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):74-85. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-74-85

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-74-85

Meteorological conditions for growing promising grape cultivars in the Black Sea agroecological zone of viticulture

Valery S. Petrov¹, Anna A. Marmorshtein¹, Mikhail I. Pankin¹, Damir M. Tsiku¹, Marina D. Larkina²

¹North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Krasnodar, Russia

²Innovative Company "Taman Biotechnological Center", Temryuk, Russia

Corresponding author: Anna A. Marmorshtein, am342@yandex.ru

Background. The pattern and duration of the grape plant growing season depends both on biological characteristics of plants and the environmental conditions of their habitat. Studying meteorological conditions and their effect on the growing phases of grape cultivars of different origin is important to optimize the deployment of these cultivars.

Materials and methods. Eight introduced and domestic grape cultivars served as the research material. Phenological observations were carried out according to M. A. Lazarevsky, ANOVA was performed according to B. A. Dospikhov, the dependence of the duration of growing phases on weather conditions was assessed using pairwise correlations, and Student's *t*-test was applied to determine statistical significance. Meteorological data were taken from the agrometeorological bulletins for Krasnodar Territory. The studies were conducted in the period from 2018 to 2021 under the agroecological conditions of the Black Sea viticulture zone.

Results. Specific features of the temperature regime for grape growing phases in the environments of the Black Sea viticulture zone were ascertained. Indicators of heat supply and duration of the growing season according to Lazarevsky were used to identify the studied cultivars as early ('Podarok Dmitriya', 'Reliance', 'Brigantina' and 'Anapskiy Ranniy'), medium ('Concord' and 'Venus'), mid-late ('Prikubanskiy'), and late ('Kyoho') genotypes. The sum of active temperatures required for the growing season of early cultivars was 2522–2603°C, for medium ones 2755–2760°C, for mid-late ones 2835°C, and for late ones 2970°C. According to the international classification, 'Podarok Dmitriya', 'Reliance', 'Brigantina' and 'Anapskiy Ranniy' are early, 'Concord', 'Venus' and 'Prikubanskiy' are mid-early, and 'Kyoho' is medium-ripening. All cultivars had a close direct relationship between the duration of their growing phases and the sum of air temperatures above +10°C.

Keywords: introduced cultivars, domestic cultivars, phenology, dependence on weather conditions, ripening dates of cultivars

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 (0498-2022-0004) "Development and implementation of a methodology for managing the biological, productive and adaptive potential of ampelocenoses according to the criteria of environmental, edaphic and food safety, energy and resource efficiency under the conditions of technogenic intensification of production and climate change".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work and for their observations and recommendations which helped to significantly improve the article.

For citation: Petrov V.S., Marmorshtein A.A., Pankin M.I., Tsiku D.M., Larkina M.D. Meteorological conditions for growing promising grape cultivars in the Black Sea agroecological zone of viticulture. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):74-85. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-74-85

Введение

Характер и длительность прохождения фаз вегетации растениями винограда зависит как от их биологических особенностей (Maghradze et al., 2012; Modonkaeva, Polulyakh, 2014), так и от агроэкологических условий среды обитания (Burgos et al., 2010). Доминирующее влияние на фенологию винограда оказывает температура воздуха (Lazarevsky, 1961; Smirnov et al., 2017).

Фаза «начало сокодвижения» начинается при устойчивых положительных температурах. В равнинной зоне Дагестана начало сокодвижения отмечается в первую или вторую декаду марта (Ramazanov et al., 2021), в Одесской области – в первую декаду апреля (Lyashenko, Marinin, 2014), в колочной степи Алтайского Приобья при укрывной культуре виноградарства – во второй-третьей декадах апреля (Makarova, 2007).

Фаза «начало распускания почек» более изучена по сравнению с началом сокодвижения (Ferguson et al., 2014; Novikova, Naumova, 2016; Di Lena et al., 2019; Vijaya et al., 2019). По результатам наблюдений созданы математические модели на основе агроэкологических факторов, влияющих на фенологию растений винограда (García de Cortázar-Atauri et al., 2014; Novikova, Naumova, 2019; Leonini et al., 2020). Для начала распускания почек необходима сумма активных температур (+10°C и выше) не менее 145°C. Обычно это наблюдается во второй половине апреля – начале мая (Smirnov et al., 2017). Согласно многолетним наблюдениям, дата распускания почек в Ростовской области связана с датой перехода температуры воздуха через +10...+11°C (Novikova, Naumova, 2016b, 2019).

Фаза «цветение» связана с температурами воздуха выше +14...+15°C (Novikova, Naumova, 2019) и с датой перехода через +20°C (Novikova, Naumova, 2016a). Оптимальная температура в фазу «цветение» составляет +25...+30°C. Дата начала цветения отмечается в конце мая – начале июня (Smirnov et al., 2017).

Фаза «начало созревания» и дата физиологической зрелости ягод винограда, или дата сбора урожая в иностранной литературе (Jones, 2013), зависит от температур и биологических особенностей сортов (Smirnov et al., 2017). Сама фаза длится от двадцати дней до двух месяцев в зависимости от биологических особенностей сорта и метеоусловий (Smirnov et al., 2017), ускоряясь температурами воздуха выше +20°C для ранних и выше +25°C для поздних сортов винограда (Novikova, Naumova, 2016a).

Цель нашего исследования – изучение метеорологических условий и их влияния на прохождение фаз вегетации интродуцированных сортов и отечественных сортов местной селекции, созданных в агроэкологических условиях Черноморской зоны виноградарства Краснодарского края.

Фенологические характеристики интродуцированных сортов ранее изучались в других странах: например, 'Конкорд' ('Concord') в США (Wolfe et al., 2005; Gutierrez et al., 2021), Бразилии (Anzanello et al., 2012); 'Рилайнс' ('Reliance') и 'Венус' ('Venus') в Бразилии (Camargo et al., 2014); 'Кехо' ('Kyoho') в Бразилии (Da Silva et al., 2008), Корее (Son et al., 1989), Китае (Kamiloğlu et al., 2011) и Японии (Iwasaki et al., 2022) и практически не изучались в агроэкологических условиях юга России, за исключением Ростовской области (Krasokhina, Ganich, 2005; Naumova, Novikova, 2015a, 2015b).

Материалы и методы

Место проведения исследований – виноградники ООО «Инновационная компания «Таманский биологический центр» Темрюкского района Краснодарского края (45°16' с. ш. и 37°21' в. д.), расположенные в Черноморской агроэкологической зоне виноградарства (подзоне № 1) (Petrov et al., 2020). Объектами исследований являлись сорта винограда различного происхождения: интродуцированные – 'Конкорд', 'Рилайнс', 'Венус' и 'Кехо', местные (отечественной селекции) – 'Подарок Дмитрия', 'Анапский Ранний', 'Бригантина' и 'Прикубанский'.

- 'Конкорд' (Катавба × *Vitis labrusca*, северо-восток США) – столово-винный сорт винограда с высокой устойчивостью к болезням и морозу, среднего или среднепозднего периода созревания. Включен в Госреестр селекционных достижений, допущенных к использованию в промышленном производстве в 2019 году (State Register..., 2022);

- 'Рилайнс' (Онтарио × Саффолк Ред, Университет штата Арканзас, США) – бессемянный сорт винограда очень раннего (сверхраннего) срока созревания, морозоустойчивый. Включен в Госреестр в 2019 году (State Register..., 2022);

- 'Венус' (Альден × NY 46000, Арканзас, США) – ранний бессемянный сорт винограда, морозоустойчивый. Не включен в Госреестр (Potapenko, Ganich, 2015);

- 'Кехо' (Сентенниал (4N) × Ивахара быстрорастущий (4N), Институт агрономических и биологических наук Ойноуэ, Япония) – ранний столовый сорт винограда, не включен в Госреестр (Potapenko, Ganich, 2015);

- 'Подарок Дмитрия' (Подарок Запорожью × Рилайнс Пинк Сидлис, ООО «ИК «Таманский биотехнологический центр») – универсальный сорт винограда раннего срока созревания. Включен в Госреестр в 2019 году (State Register..., 2022);

- 'Анапский Ранний' (Серексия черная × Ркацители, АЗОСВиВ, Анапа, Россия) – столовый сорт винограда раннего срока созревания. Обладает повышенной устойчивостью к филлоксеру, средней устойчивостью к милдью, оидиуму и серой гнили. Морозостойкий. Включен в Госреестр в 2009 году (State Register..., 2022);

- 'Бригантина' (Молдова × Кардинал, АЗОСВиВ, Анапа, Россия) – столовый сорт винограда сверхраннего или раннего срока созревания. Отличается устойчивостью к грибным заболеваниям и морозу. Включен в Госреестр в 2009 году (State Register..., 2022);

- 'Прикубанский' (Криулянский × Кардинал, АЗОСВиВ, Россия) – столовый сорт винограда, позднего срока созревания. Устойчив к милдью, оидиуму и серой гнили. Повышенная устойчивость к морозу. Включен в Госреестр в 2009 году (State Register..., 2022);

Год посадки растений винограда – 2010, схема посадки – 3,0 × 2,0 м, формировка кустов штамбовая, односторонний спиралевидный кордон АЗОС, высота штамба – 1 метр. Среднегодовая температура воздуха на участке исследований равна +12,2°C (климатическая норма рассчитана за период 1991–2020 гг.). Абсолютный максимум и минимум температур воздуха за этот же период составили +38°C и –24°C соответственно. Средняя годовая сумма атмосферных осадков равна 540 мм. Почвы на участке исследований представлены черноземами южными (Petrov et al., 2020).

Наблюдения за фенологическим развитием растений в период их вегетации проводили по методике М. А. Лазаревского (Lazarevsky, 1963), дисперсионный анализ по-

лученных данных – по Б. А. Доспехову (Dospikhov, 2011). Метеорологические данные взяты из ежедекадных агрометеорологических бюллетеней по Краснодарскому краю Краснодарского краевого центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Зависимость длины фаз вегетации от метеоусловий изучали с помощью парной корреляции, статистическую значимость определяли по t-критерию Стьюдента (Bavrina, Vorisov, 2021).

Результаты

Дата начала распускания почек у изучаемых сортов винограда в среднем за 2018–2021 гг. приходилась на вторую декаду апреля (табл. 1). Самое раннее распускание почек было у сорта 'Рилайнс' (10 апреля), самое позднее – у 'Кехо' (18 апреля), разница в дате начала распускания почек существенна по НСР₀₅. Дата начала цветения варьировала сильнее – от 28 мая у сорта 'Анапский Ранний' до 12 июня у сорта 'Прикубанский'. Вследствие этого продолжительность межфазного периода «распускание почек – цветение» отличалась на 14 дней: самая короткая была у сорта 'Анапский Ранний' (43 дня), длинная – у сортов 'Рилайнс' и 'Прикубанский' (по 57 дней у каждого).

Средняя температура воздуха в течение межфазного периода «распускание почек – цветение» варьировала в 2018–2021 гг. от +15,5°C у сорта 'Анапский Ранний' до +16,5°C у сорта 'Прикубанский'. Абсолютный максимум за четыре года наблюдений в зависимости от сорта менялся от +28,6°C ('Конкорд', 'Подарок Дмитрия') до +33,4°C ('Прикубанский'). Абсолютный минимум температуры воздуха в межфазный период «распускание почек – цветение» был +1,1...+3,6°C. Средняя амплитуда температуры воздуха слабо отличалась у сортов – от 8,3°C у сорта 'Подарок Дмитрия' до 8,6°C у сорта 'Прикубанский'. Сумма температур воздуха выше +10°C различалась более чем на 250–690°C у сорта 'Анапский Ранний' и 953°C – у сорта 'Прикубанский'. Сумма атмосферных осадков за межфазный период «распускание почек – цветение» варьировала от 41 мм ('Бригантина') до 55,4 мм ('Рилайнс').

Отличия в значениях температурных показателей для каждого сорта объясняются датами начала и конца каждой фазы, а также ее продолжительностью.

Дата начала созревания ягод (2018–2021 гг.) по сортам отличается на 15 дней (табл. 2). Раньше всех ягоды начинают созревать у сорта 'Анапский Ранний' (15 июля), позже – 'Кехо' (30 июля). Самый короткий межфазный период «цветение – начало созревания» наблюдали у сорта

Таблица 1. Метеорологические условия межфазного периода «распускание почек – цветение» исследуемых сортов винограда (среднее за 2018–2021 гг., Краснодарский край)

Table 1. Meteorological conditions during the interphase period from budbreak to flowering of the studied grape cultivars (average for 2018–2021, Krasnodar Territory)

Сорт / Cultivar	Дата начала распускания почек / Date of the onset of budbreak	Дата начала цветения / Date of the onset of flowering	Продолжительность, дней / Duration of the period, days	Средняя температура воздуха, °C / Mean air temperature, °C	Максимальная температура воздуха, °C / Maximum air temperature, °C	Минимальная температура воздуха, °C / Minimum air temperature, °C	Средняя амплитуда температуры воздуха, °C / Mean range of air temperatures, °C	Сумма температур воздуха выше +10°C, °C / Sum of air temperatures above +10°C, °C	Сумма атмосферных осадков, мм / Total precipitation, mm
'Кехо'	18.04	07.06	50	16,4	32,2	3,6	8,5	818	44,2
'Конкорд'	17.04	04.06	49	16,1	28,6	3,6	8,4	801	43,9
'Рилайнс'	10.04	06.06	57	15,7	29,8	2,3	8,5	905	55,4
'Венус'	13.04	08.06	56	16,2	30,4	1,1	8,4	918	52,2
'Подарок Дмитрия'	15.04	06.06	52	16	28,6	1,1	8,3	844	51,9
'Бригантина'	15.04	29.05	44	15,6	29,8	2,6	8,5	693	41
'Прикубанский'	16.04	12.06	57	16,5	33,4	3,6	8,6	953	51,7
'Анапский Ранний'	15.04	28.05	43	15,5	29,8	1,1	8,5	690	41,1
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	1,3	1,9	2,0						

Таблица 2. Метеорологические условия межфазного периода «цветение – начало созревания ягод» исследуемых сортов (среднее за 2018–2021 гг., Краснодарский край)**Table 2. Meteorological conditions during the interphase period from flowering to veraison of the studied grape cultivars (average for 2018–2021, Krasnodar Territory)**

Сорт / Cultivar	Дата начала цветения / Date of the onset of flowering	Дата начала созревания / Date of the onset of veraison	Продолжительность, дней / Duration of the period, days	Средняя температура воздуха, °С / Mean air temperature, °C	Максимальная температура воздуха, °С / Maximum air temperature, °C	Минимальная температура воздуха, °С / Minimum air temperature, °C	Средняя амплитуда температуры воздуха, °С / Mean range of air temperatures, °C	Сумма температур воздуха выше +10°С, °С / Sum of air temperatures above +10°С, °C	Сумма атмосферных осадков, мм / Total precipitation, mm
‘Кехо’	07.06	30.07	53	24,7	36	14	8,7	1300	87,9
‘Конкорд’	04.06	21.07	46	24,6	36	11,5	8,9	1140	70,9
‘Рилайнс’	06.06	18.07	43	24,5	36	11,5	8,9	1035	67,1
‘Венус’	08.06	17.07	39	24,7	36	11,5	8,8	957	68,1
‘Подарок Дмитрия’	06.06	17.07	41	24,5	36	11,5	8,9	1010	62,2
‘Бригантина’	29.05	21.07	53	23,6	36	11,5	8,6	1243	83,5
‘Прикубанский’	12.06	26.07	44	24,6	36	14,1	8,4	1073	85,3
‘Анапский Ранний’	28.05	15.07	48	23,4	36	11,5	8,7	1111	79,6
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	1,9	1,9	1,9						

‘Венус’ (39 дней), длинный – у сортов ‘Кехо’ и ‘Прикубанский’ (по 53 дня).

Самая низкая средняя температура воздуха в данный период отмечена у сорта ‘Анапский Ранний’ (+23,4°С), а самая высокая – у сортов ‘Кехо’ и ‘Венус’ (+24,7°С). Абсолютный максимум периода «цветение – начало созревания» за 4 года для всех сортов составляет +36°С, минимум – от +11,5°С до +14,1°С. Наименьшая средняя амплитуда температуры воздуха составляет 8,4°С у сорта ‘Прикубанский’, наибольшая – 8,9°С у сортов ‘Конкорд’, ‘Рилайнс’ и ‘Подарок Дмитрия’. Средние суммы температур воздуха выше +10°С различаются еще больше, чем в предыдущий межфазный период – почти на 350°С, так как ярче проявляются сортовые особенности по скорости созревания. У сорта ‘Венус’ с самой короткой продолжительностью межфазного периода «цветение – начало созревания» сумма температур составляет 957°С. Это единственный изучаемый сорт, у которого данный показатель меньше 1000°С. У сорта ‘Кехо’ с самым продолжительным периодом средняя сумма температур воздуха составляет 1300°С. У другого сорта, ‘Бригантины’, с такой же продолжительностью периода «цветение – начало созревания» сумма температур меньше на 57°С (1243°С), что обусловлено более ранним цветением. Сумма атмосферных осадков варьирует сильнее, чем в предыдущий

межфазный период – от 62,2 мм у сорта ‘Подарок Дмитрия’ до 87,9 мм у сорта ‘Кехо’.

Средняя дата наступления фазы «физиологическая зрелость ягод» (ФЗ) за 2018–2021 гг. у изучаемых сортов отличалась на 24 дня, отражая сортовые особенности по срокам созревания ягод (табл. 3). ‘Рилайнс’ созревает раньше всех (11 августа), ‘Кехо’ – позже (4 сентября). Средняя продолжительность межфазного периода «начало созревания – физиологическая зрелость ягод» варьирует от 24 дней (‘Рилайнс’) до 36 дней (‘Венус’ и ‘Кехо’). Средняя температура воздуха за этот период меньше у ‘Кехо’ и равняется +23,9°С, что обусловлено датой ФЗ – температура в сентябре ниже, что отражается на средних значениях. Самая высокая температура за период у сорта ‘Рилайнс’, поскольку она выпадает на один из самых теплых периодов года (III декада июля – I декада августа); абсолютный максимум – либо +34,5°С, либо +35,2°С, минимум – от 10,7°С (‘Кехо’) до 16,4°С (‘Рилайнс’). Средние амплитуды температуры воздуха за межфазный период «начало созревания – ФЗ» отличаются больше, чем в предыдущие, на 1,0°С. Данный показатель наименьший у сорта ‘Рилайнс’ (8,3°С), что обусловлено малой разницей максимальных и минимальных температур воздуха, которая характерна для данного периода летом. Средняя амплитуда температуры воздуха, равная

Таблица 3. Метеорологические условия межфазного периода «начало созревания – физиологическая зрелость ягод» исследуемых сортов винограда (среднее за 2018–2021 гг., Краснодарский край)**Table 3. Meteorological conditions during the interphase period from veraison to harvesting of the studied grape cultivars (average for 2018–2021, Krasnodar Territory)**

Сорт / Cultivar	Дата начала созревания / Date of the onset of veraison	Дата физиологической зрелости / Date of harvesting	Продолжительность, дней / Duration of the period, days	Средняя температура воздуха, °С / Mean air temperature, °C	Максимальная температура воздуха, °С / Maximum air temperature, °C	Минимальная температура воздуха, °С / Minimum air temperature, °C	Средняя амплитуда температуры воздуха, °С / Mean range of air temperatures, °C	Сумма температур воздуха выше +10°С, °С / Sum of air temperatures above +10°C, °C	Сумма атмосферных осадков*, мм / Total precipitation*, mm
‘Кехо’	30.07	4.08	36	23,9	34,5	10,7	9,1	852	10,3
‘Конкорд’	21.07	23.08	34	24,6	34,5	13,6	8,8	814	29,7
‘Рилайнс’	18.07	11.08	24	25,1	35,2	16,4	8,3	589	27,9
‘Венус’	17.07	22.08	36	24,6	34,5	13,6	8,7	885	30,8
‘Подарок Дмитрия’	17.07	15.08	29	24,8	35,2	15,5	8,5	710	38,7
‘Бригантина’	21.07	16.08	27	24,7	34,5	15,5	8,6	667	24,7
‘Прикубанский’	26.07	27.08	33	24,7	34,5	13,6	9,3	809	8,1
‘Анапский Ранний’	15.07	13.08	29	24,8	35,2	15,5	8,4	721	27,6
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	1,9	2,4	1,8						

Примечание: * – среднее за 2018–2020 гг.

Note: * – average for 2018–2020

9,3°С, отмечается у сорта ‘Прикубанский’. Средняя сумма температур воздуха за период отличается у сортов почти на 300°С – 596°С у сорта ‘Рилайнс’ и 885°С у сорта ‘Венус’.

Средняя сумма атмосферных осадков за период «начало созревания – ФЗ» рассчитана за 2018–2020 гг. из-за аномальных осадков в августе 2021 г., нехарактерных для данной местности. Наименьшее количество осадков выявлено у сорта ‘Прикубанский’ (8,1 мм), наибольшее – у сорта ‘Подарок Дмитрия’ (38,7 мм).

Продолжительность периода вегетации, или периода «распускание почек – физиологическая зрелость ягод» (табл. 4), варьирует от 120 (‘Анапский Ранний’) до 139 дней (‘Кехо’). Наименьшая средняя температура воздуха за период вегетации – у сорта ‘Рилайнс’ (+20,5°С) за счет более раннего распускания почек, наибольшая – у сорта ‘Кехо’ (139 дней); абсолютный максимум за четыре года наблюдений такой же, как в период «цветение – начало созревания ягод», а минимум – как в период «распускание почек – цветение». Средняя амплитуда температур воздуха за вегетацию – в пределах 8,5...8,7°С. Сумма температур воздуха выше +10°С за период вегетации отличается почти на 450°С. Наименьшие значения отмечены у сортов ‘Анапский Ранний’ и ‘Рилайнс’ (2522–2529°С), наибольшее – у сорта ‘Кехо’ (2970°С).

Сумма атмосферных осадков за вегетацию отличается чуть больше чем на 10 мм – 142,4 мм у сорта ‘Кехо’, 152,8 мм у сорта ‘Прикубанский’

Согласно полученным ранее результатам (Marmorshtein et al., 2022a, 2022b) и данным нашего исследования, восемь сортов по классификации М. А. Лазаревского (Lazarevsky, 1963) следует разделить по срокам созревания на четыре группы:

- сорта раннего периода созревания (I группа): ‘Рилайнс’ (продолжительность период вегетации – 123 дня, средняя сумма температур воздуха выше +10°С за период – 2529°С), ‘Подарок Дмитрия’ (122 дня и 2564°С), ‘Бригантина’ (123 дня, 2603°С) и ‘Анапский Ранний’ (120 дней и 2522°С);

- сорта среднего периода созревания (II группа): ‘Конкорд’ (продолжительность периода вегетации – 128 дней, средняя сумма температур воздуха выше +10°С за период – 2755°С) и ‘Венус’ (131 день и 2760°С);

- сорт среднепозднего периода созревания (III группа): ‘Прикубанский’ (продолжительность периода вегетации – 133 дня, средняя сумма температур воздуха выше +10°С за период – 2835°С);

- сорта позднего периода созревания (IV группа): ‘Кехо’ (продолжительность периода вегетации – 139 дней, средняя сумма температур воздуха выше +10°С за период – 2970°С).

Однако согласно международной классификации (Code des caractères..., 1983) изучаемые сорта следует разделить на ранние (116–125 дней) – ‘Подарок Дмитрия’, ‘Рилайнс’, ‘Бригантина’, ‘Анапский Ранний’; средне-

Таблица 4. Метеорологические условия периода вегетации сортов винограда
(среднее за 2018–2021 гг., Краснодарский край)

Table 4. Meteorological conditions during the growing season of the studied grape cultivars
(average for 2018–2021, Krasnodar Territory)

Сорт / Cultivar	Дата начала распускания почек / Date of the onset of budbreak	Дата физиологической зрелости / Date of harvesting	Продолжительность, дней / Duration of the period, days	Средняя температура воздуха, °С / Mean air temperature, °С	Максимальная температура воздуха, °С / Maximum air temperature, °С	Минимальная температура воздуха, °С / Minimum air temperature, °С	Средняя амплитуда температуры воздуха, °С / Mean range of air temperatures, °С	Сумма температур воздуха выше +10°С, °С / Sum of air temperatures above +10°С, °С	Сумма атмосферных осадков, мм / Total precipitation, mm
‘Кехо’	18.04	04.09	139	21,4	36	3,6	8,7	2970	142,4
‘Конкорд’	17.04	23.08	128	21,3	36	3,6	8,6	2755	144,5
‘Рилайнс’	10.04	11.08	123	20,5	36	2,3	8,6	2529	150,4
‘Венус’	13.04	22.08	131	21	34,7	3,7	8,6	2760	151,1
‘Подарок Дмитрия’	15.04	15.08	122	21	36	1,1	8,6	2564	152,8
‘Бригантина’	15.04	16.08	123	21	36	2,6	8,6	2603	149,2
‘Прикубанский’	16.04	27.08	133	21,2	36	3,6	8,7	2835	145,1
‘Анапский Ранний’	15.04	13.08	120	20,9	36	1,1	8,5	2522	148,3
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	1,3	2,4	2,1						

ранние (126–135 дней) – ‘Конкорд’, ‘Венус’ и ‘Прикубанский’; средние (136–145 дней) – ‘Кехо’.

Для выявления закономерностей влияния погодных условий на продолжительность вегетации сорта по международной классификации были разделены на две контрастные группы по срокам созревания. I. Ранние: ‘Подарок Дмитрия’, ‘Рилайнс’, ‘Бригантина’ и ‘Анапский Ранний’; II. Среднеранние и средние: ‘Конкорд’, ‘Венус’, ‘Кехо’ и ‘Прикубанский’ (табл. 5). Определены коэффициенты парной корреляции, значимые выделены (*).

Продолжительность межфазного периода «распускание почек – цветение» у сортов обеих групп имеет тесную прямую связь с суммой температур воздуха выше +10°С, у сортов группы II – среднюю прямую связь со средней температурой воздуха. Продолжительность межфазного периода «цветение – начало созревания ягод» так же тесно связана с суммой температур выше +10°С, и так же имеет место средняя обратная зависимость от средней температуры у сортов II группы. Продолжительность межфазного периода «начало созревания»

Таблица 5. Корреляционная зависимость прохождения фаз вегетации от метеорологических условий по группам сортов

Table 5. Correlational dependence of the growing season phases on meteorological conditions for the groups of cultivars

Метеорологический показатель / Meteorological indicator	Группа I / Group I	Группа II / Group II
«Распускание почек – цветение» / Budbreak to flowering		
Средняя температура воздуха, °С	0,25	0,55*
Максимальная температура воздуха, °С	0,08	0,16
Минимальная температура воздуха, °С	–0,01	0,27
Средняя амплитуда температуры воздуха, °С	–0,04	0,23
Сумма температур воздуха выше +10°С, °С	0,93*	0,90*
Сумма атмосферных осадков, мм	0,19	–0,19

Таблица 5. Окончание
Table 5. The end

Метеорологический показатель / Meteorological indicator	Группа I / Group I	Группа II / Group II
«Цветение – начало созревания ягод» / Flowering to veraison		
Средняя температура воздуха, °С	0,02	-0,63*
Максимальная температура воздуха, °С	-0,07	-0,03
Минимальная температура воздуха, °С	0,18	-0,15
Средняя амплитуда температуры воздуха, °С	-0,27	-0,29
Сумма температур воздуха выше +10°С, °С	0,99*	0,99*
Сумма атмосферных осадков, мм	0,06	-0,17
«Начало созревания – физиологическая зрелость ягод» / Veraison to harvesting		
Средняя температура воздуха, °С	-0,76*	-0,35
Максимальная температура воздуха, °С	0,61*	0,54*
Минимальная температура воздуха, °С	-0,75*	-0,55*
Средняя амплитуда температуры воздуха, °С	-0,02	0,11
Сумма температур воздуха выше +10°С, °С	0,99*	0,99*
Сумма атмосферных осадков, мм	0,33	0,60*
«Распускание почек – физиологическая зрелость ягод» / Budbreak to harvesting		
Средняя температура воздуха, °С	-0,16	0,25
Максимальная температура воздуха, °С	0,33	0,19
Минимальная температура воздуха, °С	0,09	0,45
Средняя амплитуда температуры воздуха, °С	-0,18	-0,65*
Сумма температур воздуха выше +10 °С, °С	0,94*	0,89*
Сумма атмосферных осадков, мм	0,60*	0,67*

Примечание: * – значимые коэффициенты парной корреляции по t-критерию Стьюдента ($\alpha = 0,05$)

Note: – significant pairwise correlation coefficients according to Student's *t*-test ($\alpha = 0.05$)

ния – физиологическая зрелость ягод» находится в большей зависимости от погодных условий, в отличие от продолжительности межфазных периодов «распускание почек – цветение» и «цветение – начало созревания ягод». У сортов I группы наблюдается средняя прямая связь межфазного периода «начало созревания – физиологическая зрелость ягод» с максимальной температурой, тесная прямая связь – с суммой температур выше +10°С и тесная обратная – со средней и минимальной температурами воздуха. У сортов II группы продолжительность межфазного периода «начало созревания – физиологическая зрелость ягод» находится в средней зависимости от максимальной температуры воздуха и суммы атмосферных осадков, средней обратной от минимальной температуры воздуха и тесной прямой от суммы температур воздуха выше +10°С.

Длина периода «распускание почек – физиологическая зрелость ягод» у обеих групп сортов находится в средней прямой зависимости от суммы атмосферных осадков и тесной прямой от суммы температур воздуха выше +10°С. Продолжительность периода «распускание

почек – физиологическая зрелость ягод» сортов II группы находится в средней обратной зависимости от амплитуды температуры воздуха.

Обсуждение результатов

В Черноморской агроэкологической зоне виноградарства (подзоне № 1), по сравнению с данными, описанными ранее в разделе «Материалы и методы», позже созревают сорта 'Рилайн', 'Венус' и 'Кехо', в то время как сорт 'Прикубанский' созревает раньше.

В Темрюкском районе Краснодарского края средняя продолжительность вегетации сорта 'Конкорд' – 128 дней, что существенно отличается от данного показателя в Северной и Южной Америке. Продолжительности вегетационного периода сорта 'Конкорд' в юго-восточной Бразилии – 157 и 153–169 дней соответственно, в США в штате Нью-Йорк – 142–162 дня, в штате Вашингтон – 169 дней (Anzanello et al., 2012). Следует отметить, что R. Anzanello, P. V. D. de Souza и P. F. Coelho считают вегетационный период от набухания почек до сбора урожая, используя более мелкое дробление феноло-

гии на фазы. На юге Бразилии продолжительность периода от распускания почек до сбора урожая – 136–142 дня, температура периода вегетации в среднем ниже, хотя и начинается она в зимний для южного полушария месяц август, а количество осадков больше.

Сорт 'Кехо' на юго-западе Бразилии созревает за 91–135 дней в зависимости от агротехники. Климат на юго-западе Бразилии более жаркий и влажный, чем в Темрюкском районе Краснодарского края, поэтому вегетация в Бразилии короче (Da Silva et al., 2008). В Японии у сорта 'Кехо' средняя продолжительность периода «распускание почек – цветение» составляет 42–53 дня при различных агротехнических приемах (Iwasaki et al., 2022), что согласуется с данными, полученными в черноморских агроэкологических условиях.

Гбридам *Vitis*, согласно исследованиям в штате Нью-Йорк, США (Gutierrez et al., 2021), необходимо приблизительно 400 градусо-дней к цветению (аналог суммы температур воздуха выше +10°C в иностранных исследованиях) и 1200 градусо-дней к началу созревания, что меньше полученных нами значений из-за различий в климате.

По данным С. И. Краснохиной и В. А. Ганич (Krasokhina, Ganich, 2005), средняя продолжительность вегетации сорта 'Рилайнс' составляет 116 дней в Ростовской области, что на 7 дней короче, чем по результатам наших наблюдений, а сорт 'Венус' созревает за 123 дня, то есть на 8 дней быстрее. Продолжительность вегетации в более благоприятных погодных условиях увеличивается: Краснодарский край характеризуется более высокой влажностью воздуха и длительным периодом с температурами выше +10°C.

В Ростовской области сорт 'Венус' относится к очень ранним сортам, сумма температур воздуха выше +10°C за вегетационный период в среднем меньше 2400°C, в то время как в Черноморской агроэкологической зоне за период от начала распускания почек до физиологической зрелости ягод сумма температур составляет 2760°C (Naumova, Novikova, 2015b). У сорта 'Венус' также отмечается тесная обратная связь продолжительности периода от начала цветения до начала созревания со средней температурой воздуха фазы $r = -0,90$ (Naumova, Novikova, 2015a), в то время как у II группы сортов, куда входит и 'Венус', по результатам нашего анализа, $r = -0,63$, то есть связь средняя обратная.

В условиях Черноморской агроэкологической зоны виноградарства (подзона № 2) продолжительность периода «распускание почек – физиологическая зрелость ягод» сорта 'Прикубанский' составила 131 день (Petrov et al., 2015) – на два дня меньше, чем в условиях подзоны № 1. У сорта 'Прикубанский' ярко выражена обратная зависимость от средней температуры периода «распускание почек – физиологическая зрелость ягод» в подзоне № 2 (Petrov et al., 2015), однако наши результаты по зависимости продолжительности периода «распускание почек – физиологическая зрелость ягод» от суммы температуры воздуха для II группы сортов согласуются с ранее полученным (Petrov et al., 2015) коэффициентом корреляции сорта 'Прикубанский' ($r = 0,88$).

Заключение

В результате проведенной работы изучено прохождение вегетации интродуцированных сортов 'Кехо', 'Конкорд', 'Рилайнс', 'Венус' и сортов отечественной селекции 'Подарок Дмитрия', 'Анапский Ранний', 'Бриган-

тина' и 'Прикубанский' в условиях Темрюкского района Краснодарского края (Черноморская агроэкологическая зона виноградарства, подзона № 1). По классификации М. А. Лазаревского, сорта подразделяются на группы раннего (I группа: 'Подарок Дмитрия', 'Рилайнс', 'Бригантина', 'Анапский Ранний'), среднего (II группа: 'Конкорд', 'Венус'), среднепозднего (III группа: 'Прикубанский') и позднего (IV группа: 'Кехо') сроков созревания. По международной классификации – на ранние ('Подарок Дмитрия', 'Рилайнс', 'Бригантина', 'Анапский Ранний'), средне-ранние ('Конкорд', 'Венус', 'Прикубанский') и средние ('Кехо').

Потребность в сумме активных температур выше +10°C для вегетации сортов раннего срока созревания составляет 2522–2603°C, среднего – 2755–2760°C, среднепозднего – 2835°C и позднего – 2970°C. У всех сортов отмечается тесная прямая связь продолжительности вегетации с суммой температур воздуха выше +10°C.

У сортов I группы отмечается тесная обратная связь длины межфазного периода «начало созревания – физиологическая зрелость ягод» со средней и минимальной температурой воздуха, средняя прямая – с максимальной температурой воздуха. Продолжительность периода «распускание почек – физиологическая зрелость ягод» находится в средней прямой зависимости от суммы атмосферных осадков.

У сортов II группы продолжительность межфазного периода «распускание почек – цветение» находится в средней прямой зависимости от средней температуры воздуха, периода «цветение – начало созревания» – в средней обратной зависимости от средней температуры воздуха, периода «начало созревания – физиологическая зрелость ягод» – в средней прямой зависимости от максимальной температуры и суммы атмосферных осадков, а продолжительность периода «распускание почек – физиологическая зрелость ягод» – в средней прямой зависимости от суммы атмосферных осадков и средней обратной зависимости от амплитуды температуры воздуха.

References / Литература

- Anzanello R., de Souza P.V.D., Coelho P.F. Thermal requirement, phenology and productivity of Niagara Branca, Niagara Rosada and Concord cultivars submitted to two harvests by vegetative cycle. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 2012;34(2):366-376. [in Portuguese] DOI: 10.1590/S0100-29452012000200008
- Bavrina A.P., Borisov I.B. Modern rules of the application of correlation analysis. *Medical Almanac*. 2021;3(68):70-79. [in Russian] [Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа. *Медицинский альманах*. 2021;3(68):70-79].
- Burgos S., Almendros S., Fortier E. Facteurs environnementaux et phénologie de la vigne dans le canton de Genève. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture*. 2010;42(5):288-295. [in French]
- Camargo U.A., Maia J.D.G., Machado C.A.E., Ritschel P. Brazilian grape germplasm bank: phenology and incidence of main fungal diseases. *Acta Horticulturae*. 2014;1046:599-602. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1046.82
- Code des caractères descriptifs des variétés et espèces de *Vitis*. Paris: OIV; 1983. [in French]
- Da Silva F.C.C., Viana A.P., da Silva M.G.O., de Oliveira J.G., Filho A.G. Chemical characterization and phenological determination of grapes cultivated in the North area of

- Rio de Janeiro state. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 2008;30(1):38-42. [in Portuguese] DOI: 10.1590/S0100-29452008000100009
- Di Lena B., Silvestroni O., Lanari V., Palliotti A. Climate change effects on cv. Montepulciano in some wine-growing areas of the Abruzzi region (Italy). *Theoretical and Applied Climatology*. 2019;136(1-2):1145-1155. DOI: 10.1007/s00704-018-2545-y
- Dospikhov B.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). 6th ed. Moscow: Alyans; 2011. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. 6-е изд. Москва: Альянс; 2011).
- Ferguson J.C., Moyer M.M., Mills L.J., Hoogenboom G., Keller M. Modeling dormant bud cold hardiness and budbreak in twenty-three *Vitis* genotypes reveals variation by region if origin. *American Journal of Enology and Viticulture*. 2014;65(1):59-71. DOI: 10.5344/ajev.2013.13098
- García de Cortázar-Atauri I., Brisson N., Gaudillere J.P. Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.). *International Journal of Biometeorology*. 2009;53(4):317-326. DOI: 10.1007/s00484-009-0217-4
- Gutierrez B., Schwaninger H., Meakem V., Londo J., Zhong G.Y. Phenological diversity in wild and hybrid grapes (*Vitis*) from the USDA-ARS cold-hardy grape collection. *Scientific Reports*. 2021;11(1):24292. DOI: 10.1038/s41598-021-03783-x
- Iwasaki C., Sugiura H., Kikui G., Koyano H. Nonlinear multivariate prediction model of 'Kyoho' grape full bloom dates in Japan. *The Horticulture Journal*. 2022;91(2):195-208. DOI: 10.2503/hortj.UTD-349
- Jones G.V. Winegrape phenology. In: M. Schwartz (ed.). *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Dordrecht: Springer; 2013. p.563-584. DOI: 10.1007/978-94-007-6925-0_30
- Kamiloglu Ö., Polat A.A., Durgaç C. Comparison of open field and protected cultivation of five early table grape cultivars under Mediterranean conditions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2011;35:491-499. DOI: 10.3906/tar-1002-718
- Krasokhina S.I., Ganich V.A. New grape cultivars of *Vitis labrusca* L. and prospects of their cultivation (Novye sorta vinograda vida *Vitis labrusca* L. i perspektivnost ikh vozde lyvaniya). In: *Status and Prospects of Fruit Breeding and Variety Cultivation: Proceedings of the International Scientific and Methodological Conference Dedicated to the 160th Anniversary of VNIISPК; Orel; July 12–15, 2005 (Sostoyaniye i perspektivy selektsii i sortorazvedeniya plodovykh kultur: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 160-letiyu VNIISPК; Orel; 12–15 iyulya 2005 goda)*. Orel; 2005. p.350-353. [in Russian] (Красохина С.И., Ганич В.А. Новые сорта винограда вида *Vitis labrusca* L. и перспективность их возделывания. В кн.: *Состояние и перспективы селекции и сорто разведения плодовых культур: Материалы международной научно-методической конференции, посвященной 160-летию ВНИИСПК; Орел; 12–15 июля 2005 года*. Орел; 2005. С.350-353).
- Lazarevsky M.A. Studying grape cultivars (Izucheniye sortov vinograda). Rostov-on-Don: Rostov University; 1963. [in Russian] (Лазаревский М.А. Изучение сортов винограда. Ростов-на-Дону: Ростовский университет; 1963).
- Lazarevsky M.A. The role of heat in the life of the European grapevine (Rol tepla v zhizni yevropeyskoy vinogradnoy lozy). Rostov-on-Don: Rostov University; 1961. [in Russian] (Лазаревский М.А. Роль тепла в жизни европейской виноградной лозы. Ростов-на-Дону: Ростовский университет; 1961).
- Leolini L., Costafreda-Aumedes S., Santos J.A., Menz C., Fraga H., Molitor D. et al. Phenological model intercomparison for estimating grapevine budbreak date (*Vitis vinifera* L.) in Europe. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3800. DOI: 10.3390/app10113800
- Lyashenko G.V., Marinin E.I. Agroclimatic risk assessment by spring frost damage of Ovidiopolskiy and Lanka grape varieties. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*. 2014;19(4):48-54. [in Russian] (Ляшенко Г.В., Маринин Е.И. Агроклиматическая оценка рисков повреждения винограда сортов Овидиопольский и Ланка весенними заморозками. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2014;19(4):48-54).
- Maghradze D., Rustioni L., Scienza A., Failla O. Phenological diversity of Georgian grapevine cultivars in Northern Italy. *Journal of the American Pomological Society*. 2012;66(2):56-67.
- Makarova G.A. Phenological development of grape in Altai forest steppe areas near the Ob. *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2007;9(177):73-78. [in Russian] (Макарова Г.А. Фенологическое развитие винограда в колочной степи Алтайского Приобья. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2007;9(177):73-78).
- Marmorshstein A.A., Pankin M.I., Larkina M.D. Features of the phenology of Concord, Reliance and Venus grapes varieties in agroecological conditions of the North-Western Caucasus. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2022a;73(1):87-101. [in Russian] (Марморштейн А.А., Панкин М.И., Ларькина М.Д. Особенности фенологии сортов винограда Конкорд, Рилайнс и Венус в агроэкологических условиях Северо-Западного Предкавказья. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2022a;73(1):87-101). DOI: 10.30679/2219-5335-2022-1-73-87-101
- Marmorshstein A.A., Pankin M.I., Lar'kina M.D. Phenology of the variety Podarok Dmitriya in agroecological conditions of the North-Western Ciscaucasia. *Scientific Works of North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making*. 2022b;34:81-86. [in Russian] (Марморштейн А.А., Панкин М.И., Ларькина М.Д. Фенология сорта Подарок Дмитрия в агроэкологических условиях Северо-Западного Предкавказья. *Научные труды Северо-Кавказского Федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*. 2022b;34:81-86). DOI: 10.30679/2587-9847-2022-34-81-86
- Modonkaeva A.E., Polulyakh A.A. Main phenological phases of the vegetation period of a number of table grape varieties. *Wine-Making and Viticulture*. 2014;(2):40-43. [in Russian] (Модонкаева А.Э., Полулях А.А. Основные фенологические фазы вегетационного периода ряда столовых сортов винограда. *Виноделие и виноградарство*. 2014;(2):40-43).
- Naumova L., Novikova L. Diversity on temperature demands of grapes varieties collection of Ya.I. Potapenko All-Russian Research Institute of Viticulture and Winemaking. *Fruit growing and viticulture of South Russia*. 2015a;36(6): 86-99. [in Russian] (Наумова Л.Г., Новикова Л.Ю. Разнообразие сортов винограда коллекции Всероссийского НИИВиВ им. Я.И. Потапенко по температурным потребностям. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2015a;36(6):86-99).
- Naumova L.G., Novikova L.Yu. Features of grapes varieties vegetation under the agric-ecological conditions of Lower

- Predon. *Scientific Works of North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making*. 2015b;8:67-75. [in Russian] (Наумова Л.Г., Новикова Л.Ю. Особенности вегетации сортов винограда в агроэкологических условиях Нижнего Придонья. *Научные труды Северо-Кавказского Федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*. 2015b;8:67-75).
- Novikova L., Naumova L. Regression analysis of phenological observations for grapes varieties of collections of ARRIV&W named after Ya.I. Potapenko. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2016;38(2):54-61. [in Russian] (Новикова Л.Ю., Наумова Л.Г. Регрессионный анализ фенологических наблюдений за сортами винограда в коллекции ВНИИВиВ им. Я.И. Потапенко. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2016;38(2):54-61).
- Novikova L.Yu., Naumova L.G. Model of temperature thresholds influence on grape seasonal development. *Journal of International Scientific Publications: Agriculture and Food*. 2019;7:86-92.
- Novikova L.Yu., Naumova L.G. Temperature demands of phenological phases of bud break and flowering of grape in Rostov region. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2016;46:292-295. [in Russian] (Новикова Л.Ю., Наумова Л.Г. Температурные потребности фенологических фаз распускания почек и цветения винограда в Ростовской области. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2016;46:292-295).
- Petrov V.S., Aleynikova G.Yu., Marmorshstein A.A. Agricultural zoning for optimized variety placement, sustainable viticulture and quality winemaking (Agroekologicheskoye zonirovaniye territorii dlya optimizatsii razmeshcheniya sortov, ustoychivogo vinogradarstva i kachestvennogo vinodeliya). Krasnodar; 2020. [in Russian] (Петров В.С., Алейникова Г.Ю., Марморштейн А.А. Агроэкологическое зонирование территории для оптимизации размещения сортов, устойчивого виноградарства и качественного виноделия. Краснодар; 2020).
- Petrov V.S., Pankin M.I., Shchervakov S.V., Kovalenko A.G., Kurdenkova E.K. Peculiarity of vegetation of inter specific grapes varieties in the Black Sea agric and ecological zone of viticulture in the South of Russia. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2015;32(2):37-46. [in Russian] (Петров В.С., Панкин М.И., Щербачков С.В., Коваленко А.Г., Курденкова Е.К. Особенности вегетации межвидовых сортов винограда в Черноморской агроэкологической зоне виноградарства Юга России. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2015; 32(2):37-46).
- Potapenko A.Yu., Ganich V.A. Evaluation of grape varieties of interspecific origin for storage. *Scientific Works of North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making*. 2015;8:85-90. [in Russian] (Потапенко А.Ю., Ганич В.А. Оценка сортов винограда межвидового происхождения для хранения. *Научные труды Северо-Кавказского Федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*. 2015;8:85-90).
- Ramazanov O.M., Makuev G.A., Zakabukina E.N., Khaustova N.A., Omarov Sh.K. Phases of table grape development depending on growing conditions (Fazy razvitiya stolovogo vinograda v zavisimosti ot usloviy vyrashchivaniya). *Problemy razvitiya APK regiona = Development Problems of the Regional Agro-Industrial Complex*. 2021;(45):84-87. [in Russian] (Рамазанов О.М., Макуев Г.А., Закабукина Е.Н., Хаустова Н.А., Омаров Ш.К. Фазы развития столового винограда в зависимости от условий выращивания. *Проблемы развития АПК региона*. 2021;(45):84-87).
- Smirnov K.V., Maltabar L.M., Radjabov A.K., Matuzok N.V., Troshin L.P. *Viticulture (Vinogradarstvo)*. Moscow: Rosinformagrotech; 2017. [in Russian] (Смирнов К.В., Малтабар Л.М., Раджабов А.К., Матузок Н.В., Трошин Л.П. *Виноградарство*. Москва: Росинформагротех; 2017).
- Son D.S., Kim Y.S., Jeong S.B., Lee K.K. The effect of covering date and heating on growth and berry quality in grape cultivar Kyoho in polyethylene film houses. *Research Reports of the Rural Development Administration, Horticulture*. 1989;31(4):34-41. [in Korean]
- 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). URL: <https://gossortrf.ru/wp-content/uploads/2022/06/Реестр%20на%20допуск%202022.pdf> [дата обращения: 20.04.2022].
- Vijaya D., Joshi V., Reddy G.R., Kumari D.A., Rao B.S. Effect of rootstock-scion interaction on petiole nutrient content, bud break, and yield of three commercial grape cultivars. *Agricultural Research Journal*. 2019;56(1):84-91. DOI: 10.5958/2395-146X.2019.00013.9
- Wolfe D.W., Schwartz M.D., Lakso A.N., Otsuki Y., Pool R.M., Shaulis N.J. Climate change and shifts in spring phenology of three horticultural woody perennials in north-eastern USA. *International Journal of Biometeorology*. 2005;49(5):303-309. DOI: 10.1007/s00484-004-0248-9

Информация об авторах

Валерий Семенович Петров, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, petrov_53@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0856-7450>

Анна Александровна Марморштейн, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, am342@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6256-4886>

Михаил Иванович Панкин, доктор сельскохозяйственных наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, PankinMI@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8807-8344>

Дамир Муратович Цику, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, mr.tsiku@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6464-1673>

Марина Дмитриевна Ларькина, кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по науке, ООО «Инновационная компания «Таманский биотехнологический центр», 353500 Россия, Темрюк, ул. Таманская, 5, офис 31, maran-1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6962-8256>

Information about the authors

Valery S. Petrov, Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, petrov_53@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-0856-7450>

Anna A. Marmorshtein, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, am342@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6256-4886>

Mikhail I. Pankin, Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Leading Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, PankinMI@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8807-8344>

Damir M. Tsiku, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, mr.tsiku@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6464-1673>

Marina D. Larkina, Cand. Sci. (Agriculture), Deputy Director for Science, LLC “Innovation Company “Taman Biotechnology Center”, Office 31, 5 Tamanskaya St., Temryuk 353500, Russia, maran-1@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-6962-8256>

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 23.09.2022; одобрена после рецензирования 18.01.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 23.09.2022; approved after reviewing on 18.01.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.13:631.52:632.11
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-86-98



Изменение климата и урожайность овса посевного (*Avena sativa* L.) в Якутии

Л. В. Петрова¹, Л. Ю. Новикова², А. В. Алексеева³, И. Г. Лоскутов²

¹ Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М.Г. Сафронова, Якутск, Россия

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

³ Государственное бюджетное учреждение Республики Саха (Якутия) «Служба земледелия РС(Я)», Якутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Лидия Владимировна Петрова, petrovalidblad@gmail.com

Актуальность. Якутия расположена в зоне рискованного земледелия, в которой лимитирующими факторами являются как низкие температуры, так и недостаточная влагообеспеченность. Овес – основная зернофуражная культура Якутии. В последние десятилетия наблюдается потепление климата, влияющее на эффективность возделывания овса в разных климатических зонах республики. Цель исследования – анализ погодно-климатических факторов и их влияние на урожайность овса посевного в Якутии в последнее десятилетие.

Материалы и методы. Материалом для исследования послужили данные по урожайности районированных сортов овса в 2014–2021 гг. на трех государственных сортоучастках Якутии, расположенных в Центральной, Заречной и Среднеленской агроклиматических зонах, и хозяйственно ценные признаки трех сортов в Центральной зоне в 1999–2021 гг. При статистической обработке данных использованы дисперсионный, корреляционный, регрессионный анализы.

Результаты и заключение. Анализ данных 2014–2021 гг. выявил снижение урожайности овса во всех трех исследованных зонах. Корреляционный анализ показал, что это связано с изменениями климата – активным потеплением и тенденцией к снижению количества осадков за период вегетации овса. Регрессионный анализ структуры урожайности овса в Центральной зоне в 1999–2021 гг. подтвердил, что структурные элементы зависят от условий влагообеспеченности: уменьшение осадков и гидротермического коэффициента приводит к снижению таких показателей, как масса 1000 зерен, высота растения, длина метелки, урожайность. Значительная зависимость от условий увлажнения свидетельствует о необходимости продолжения селекционной работы по созданию засухоустойчивых сортов овса посевного, адаптированных к конкретным агроклиматическим условиям Якутии.

Ключевые слова: сорта овса, Якутия, агроклиматические зоны, потепление, снижение осадков, структура урожайности, регрессионные модели

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ЯНИИСХ по государственному заданию № FWRS-2022-0006 и тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0009. Работа выполнена с использованием оборудования Spectra Star 2200 ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН и гранта № 3.ЦКП.21.0016 Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Петрова Л.В., Новикова Л.Ю., Алексеева А.В., Лоскутов И.Г. Изменение климата и урожайность овса посевного (*Avena sativa* L.) в Якутии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):86-98. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-86-98

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-86-98

Climate change and crop yield of oats (*Avena sativa* L.) in Yakutia

Lidia V. Petrova¹, Liubov Yu. Novikova², Alexandra V. Alekseeva³, Igor G. Loskutov²

¹Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, M.G. Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, Yakutsk, Russia

²N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

³Agriculture Service of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia

Corresponding author: Lidia V. Petrova, petrovalidblad@gmail.com

Background. Yakutia lies within a risky farming region, where both low temperatures and insufficient moisture are the limiting factors. Oat is the main cereal fodder crop in Yakutia. Climate warming observed in recent decades has been affecting oat cultivation in different climatic areas of Yakutia. The objective of the study was to analyze weather and climate factors affecting oat yield in the republic during the past decade.

Materials and methods. The study covered the data of 2014–2021 on the yield of zoned oat cultivars in three Yakutian variety trial sites located in the Central, Transfluvial and Middle Lena agroclimatic zones, and agronomic characteristics of three oat cultivars in the Central zone in 1999–2021. Variance, correlation, and regression analyses were applied.

Results and conclusion. The study showed that in 2014–2021 there was a decrease in oat yields in Yakutia. The correlation analysis showed that this was due to climate changes: active warming, and a tendency towards a decrease in precipitation during the oat growing season. The regression analysis of the oat crop structure in the Central Zone in 1999–2021 confirmed that all yield components depended on the moisture availability, and it was the decrease in precipitation that led to a reduction in such indicators as 1000 grain weight, plant height, panicle length, and yield. A significant dependence on humidification conditions indicates the need to continue breeding work towards the development of drought-resistant oat cultivars adapted to the specific agroclimatic environments of Yakutia.

Keywords: oat cultivars, Yakutia, agroclimatic zones, warming, precipitation decrease, yield structure, regression models

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state tasks according to the theme plans of the M.G. Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, Project No. FWRS-2022-0006, and VIR, Project No. FGEM-2022-0009.

The work was carried out using the Spektra Star 2200 equipment of the Collective Use Center, Yakut Scientific Center, SB RAS, and supported by Grant No. 3.CUC.21.0016.

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

For citation: Petrova L.V., Novikova L.Yu., Alekseeva A.V., Loskutov I.G. Climate change and crop yield of oats (*Avena sativa* L.) in Yakutia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):86-98. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-86-98

Введение

Республика Саха (Якутия) входит в зону рискованного земледелия из-за крайне низких температур в зимний период, больших годовых, сезонных и суточных колебаний температуры воздуха, засушливого климата, короткого безморозного периода, низкотемпературных многолетнемерзлых пород и холодных почв с низким плодородием (Agriculture in the Republic..., 2021). В Якутии растениеводство в основном развито в центральных и юго-западных районах, расположенных в среднетаежной подзоне, граница которой проходит по 64–65° с. ш. Подзона средней тайги занимает 38% территории Якутии, или 1103 тыс. км².

Производство зерна продовольственного и кормового назначения остается одним из приоритетных направлений в земледелии и растениеводстве региона. Овес в Якутии возделывается на фуражные цели. За последние 20 лет доля его посевных площадей в структуре зерновых культур Якутии увеличилась в 2,1 раза – с 31,6% в 2000 г. до 65,6% в 2021 г. Посевные площади ячменя и пшеницы уменьшились за это время в 5–5,3 раза – с 13 014 до 2579 га и с 6791 до 1293 га соответственно. Посевная площадь овса в 2021 г. составила 7386 га. В среднем за 2014–2020 гг. урожайность овса в Якутии была больше на 0,03–0,18 т/га, чем озимой ржи, пшеницы и ячменя (Agriculture in the Republic..., 2021).

На территории России, в том числе и Якутии, в последние десятилетия отмечается рост температуры воздуха, в ряде регионов РФ снижается количество осадков, наблюдается увеличение частоты засух (Varlamov et al., 1998; Fedorov, Svinoboev, 2000; Skachkov, 2005; Malkova et al., 2011; A report on climate..., 2021; IPCC..., 2021). Изменение климата влияет на условия вегетации и хозяйственно ценные признаки многих культур, в том числе овса (Vidovic, Sochorcova, 2004; Novikova et al., 2013; Mohammadi et al., 2020; Kole et al., 2020).

Ценность сортов сельскохозяйственных растений в значительной мере определяется их экологической пластичностью и способностью в различных условиях внешней среды обеспечивать определенный уровень урожайности. Поэтому изучение природы взаимодействия «генотип – среда» – одно из центральных направлений в современных генетико-селекционных исследованиях (Korzun, 2010; Galitsky, 2014; Loskutov et al., 2020). Резкие колебания урожайности являются результатом нестабильности погодных условий и недостаточной сбалансированности адаптивных возможностей сортов (Kogobeynikov, 2010). Стабилизация производства зерна по годам независимо от изменения метеорологических факторов – важнейшая проблема сельскохозяйственного производства (Batalova, 2011; Surin et al., 2016). Происходящие в последнее время климатические изменения необходимо анализировать в каждом регионе и учитывать при разработке долгосрочных селекционных программ по созданию новых сортов сельскохозяйственных культур, адаптированных к определенным природно-климатическим условиям (Surin et al., 2006).

Овес – культура, более приспособленная к прохладному, влажному климату и кислым почвам, чем другие злаки, но он чувствителен к дефициту воды и тепла во время налива и созревания семян (Loskutov, 2007; Surin, 2011; Boczkowska et al., 2016; Lyubimova et al., 2022; Gong et al., 2022).

Благодаря своей скороспелости и широкой экологической пластичности овес в Якутии возделывается во многих улусах в разных агроклиматических зонах. Поэтому анализ многолетних данных по урожаю и выявление

особенностей его формирования в различных метеорологических условиях очень важны для планирования стратегии селекционных программ по овсу и повышения его продуктивности в регионе.

Цель исследования – анализ погодно-климатических факторов и их влияния на урожайность овса посевного в Якутии в последнее десятилетие.

Материал и методы

Проанализированы результаты испытания районированных сортов овса посевного ‘Покровский’, ‘Покровский 9’ (стандарт) и ‘Виленский’, проведенного в 2014–2021 гг. на Якутском, Мегино-Кангаласском и Олёкминском госсортоучастках (ГСУ), расположенных соответственно в Центральной, Заречной и Средненской агроклиматических зонах Якутии (рис. 1).

Центральная зона включает в себя близлежащие к г. Якутску районы, образующие сельскохозяйственный агропояс на левом берегу реки Лены. Зона развитого земледелия и животноводства. По данным на 2020 г. в Центральной зоне расположено 20,9% площадей зерновых республики, 38,1% картофеля, 51,1% овощных открытого грунта, 25,9% кормовых культур (The system of agriculture..., 2021). Якутский ГСУ (ближайшая метеостанция – Якутск) расположен в 20 км к северо-востоку от г. Якутска. Сумма активных температур выше 10°C на метеостанции Якутск – 1565°C, годовая сумма осадков – 202 мм (Handbook..., 1966, 1968).

В состав Заречной зоны входят территории агропромышленного комплекса районов, расположенных в Лено-Алданском междуречье. Зона включает районы с традиционно сельскохозяйственным укладом. В ней расположено 63,4% площадей зерновых, 17,6% картофеля, 17,1% овощных, 43,6% кормовых культур республики (The system of agriculture..., 2021). Мегино-Кангаласский ГСУ (метеостанция Тюнгюлю) расположен на территории Мегино-Кангаласского района Заречной зоны. Годовая сумма осадков на станции Тюнгюлю составляет 194 мм. Сумма температур в справочнике не представлена, но на ближайших станциях Якутск и Борогонцы, удаленных на 80–90 км от Тюнгюлю, составляет 1565 и 1515°C (Handbook..., 1966, 1968); можно предположить сходный уровень теплообеспеченности на станции Тюнгюлю – 1500–1600°C.

Аграрно-промышленная Средненская зона, в которой находится Олёкминский ГСУ (метеостанция Олёкминск), расположена на юго-западе Якутии. Зона активной нефтегазодобычи, но с благоприятным для растениеводства климатом. Здесь возделывается 5,9% площадей зерновых, 20,2% картофеля, 9,1% овощных, 3,4% кормовых (The system of agriculture..., 2021). Сумма активных температур на метеостанции Олёкминск составляла до потепления 1540°C, сумма осадков – 264 мм (Handbook..., 1966, 1968).

Таким образом, при сходном уровне теплообеспеченности пункты исследования характеризуются разным уровнем влагообеспеченности, наибольшее количество осадков наблюдается в Средненской зоне.

Сорт ‘Покровский’ выведен в Якутском НИИСХ методом гибридизации местного сорта ‘Маганский 44’ с византийским овсом к-4093 (Палестина). Сорт среднеспелый, вегетационный период – 70–77 дней, устойчив к осыпанию, среднеустойчив к полеганию, пыльной и твердой головней поражается незначительно. Масса 1000 зерен – 27–35 г. Урожайность зерна – в среднем

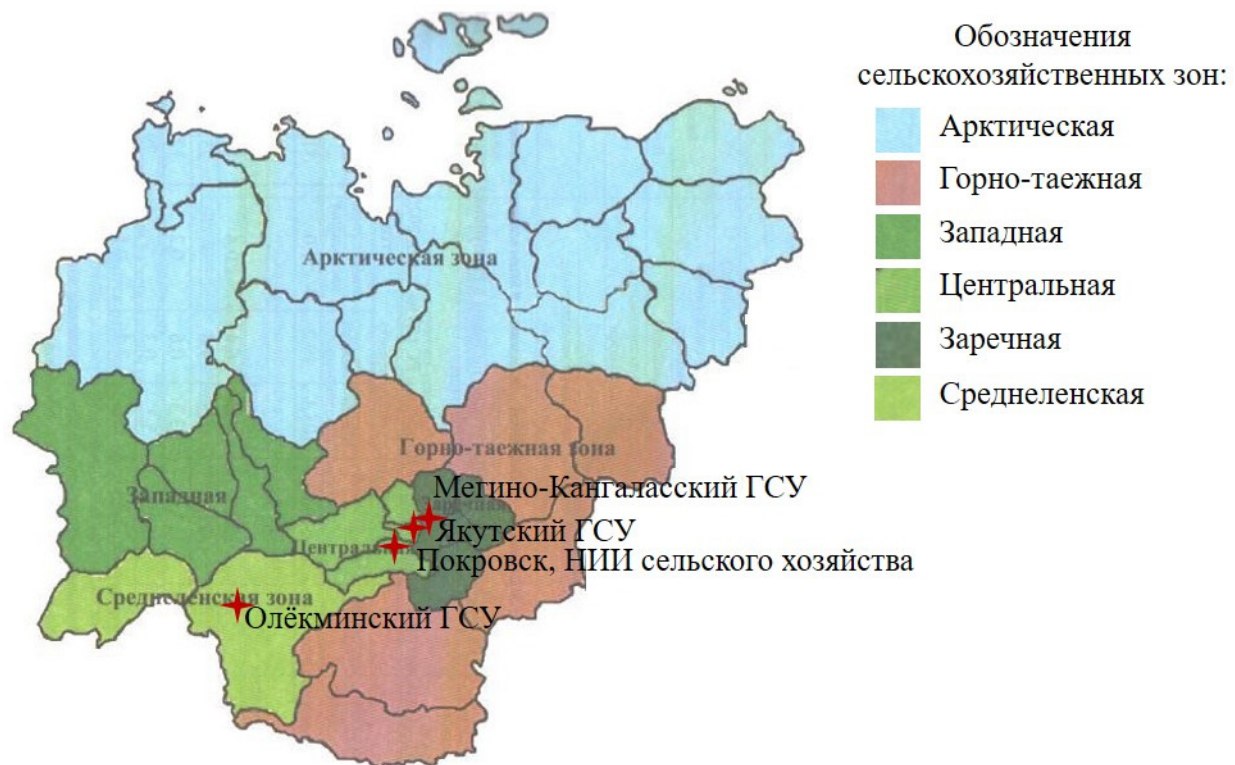


Рис. 1. Пункты исследования на карте Якутии
(источник: The system of agriculture..., 2021, модифицирована)

Fig. 1. Research sites on the map of Yakutia
(source: The system of agriculture..., 2021, modified)

2,5 т/га, зеленой массы – до 25 т/га. От византийского овса унаследовал засухоустойчивость, но имеет склонность к полеганию в дождливые годы (Petrova, 2018).

Сорт 'Покровский 9' выведен в Якутском НИИСХ методом гибридизации шведского сорта 'Победа' с ультраскороспелым сортом 'Хибины 2'. Сорт среднеспелый, вегетационный период – 70–77 дней, практически не полегает, не дает «подгона». Масса 1000 зерен – 32–35 г. Урожайность зерна на производственных посевах достигает 2,5–3,0 т/га, зеленой массы – 25–40 т/га. По крупным качествам зерна отнесен к ценным сортам и занесен в список ценных сортов РФ. Из-за высокого процента обрубленных семян пока не имеет широкого распространения в производстве (Petrova, 2018).

Сорт 'Виленский' создан в Якутском НИИСХ методом гибридизации местного районированного сорта 'Покровский 9' × ('Wodan' × 'Хибины 2'). Среднеранний, вегетационный период – 68–72 дня, устойчив к полеганию. Масса 1000 зерен – 31–38 г. Урожайность зерна на производственных посевах достигает 2,5–5,0 т/га, зеленой массы – 25–40 т/га (Petrova, 2018).

Более подробно исследовали динамику урожайности и других хозяйственно ценных признаков овса, их связи в условиях Центральной Якутии на полях НИИ сельского хозяйства Якутии (г. Покровск) по данным наблюдений за более длительный период (1999–2021 гг.). Изучены продолжительность вегетационного периода, высота растений, структура метелки, урожайность сортов 'Покровский', 'Покровский 9' и 'Хибины 2'.

Ультраскороспелый сорт 'Хибины 2' был районирован по IV земледельческой зоне Якутии. Хорошо приспособлен к условиям длинного светового дня, умеренным температурам в период созревания (Petrova, 2018).

Учетная площадь делянок в питомнике конкурсного сортоиспытания – 25 м², повторность четырехкратная с рандомизированным размещением. Наблюдения и учеты проведены согласно общепринятым методикам (Methodology for state ..., 2019).

Почва опытного участка мерзлотная таежная, палевая, среднесуглинистая. Содержание гумуса в пахотном слое составляет 2,67%, в более нижних слоях снижается до 0,44%. Содержание подвижного фосфора по Эгнеру – Риму – 10,43 мг/100 г почвы, обменного калия по Маслоу – 27,4 мг/100 г почвы. Реакция водной вытяжки щелочная по всему профилю – 7,11–7,55, гидролитическая кислотность почвы – 0,84–0,98 мг/экв. на 100 г почвы. Тип засоления сульфатно-хлоридный (до 49,1%) с преобладанием натриевых солей.

При анализе агроклиматических условий использованы данные метеостанций Якутск, Тюнгюлю, Олёкминск, Покровск.

Статистическая обработка проведена с использованием дисперсионного анализа с апостериорным критерием Тьюки (Dospikhov, 1973), корреляционного и регрессионного анализов – в пакете Statistica 13.3 (Khalafyan, 2010).

Результаты и обсуждение

Исследование динамики урожайности овса на трех ГСУ в 2014–2021 гг.

За годы исследования условия тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода (июнь – август) в указанных агроклиматических зонах значительно различались. Наиболее холодной и влажной является Среднелен-

ская зона, более теплой и сухой – Центральная зона. В среднем за анализируемые годы сумма среднесуточных температур воздуха за период вегетации растений составила 1508°C в Олёкминске (Среднеленская зона), 1585°C в Тюнгюлю (Заречная зона) и 1650°C в Якутске (Центральная зона) (уровень значимости различий $p = 0,054$); среднесуточная температура воздуха составила соответственно 16,7; 17,3 и 18,1°C ($p = 0,094$), а сумма осадков – 155, 128 и 99 мм ($p = 0,068$). По влагообеспеченности Центральная зона характеризуется как зона средней засухи (ГТК – 0,60), Заречная и Среднеленская – зоны слабой засухи и недостаточного увлажнения (ГТК – 0,80 и 1,04 соответственно) ($p = 0,055$). Таким образом, в 2014–2021 гг. исследуемые агроклиматические зоны Якутии существенно различались по тепло- и влагообеспеченности.

За период 2014–2021 гг. во всех пунктах наблюдались (рис. 2) недостоверный рост суммы температур за июнь – август (Якутск – на 28,1°C/год, $p = 0,110$; Тюнгюлю – на 19,2°C/год, $p = 0,146$; Олёкминск – на 27,0°C/год, $p = 0,190$), снижение осадков (соответственно по станциям на 6 мм/год, $p = 0,188$; на 16,3 мм/год, $p = 0,043$ (достоверно) и на 2,9 мм/год, $p = 0,727$), а также снижение ГТК (Якутск – на 0,05 ед./год, $p = 0,142$; Тюнгюлю – на 0,12 ед./год, $p = 0,042$ (достоверно); Олёкминск – на 0,04 ед./год, $p = 0,575$).

‘Покровский 9’ (3,21–3,22 т/га), на других превышала его на 0,05–0,19 т/га. Урожайность сорта ‘Покровский’ была ниже сорта ‘Виленский’ на 0,15–0,33 т/га. В каждой агроклиматической зоне наблюдалась сильная вариабельность урожайности зерна сортов овса и особенно значительно ($V = 64–73\%$) – в засушливой Центральной зоне по сравнению с менее засушливой Заречной (41–49%) и более благоприятной по влагообеспеченности Среднеленской (30–36%) зонами (см. табл. 1).

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что урожайность исследуемых сортов овса достоверно различалась в пунктах исследования ($p = 0,000$), сорта не различались по средней урожайности ($p = 0,672$), а существенное взаимодействие «пункт × сорт» не отмечено ($p = 0,985$) (рис. 3).

Поскольку сорта достоверно не различались по урожайности, была рассчитана средняя урожайность по трем сортам для каждого пункта и года. Урожайность сортов овса в среднем ежегодно снижалась в Центральной зоне на 0,25 т/га ($p = 0,006$), Заречной – на 0,26 т/га ($p = 0,054$), Среднеленской – на 0,10 т/га ($p = 0,564$) (рис. 4).

Таким образом, во всех изученных зонах в период с 2014 по 2021 г. наблюдалось снижение урожайности районированных сортов овса.

В изученных пунктах степень влияния температур

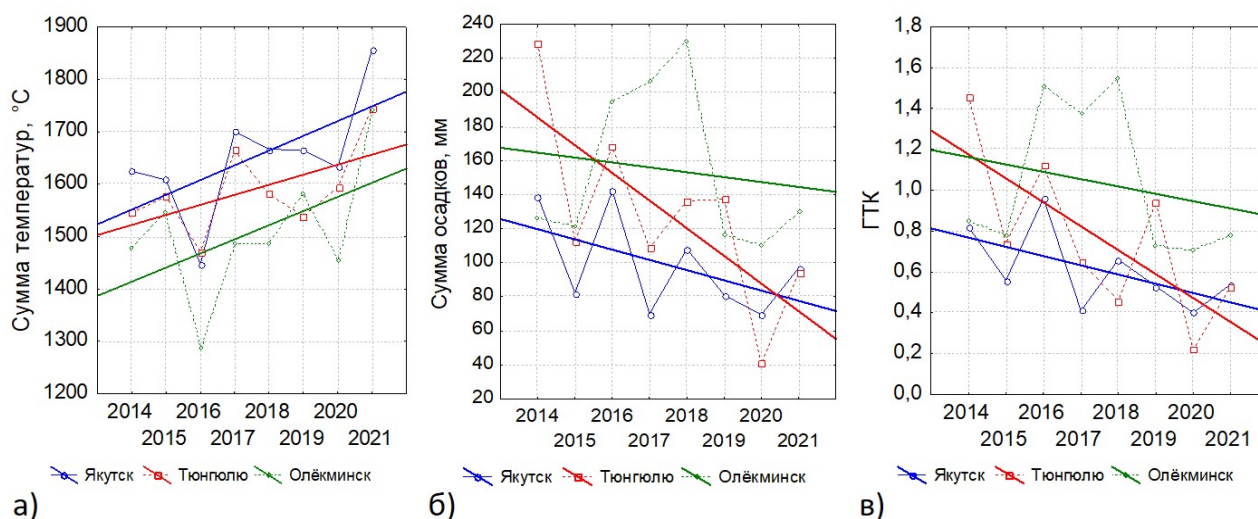


Рис. 2. Динамика тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода (июнь – август) в трех агроклиматических зонах Якутии в 2014–2021 гг.: а) сумма температур; б) сумма осадков; в) ГТК (метеорологические станции: Якутск – Центральная зона, Тюнгюлю – Заречная зона, Олёкминск – Среднеленская зона)

Fig. 2. Dynamics of heat and moisture availability during the growing season (June–August) in three agroclimatic zones of Yakutia in 2014–2021: а) the sum of temperatures; б) the amount of precipitation; в) HTK (meteorological stations: Yakutsk in the Central zone; Tyungyulyu in the Transfluvial zone; Olyokminsk in the Middle Lena zone)

Таким образом, изменения агроклиматических показателей в различных регионах Якутии синхронны, в последние годы наблюдается рост теплообеспеченности и снижение влагообеспеченности периода вегетации овса.

На Олёкминском ГСУ урожайность (табл. 1) по трем сортам составила в среднем 3,10 т/га (2,88–3,22 т/га), что было в 1,5 раза больше, чем на Мегино-Кангаласском ГСУ (в среднем 1,99 т/га) и в 2,7–3,2 раза больше в сравнении с Якутским ГСУ (1,09 т/га). Урожайность сорта ‘Виленский’ на Олёкминском ГСУ была на уровне стандарта

и осадков на урожайность овса была различна (табл. 2). В наиболее теплой Центральной зоне влияние температур было менее значительным, чем осадков, а в более прохладных Заречной и особенно в Среднеленской зонах, где теплообеспеченность является лимитирующим фактором, наибольшее влияние оказывала температура.

Таким образом, наблюдаемое в трех агроклиматических зонах Якутии снижение урожайности районированных сортов овса объясняется климатическими изменениями – ростом температур и снижением количества осадков и значений ГТК.

Таблица 1. Урожайность районированных сортов овса в трех агроклиматических зонах Якутии, т/га
Table 1. Yield of zoned oat cultivars in three agroclimatic zones of Yakutia, t/ha

Сорт	Год								Среднее	Кoeffициент вариации, %
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021		
Якутский ГСУ (Центральная зона)										
Покровский 9	2,14	1,05	1,60	0,53	1,50	0,41	0,38	0,46	1,01 ± 0,24	67
Покровский	1,92	1,34	1,72	0,65	1,68	0,45	0,32	0,35	1,05 ± 0,24	64
Виленский	2,25	2,30	1,81	0,73	1,57	0,35	0,34	0,28	1,20 ± 0,31	73
Мегино-Кангаласский ГСУ (Заречная зона)										
Покровский 9	2,77	1,86	3,44	1,70	2,21	2,26	0,88	1,13	2,03 ± 0,30	41
Покровский	2,65	1,96	3,32	1,60	2,12	1,85	0,31	1,11	1,87 ± 0,32	49
Виленский	2,76	2,08	3,89	1,69	2,14	2,35	0,67	1,06	2,08 ± 0,35	48
Олёкминский ГСУ (Средленская зона)										
Покровский 9	3,80	2,44	4,66	1,91	3,50	3,20	4,63	1,60	3,22 ± 0,41	36
Покровский	3,54	2,85	3,57	1,74	3,00	3,02	3,86	1,51	2,89 ± 0,30	30
Виленский	3,54	2,72	4,56	2,25	3,24	3,33	4,38	1,63	3,21 ± 0,35	31

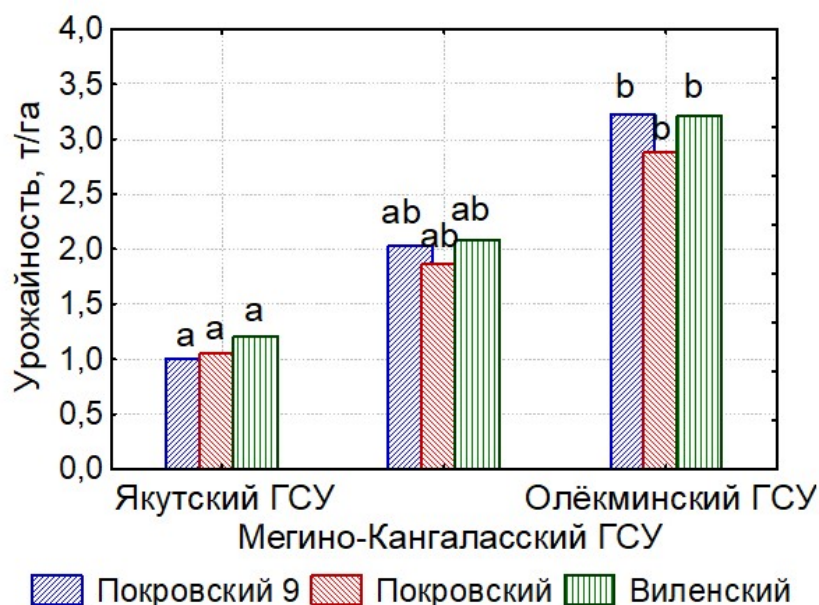


Рис. 3. Средняя урожайность районированных сортов овса в трех агроклиматических зонах Якутии в 2014–2021 гг.: Якутский ГСУ – Центральная зона; Мегино-Кангаласский ГСУ – Заречная зона; Олёкминский ГСУ – Средленская зона (одинаковыми буквами обозначены значения, не отличающиеся значимо на 5-процентном уровне)

Fig. 3. Average yields of zoned oat cultivars in three agroclimatic zones of Yakutia in 2014–2021: Yakutsk State Variety Trial Site (SVTS) in the Central zone; Megino-Kangalasskiy SVTS in the Transfluvial zone; Olyokminsk SVTS in the Middle Lena zone (the same letters denote values that do not differ significantly at the 5% level)

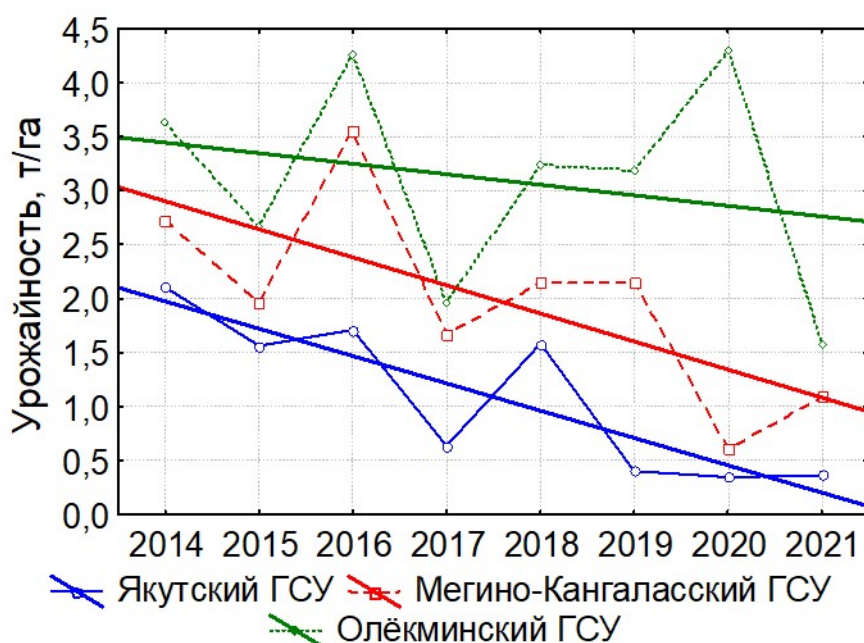


Рис. 4. Динамика средней урожайности районированных сортов овса в трех агроклиматических зонах Якутии в 2014–2021 гг.: Якутский ГСУ – Центральная зона; Мегино-Кангаласский ГСУ – Заречная зона; Олёкминский ГСУ – Среднеленская зона

Fig. 4. Dynamics of average yields for zoned oat cultivars in three agroclimatic zones of Yakutia in 2014–2021: Yakutsk SVTS in the Central zone; Megino-Kangalass SVTS in the Transfluvial zone; Olyokminsk SVTS in the Middle Lena zone

Таблица 2. Коэффициенты корреляции урожайности овса с агроклиматическими показателями периода вегетации в трех агроклиматических зонах Якутии

Table 2. Coefficients of correlations between oat yield and agroclimatic indicators during the growing season in three agroclimatic zones of Yakutia

Показатель	Якутский ГСУ (Центральная зона)	Мегино-Кангаласский ГСУ (Заречная зона)	Олёкминский ГСУ (Среднеленская зона)
Средняя температура	-0,60	-0,74*	-0,79*
Сумма температур	-0,58	-0,75*	-0,77*
Сумма осадков	0,77*	0,84*	-0,06
ГТК	0,80*	0,81*	0,09
Коэффициент увлажнения	0,74*	0,82*	-0,23
Температура за июнь	-0,83*	-0,66	-0,61
Температура за июль	-0,41	-0,83*	-0,57
Температура за август	-0,17	-0,16	-0,86*
Осадки за июнь	0,56	0,48	0,23
Осадки за июль	0,58	0,60	0,32
Осадки за август	-0,01	0,67	-0,71*
ГТК за июнь	0,59	0,48	0,23
ГТК за июль	0,59	0,64	0,37
ГТК за август	0,05	0,76*	-0,57

Примечание: * – достоверно на 5-процентном уровне значимости

Note * – statistically significant at the 5% significance level

Структура урожайности овса в Центральной Якутии в 1999–2021 гг.

В условиях Центральной Якутии (г. Покровск) нами проведен более подробный анализ климатических изменений и формирования урожайности и элементов ее структуры сортов овса посевного. В последние десятилетия (1960–2021 гг.), по данным метеостанции Покровска, наблюдается достоверный рост температур во все месяцы года, кроме сентября и декабря, когда тренды также положительны, но достоверны при уровне значимости $p < 0,010$. Наибольшая скорость роста температур наблюдалась в марте и апреле ($0,07^\circ\text{C}/\text{год}$), наименьшая – в сентябре ($0,02^\circ\text{C}/\text{год}$). Тренды месячных сумм осадков были разнонаправленными и недостоверными ($p > 0,262$), за исключением декабря, когда их количество достоверно снижалось ($p = 0,009$). За период вегетации (июнь – август) достоверно (на $2,98^\circ\text{C}/\text{год}$; $p = 0,000$), увеличивалась сумма температур (рис. 5), сумма осадков и значения ГТК снижалась недостоверно – соответственно на $0,01 \text{ мм}/\text{год}$ ($p = 0,970$) и на $0,002 \text{ ед.}/\text{год}$ ($p = 0,503$). Эти тенденции усилились в последние годы (см. рис. 4). За годы исследования (1999–2021) достоверных трендов агроклиматических показателей вегетационного периода овса не наблюдалось, однако отмечена тенденция к росту температур и снижению суммы осадков и значений ГТК.

ны 2' с наименьшим (32,5 шт.) ($p = 0,017$). Продолжительность вегетационного периода сорта 'Хибины 2' (64,5 дней) была достоверно ($p < 0,032$) меньше, чем сортов 'Покровский' (69,6 дней) и 'Покровский 9' (69,0 дней), которые по этому показателю между собой различались несущественно.

Регрессионный анализ урожайности трех исследуемых сортов в 1999–2021 гг. достоверных трендов не выявил ($p > 0,826$; см. рис. 6). Однако в последние годы (2014–2021) снижение урожайности всех сортов ($0,4 \text{ т}/\text{га}/\text{год}$) было достоверным ($p < 0,050$). Некоторые тренды структурных элементов были также достоверны в исследуемый период по снижению массы 1000 зерен (уровни значимости тренда – $0,033 < p < 0,187$), повышению продуктивной кустистости ($0,015 < p < 0,064$), увеличению продолжительности вегетационного периода ($0,040 < p < 0,245$). Для всех сортов тенденции к уменьшению высоты растений и длины метелки были недостоверными, но имели одинаковую направленность.

Корреляционный анализ (табл. 4) выявил общие закономерности формирования урожайности у исследуемых сортов: наиболее сильная связь урожайности (положительная) наблюдалась с высотой растений, длиной метелки, числом зерен и колосков в метелке. Из агрометеорологических условий наиболее значительное влияние на урожайность оказали ГТК и осадки за июнь.

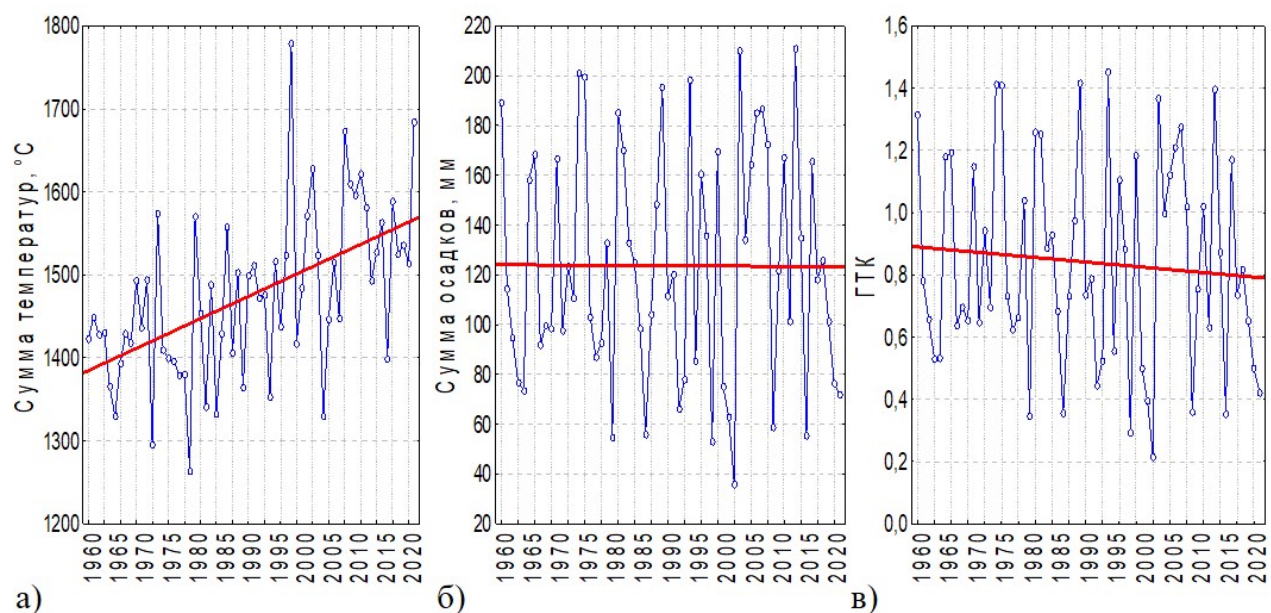


Рис. 5. Динамика тепло- и влагообеспеченности вегетационного периода (июнь – август) в Центральной Якутии в 1960–2020 гг.: а) сумма среднесуточных температур; б) сумма осадков; в) ГТК

Fig. 5. Dynamics of heat and moisture availability during the growing season (June–August) in three agroclimatic zones of Yakutia in 1960–2020: а) the sum of temperatures; б) the amount of precipitation; в) HTC

В 1999–2021 гг. средняя урожайность сорта 'Покровский' составила $2,1 \text{ т}/\text{га}$, 'Покровский 9' – $2,3 \text{ т}/\text{га}$, 'Хибины 2' – $1,7 \text{ т}/\text{га}$, но на фоне значительной межгодовой вариабельности различия сортов были недостоверны ($p = 0,534$, табл. 3, рис. 6). Дисперсионный анализ показал, что между сортами наблюдались достоверные различия только по числу зерен в метелке ($p = 0,020$) и продолжительности вегетационного периода ($p = 0,008$). По числу зерен в метелке контрастными были сорта 'Покровский 9' с наибольшим значением (41,4 шт.) и 'Хиби-

Для усредненных по сортам значений хозяйственно ценных признаков («среднего сорта») зависимость от погодных условий была несколько выше, чем для отдельных сортов. Такие объединенные модели зачастую обладают большей прогностической силой, поскольку нивелируются случайные ошибки отдельных сортов (Novikova et al., 2013). Были рассчитаны регрессионные уравнения агрометеорологической зависимости хозяйственно ценных признаков овса в Центральной Якутии.

Таблица 3. Средние значения и тренды хозяйственно ценных признаков районированных сортов овса в Центральной Якутии (Покровский), 1999–2021 гг.

Table 3. Average values and trends of useful agronomic indicators for three oat cultivars in Central Yakutia (Pokrovsk), 1999–2021

Показатель	Покровский		Покровский 9		Хибины 2	
	среднее	тренд, ед./год	среднее	тренд, ед./год	среднее	тренд, ед./год
Высота растений, см	87,1 ± 2,5	-0,05	84,2 ± 2,4	-0,02	85,5 ± 2,8	-0,55
Длина метелки, см	14,8 ± 0,4	-0,01	14,9 ± 0,4	-0,02	15,4 ± 0,5	-0,11
Число колосков в метелке	24,6 ± 1,3	-0,01	24,5 ± 1,0	0,03	22,0 ± 1,3	0,16
Число зерен в метелке	35,4 ± 2,5	-0,13	41,4 ± 2,0	0,13	32,5 ± 2,1	-0,11
Масса зерна с растения, г	1,5 ± 0,2	0,02	1,9 ± 0,2	0,07*	1,6 ± 0,1	0,02
Масса 1000 зерен, г	32,6 ± 0,7	-0,22*	34,8 ± 0,8	-0,16	33,4 ± 0,9	-0,22
Продуктивная кустистость	2,3 ± 0,2	0,05	2,2 ± 0,2	0,08*	2,3 ± 0,2	0,05
Вегетационный период, дней	69,6 ± 1,2	0,37*	69,0 ± 1,3	0,23	64,5 ± 1,2	0,24
Урожайность зерна, т/га	2,1 ± 0,3	0,01	2,3 ± 0,3	0,00	1,7 ± 0,2	0,00

Примечание: * – достоверно на 5-процентном уровне значимости

Note * – statistically significant at the 5% significance level

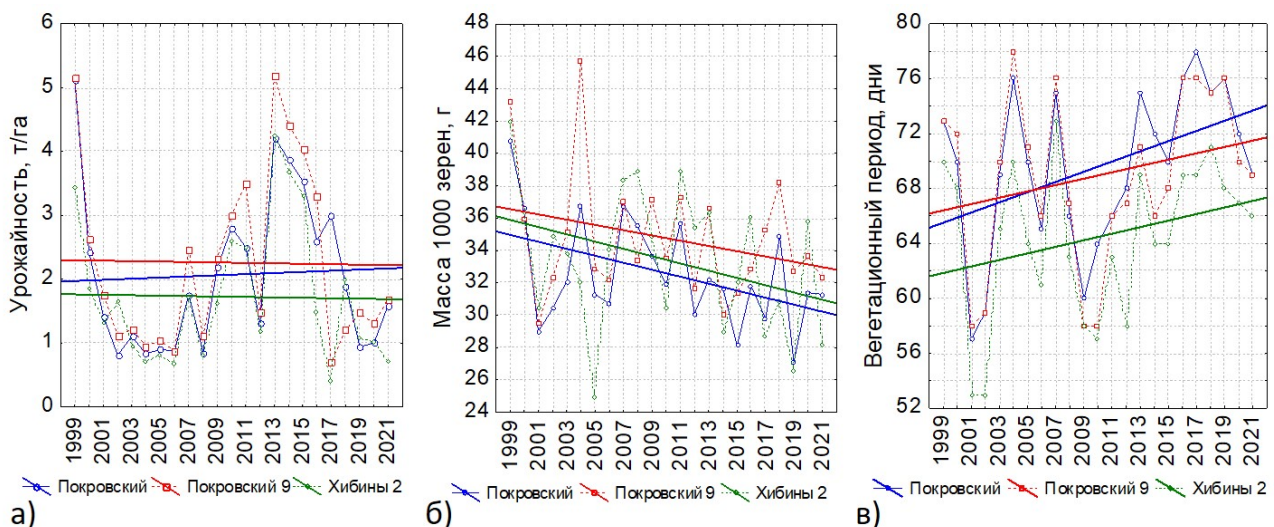


Рис. 6. Динамика хозяйственно ценных признаков трех сортов овса в Центральной Якутии (Покровский) в 1999–2021 гг.: а) урожайность; б) масса 1000 зерен; в) продолжительность вегетационного периода

Fig. 6. Dynamics of useful agronomic indicators for three oat cultivars in Central Yakutia (Pokrovsk) in 1999–2021: а) yield; б) 1000 grain weight; в) growing season duration

Высота растений (Н, см) зависела от осадков май – август:

$$H = 67,521 + 0,123P_{\text{май-авг}} \quad R^2=0,32 \quad (1)$$

Здесь и далее R^2 – коэффициент детерминации уравнения.

Длина метелки (L, см) зависела от осадков июля

$$(P_{\text{июл}}): \quad L = 13,985 + 0,040P_{\text{июл}} \quad R^2 = 0,21 \quad (2)$$

Число зерен в метелке (Z) зависело от осадков июня

$$(P_{\text{июн}}): \quad Z = 30,395 + 0,228P_{\text{июн}} \quad R^2 = 0,22 \quad (3)$$

Масса 1000 зерен (M_{1000} , г) зависела от снижения

$$ГТК_{\text{июн}}: \quad M_{1000} = 31,590 + 3,696ГТК_{\text{июн}} \quad R^2 = 0,20 \quad (4)$$

Урожайность (Y, т/га) зависела от ГТК июня:

$$Y = 0,903 + 2,054ГТК_{\text{июн}} \quad R^2 = 0,45 \quad (5)$$

Продолжительность вегетации (N, дни) увеличивалась в связи с ростом температуры июля ($T_{\text{июл}}$):

$$N = 122,584 + 2,883T_{\text{июл}} \quad R^2 = 0,49 \quad (6)$$

Все уравнения значимы на 5-процентном уровне. Для продуктивной кустистости, числа зерен в метелке значимых регрессионных зависимостей не выявлено.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции урожайности с хозяйственно ценными признаками и агрометеорологическими показателями районированных сортов овса в Центральной Якутии (Покровск), 1999–2021 гг.

Table 4. Coefficients of correlations between yield and agronomic/agrometeorological indicators for three oat cultivars in Central Yakutia (Pokrovsk), 1999–2021

Показатель	Покровский	Покровский 9	Хибины 2
Высота растений	0,60*	0,69*	0,60*
Длина метелки	0,60*	0,53*	0,52*
Число колосков в метелке	0,51*	0,65*	0,49*
Число зерен в метелке	0,57*	0,66*	0,61*
Масса зерна с растения	0,40	0,31	0,35
Масса 1000 зерен	0,27	0,13	0,29
Продуктивная кустистость	-0,03	0,07	0,10
Вегетационный период	0,28	-0,04	0,08
Температура мая	0,08	0,22	0,36
Температура июня	-0,17	-0,21	-0,19
Температура июля	-0,09	-0,07	-0,03
Температура августа	-0,02	-0,08	0,01
Осадки мая	0,25	0,26	0,38
Осадки июня	0,64*	0,65*	0,62*
Осадки июля	0,05	0,09	0,03
Осадки августа	-0,20	-0,18	-0,21
ГТК за июнь	0,65*	0,66*	0,62*
ГТК за июль	0,08	0,12	0,05
ГТК за август	-0,18	-0,16	-0,21
Сумма температур за май – август	-0,09	-0,07	0,05
Сумма температур за июнь – август	-0,14	-0,18	-0,10
Сумма осадков за май – август	0,22	0,26	0,23
Сумма осадков за июнь – август	0,16	0,20	0,13
ГТК за май – август	0,21	0,25	0,20
ГТК за июнь – август	0,17	0,22	0,14

Примечание: * – достоверно на 5-процентном уровне значимости

Note * – statistically significant at the 5% significance level

Таким образом, урожайность и элементы структуры урожая зависели от условий влагообеспеченности периода вегетации. Урожайность понижается в основном из-за уменьшения числа зерен в метелке, вызванного уменьшением осадков июня, а также из-за уменьшения массы 1000 зерен, вызванного снижением ГТК за июнь. Очень важно отметить, что за последние 23 года (1999–2021) среднесуточная температура воздуха в III декаде мая повысилась до 10,3°C, что позволяет высевать овес в более ранние сроки и более полно использовать увеличивающийся ресурс тепла.

Заключение

Во всех исследованных агроклиматических зонах Якутии (Центральной, Заречной и Среднененской) в 2014–2021 гг. наблюдали слабый (недостовверный) рост сумм температур за июнь – август, снижение осадков и ГТК.

Урожайность набора сортов овса на трех изученных ГСУ, расположенных в разных агроклиматических регионах Якутии, значительно различалась в годы исследования (2014–2021). На Олёкминском ГСУ (Среднененская

зона) средняя урожайность трех изученных сортов составила 3,10 т/га, на Мегино-Кангаласском ГСУ (Заречная зона) – 1,99 т/га и на Якутском ГСУ (Центральная зона) – 1,09 т/га. Регионы характеризовались разной степенью засушливости климата, ГТК составил 1,04, 0,80 и 0,60 единиц соответственно.

В последние годы (2014–2021) наблюдается снижение урожайности овса районированных сортов во всех трех исследованных зонах Якутии. Корреляционный анализ показал, что это связано с изменениями климата – активным потеплением и тенденцией к снижению количества осадков за вегетационный период овса.

Детальный анализ структуры урожайности районированных сортов овса в Центральной зоне Якутии подтвердил, что на структурные элементы большое влияние оказывают условия влагообеспеченности. Уменьшение осадков и ГТК за июнь – июль приводит к снижению таких показателей, как масса 1000 зерен, высота растения, длина метелки, урожайность.

Значительная изменчивость и зависимость урожайности овса и элементов ее структуры от условий увлажнения в Центральной и Заречной зонах свидетельствуют о необходимости продолжения селекционной работы по созданию засухоустойчивых сортов овса посевого, адаптированных к конкретным агроклиматическим условиям Якутии.

References / Литература

- A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2020. Moscow: Roshydromet; 2021. [in Russian] (Доклад об особенностях климата на территории РФ за 2020 год. Москва: Росгидромет; 2021). URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2021/doklad_klimat2020.pdf [дата обращения: 16.03.2023].
- Agriculture in the Republic of Sakha (Yakutia): Statistical digest (Selskoye khozyaystvo v Respublike Sakha [Yakutiya]). Yakutsk: Sakha(Yakutia)Stat; 2021. [in Russian] (Сельское хозяйство в Республике Саха (Якутия): Статистический сборник. Якутск: Саха(Якутия)стат; 2021).
- Batalova G.A. Condition and perspectives of grain forage crops selection and cultivation in Russia. *Grain Economy of Russia*. 2011;(3):11-14. [in Russian] (Баталова Г.А. Состояние и перспективы селекции и возделывания зернофуражных культур в России. *Зерновое хозяйство России*. 2011;(3):11-14).
- Boczowska M., Podyma W., Łapiński B. Oat. In: M. Singh, H.D. Upadhyaya (eds). *Genetic and Genomic Resources for Grain Cereals Improvement*. Cambridge, MA: Academic Press; 2016. p.159-225.
- Dospikhov V.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). Moscow: Kolos; 1979. [in Russian] (Доспехов В.А. Методика полевого опыта. Москва: Колос; 1979).
- Fedorov A.N., Svinoboev A.N. Changes in the air temperature of the surface air layer in the Republic of Sakha (Yakutia) (Izmeneniya temperatury vozdukha prizemnogo sloya vozdukha v Respublike Sakha [Yakutiya]). In: *Climate and Permafrost: Comprehensive Studies in Yakutia (Klimat i mertzlota: kompleksnyye issledovaniya v Yakutii)*. Yakutsk: Siberian Branch of the RAS; 2000. p.68-75. [in Russian] (Фёдоров А.Н., Свинобоев А.Н. Изменения температуры воздуха приземного слоя воздуха в Республике Саха (Якутия). В кн.: *Климат и мерзлота: комплексные исследования в Якутии*. Якутск: Сибирское отделение РАН; 2000. С.68-75).
- Galitsky D.N. Studying the ecological plasticity of linseed cultivars in southern forest-steppe of the Omsk region. *Modern Problems of Science and Education*. 2014;(4):515. [in Russian] (Галицкий Д.Н. Изучение экологической пластичности сортов льна масличного в условиях южной лесостепи Омской области. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;(4):515).
- Gong W., Ju Z., Chai J., Zhou X., Lin D., Su W. et al. Physiological and transcription analyses reveal the regulatory mechanism in oat (*Avena sativa*) seedlings with different drought resistance under PEG-induced drought stress. *Agronomy*. 2022;12(5):1005. DOI: 10.3390/agronomy12051005
- Handbook on the Climate of the USSR. Vol. 24, Part II. Leningrad: Hydrometeorological Publishers; 1966. [in Russian] (Справочник по климату СССР. Вып. 24, Часть II. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство; 1966).
- Handbook on the Climate of the USSR. Vol. 24, Part IV. Leningrad: Hydrometeorological Publishers; 1968. [in Russian] (Справочник по климату СССР. Вып. 24, Часть IV. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство; 1968).
- 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
- Khalafyan A.A. Statistica 6. Statistical data analysis (Statistica 6. Statisticheskiy analiz dannykh). Moscow: Binom; 2010. [in Russian] (Халафян А.А. Статистический анализ данных. Москва: Бинум; 2010).
- Kole C. (ed.). Genomic designing of climate-smart cereal crops. Cham: Springer; 2020. DOI: 10.1007/978-3-319-93381-8
- Korobeynikov N.I. The effectiveness of spring bread wheat breeding for resistance to common diseases and yield under the conditions of the Altai Territory (Rezultativnost selektsii yarovoy myagkoy pshenitsy na ustoychivost k rasprostranennym boleznyam i urozhaynost v usloviyakh Altayskogo kraya). In: *Status and Problems of Agricultural Science in Altai. Collection of Scientific Papers (Sostoyaniye i problemy selskokhozyaystvennoy nauki na Altaye. Sbornik nauchnykh rabot)*. Barnaul; 2010. p.149-166. [in Russian] (Коробейников Н.И. Результативность селекции яровой мягкой пшеницы на устойчивость к распространённым болезням и урожайность в условиях Алтайского края. В кн.: *Состояние и проблемы сельскохозяйственной науки на Алтае. Сборник научных работ*. Барнаул; 2010. С.149-166).
- Korzun O.S. Breeding and seed production of agricultural plants: a manual (Selektsiya i semenovodstvo selskokhozyaystvennykh rasteniy: posobiye). Grodno: Grodno State Agrarian University; 2010. [in Russian] (Корзун О.С. Селекция и семеноводство сельскохозяйственных растений: пособие. Гродно: Гродненский государственный аграрный университет; 2010).
- Loskutov I.G. Oat (*Avena L.*). Distribution, systematics, evolution, and breeding value (Oves (*Avena L.*). Rasprostraneniye, sistematika, evolyutsiya i selektsionnaya tsennost). St Petersburg: VIR; 2007. [in Russian] (Лоскутов И.Г. Овес (*Avena L.*). Распространение, систематика, эволюция и селекционная ценность. Санкт-Петербург: ВИР; 2007).

- Loskutov I.G., Novikova L.Yu., Kovaleva O.N., Ivanova N.N., Blinova E.V., Belskaya G.V. Ecological-geographic approaches to the study of genetic diversity of barley and oat from the VIR collection. *Ecological Genetics*. 2020;18(1):89-102. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Новикова Л.Ю., Ковалева О.Н., Иванова Н.Н., Блинова Е.В., Бельская Г.В. Эколого-географические подходы к изучению генетического разнообразия ячменя и овса из коллекции ВИР. *Экологическая генетика*. 2020;18(1):89-102). DOI: 10.17816/ecogen16128
- Lyubimova A.V., Mamaeva V.S., Menshchikova A.A. Genetic drought resistance of modern oat varieties as a response to global climate change. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2022;6(221):49-59. [in Russian] (Любимова А.В., Мамаева В.С., Менщикова А.А. Генетическая засухоустойчивость современных сортов овса посевного как ответ глобальному изменению климата. *Аграрный вестник Урала*. 2022;6(221):49-59). DOI: 10.32417/1997-4868-2022-221-06-49-59
- Malkova G.V., Pavlov A.V., Skachkov Yu.B. Assessment of the stability of frozen strata under modern climate changes (Otsenka ustoychivosti merzlykh tolshch pri sovremennykh izmeneniyakh klimata). *Earth's Cryosphere*. 2011;15(4):33-36. [in Russian] (Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б. Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата. *Криосфера Земли*. 2011;15(4):33-36).
- Methodology for state crop variety trials. First issue. General provisions (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vypusk pervy. Obshchaya chast). Moscow: Gossortkomissiya; 2019. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск первый. Общая часть. Москва: Госсорткомиссия; 2019).
- Mohammadi M., Finnan J., Baker C., Sterling M. The potential impact of climate change on oat lodging in the UK and Republic of Ireland. *Advances in Meteorology*. 2020;2020:4138469. DOI: 10.1155/2020/4138469
- Novikova L.Yu., Dyubin V.N., Loskutov I.G., Zuev E.V., Kovaleva O.N., Porokhvinova E.A. et al. Analysis of economical valuable characters of cereals cultivars under climate change conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2013;173:102-119. [in Russian] (Новикова Л.Ю., Дюбин В.Н., Лоскутов И.Г., Зуев Е.В., Ковалева О.Н., Пороховинова Е.А. и др. Анализ динамики хозяйственно-ценных признаков сортов сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2013;173:102-119).
- Petrova L.V. Oat breeding in the environments of Yakutia (Seleksiya ovsa v usloviyakh Yakutii). Novosibirsk; 2018. [in Russian] (Петрова Л.В. Селекция овса в условиях Якутии. Новосибирск; 2018).
- Skachkov Yu.B. Trends of modern changes in air temperature in the Republic of Sakha (Yakutia) (Tendentsii sovremennykh izmeneniy temperatury vozdukh v Respublike Sakha [Yakutiya]). *Voprosy geografii Yakutii = Issues of the Geography of Yakutia*. 2005;(9):27-31. [in Russian] (Скачков Ю.Б. Тенденции современных изменений температуры воздуха в Республике Саха (Якутия). *Вопросы географии Якутии*. 2005;(9):27-31).
- Surin N.A. Adaptive potential of grain varieties of Siberian breeding and ways of its improvement (wheat, barley, oats): a monograph (Adaptivny potentsial sortov zernovykh kultur sibirskoy seleksii i puti yego sovershenstvovaniya [pshenitsa, yachmen, oves]: monografiya). Novosibirsk; 2011. [in Russian] (Сурин Н.А. Адаптивный потенциал сортов зерновых культур сибирской селекции и пути его совершенствования (пшеница, ячмень, овес): монография. Новосибирск; 2011).
- Surin N.A., Lyakhova N.E., Gerasimov S.A., Lipshin A.G. Integrated assessment of adaptive ability of barley samples from VIR collection under conditions of Krasnoyarsk forest-steppe. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2016;30(6):32-35. [in Russian] (Сурин Н.А., Ляхова Н.Е., Герасимов С.А., Липшин А.Г. Интегрированная оценка адаптивной способности образцов ячменя из коллекции ВИР в условиях Красноярской лесостепи. *Достижения науки и техники АПК*. 2016;30(6):32-35).
- Surin N.A., Lyakhova N.E., Pushkina G.A., Lisunova S.N., Kolchanov V.V. Special genetics and breeding of field crops in Siberia (Chastnaya genetika i seleksiya polevykh kultur v Sibiri). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University; 2006. [in Russian] (Сурин Н.А., Ляхова Н.Е., Пушкина Г.А., Лисунова С.Н., Колчанов В.В. Частная генетика и селекция полевых культур в Сибири. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет; 2006).
- The system of agriculture in the Republic of Sakha (Yakutia) for the period of 2021–2025: guidelines (Sistema vedeniya selskogo khozyaystva v respublike Sakha [Yakutiya] na period 2021–2025 gody: metodicheskoye posobiye). Belgorod: K.Yu. Sangalov's Publishing House; 2021. [in Russian] (Система ведения сельского хозяйства в республике Саха (Якутия) на период 2021–2025 годы: методическое пособие. Белгород: Издательство Сангалова К.Ю.; 2021).
- Varlamov S.M., Kim E.S., Khan E.N. Modern temperature changes in Eastern Siberia and the Russian Far East (Sovremennye izmeneniya temperatury v Vostochnoy Sibiri i na Dalnem Vostoke Rossii). *Russian Meteorology and Hydrology*. 1998;(1):19-28. [in Russian] (Варламов С.М., Ким Е.С., Хан Е.Н. Современные изменения температуры в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России. *Метеорология и гидрология*. 1998;(1):19-28).
- Vidovic I., Sochorcova L. Vjhyv potencialnej smeny klimy na urody zrna pseni ce Zetneh F. Ozimnej (*Triticum aestivum*) v podmienkach kukuricnej virobnej oblasti Slovenka. *Agriculture*. 2004;50(10/12):187-198. [in Slovak]

Информация об авторах

Лидия Владимировна Петрова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени М.Г. Сафронова – обособленное подразделение ЯНЦ СО РАН, 677001 Россия, Якутск, ул. Бестужева-Марлинского, 23/1, petrovalidblad@mail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0762-716X>

Любовь Юрьевна Новикова, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, заведующая отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений име-

ни Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, l.novikova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4051-3671>

Александра Васильевна Алексеева, начальник отдела, Государственное бюджетное учреждение Республики Саха (Якутия) «Служба земледелия РС(Я)», 677027 Россия, Якутск, ул. Каландаришвили, 3, alva2401@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7533-5348>

Игорь Градиславович Лоскутов, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, i.loskutov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9250-7225>

Information about the authors

Lidia V. Petrova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, M.G. Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, division of the YSC SB RAS, 23/1 Bestuzheva-Marlinskogo St., Yakutsk 677001, Russia, petrovalidblad@mail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0762-716X>

Liubov Yu. Novikova, Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Head of a Department, 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>

Alexandra V. Alekseeva, Head of a Department, Agriculture Service of the Republic of Sakha (Yakutia), 3 Kalandarishvili St., Yakutsk 677027, Russia, alva2401@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7533-5348>

Igor G. Loskutov, 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, i.loskutov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9250-7225>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 17.07.2023; одобрена после рецензирования 17.10.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 17.07.2023; approved after reviewing on 17.10.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья

УДК 633.367.2:543.42

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-99-108



Экспресс-оценка основных показателей хозяйственной ценности в образцах муки люпина узколистного с помощью ИК-спектроскопии

В. С. Попов, А. В. Саликова, И. Н. Перчук, Н. Г. Конькова, Г. П. Егорова, М. А. Вишнякова, Т. В. Шеленга

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

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Васильевна Шеленга, tatianashelenga@yandex.ru

Актуальность. Разработана калибровочная модель для экспресс-оценки хозяйственно ценных показателей (содержание белка, масла, хинолизидиновых алкалоидов) в семенах люпина узколистного из коллекции ВИР методом спектроскопии в ближней инфракрасной области спектра, с помощью которой возможно определить направление дальнейшего использования образцов.

Материалы и методы. Биохимические показатели качества (содержание белка, масла, хинолизидиновых алкалоидов) изучали в семенах люпина узколистного (*Lupinus angustifolius* L.), выращенного в 2019 г. на северо-западе Российской Федерации. Градуировочные модели по определению белка, масла и алкалоидов в семенах люпина (62 образца) разработаны с использованием ИК-анализатора MATRIX-I (Bruker Optics, Германия). Для построения градуировочных моделей использовали значения, полученные химическими методами анализа, принятыми в ВИР. Содержание масла в семенах люпина определяли методом сухого обезжиренного остатка в аппаратах Сокслета, белка – методом Кьельдаля, хинолизидиновых алкалоидов – газовой хроматографией, сопряженной с масс-спектрометрией. Все показатели пересчитывали на сухой вещество образца.

Результаты и заключение. Достоверность разработанных моделей проверяли по результатам определения содержания белка, масла и алкалоидов у семян проверочной партии. Данные по содержанию белка и масла, полученные с помощью калибровочной кривой, не имели достоверных различий с результатами химических исследований, в отличие от показателей алкалоидов. Следовательно, разработанная калибровочная модель для ИК-анализатора MATRIX-I может быть использована для экспресс-оценки содержания белка и масла в образцах муки люпина узколистного, что позволяет ускорить процесс получения данных по основным хозяйственно ценным показателям. Проведение анализа не требует реактивов и является безопасным.

Ключевые слова: люпин, калибровочная модель, метод ИК-спектроскопии, белок, масло, алкалоиды

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану 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: Попов В.С., Саликова А.В., Перчук И.Н., Конькова Н.Г., Егорова Г.П., Вишнякова М.А., Шеленга Т.В. Экспресс-оценка основных показателей хозяйственной ценности в образцах муки люпина узколистного с помощью ИК-спектроскопии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):99-108. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-99-108

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-99-108

Rapid assessment of the main economic value indicators in lupine flour samples using infrared spectroscopy

Vitaliy S. Popov, Aleksandra V. Salikova, Irina N. Perchuk, Nina G. Konkova, Galina P. Egorova,
Margarita A. Vishnyakova, Tatiana V. Shelenga

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

Corresponding author: Tatiana V. Shelenga, tatianashelenga@yandex.ru

Background. A calibration model has been developed for rapid assessment of economic value indicators (protein, oil, and quinolizidine alkaloid contents) in the seeds of narrowleaf lupine accessions from VIR using near-infrared spectroscopy, with the help of which it is possible to decide on the further use of the accessions.

Materials and methods. Biochemical quality indicators (protein, oil, and quinolizidine alkaloid content) were studied in the seeds of narrowleaf lupine (*Lupinus angustifolius* L.) grown in 2019 in the northwest of Russia. Calibration models for measuring protein, oil and alkaloids in lupine seeds (62 accessions) were developed using a MATRIX-I IR analyzer (Bruker Optics, Germany). To construct calibration models, we used the values obtained by chemical analysis methods accepted at VIR. The oil content in lupine seeds was assessed by the defatted dry residue technique in Soxhlet extractors, protein by the Kjeldahl method, and quinolizidine alkaloids by gas chromatography coupled with mass spectrometry. All indicators were recalculated on the dry-weight basis.

Results and conclusion. Statistical significance of the developed models was verified according to the results of measuring the content of protein, oil and alkaloids in the seeds of the test batch. The protein and oil content data obtained using a calibration curve did not differ significantly from the results of chemical studies, in contrast to alkaloid indicators. Consequently, the developed calibration model for the MATRIX-I IR analyzer can be used for rapid assessment of protein and oil content in narrowleaf lupine flour samples, thus accelerating the process of obtaining data on the main economic value indicators. The analysis does not require reagents and is safe.

Keywords: lupine, calibration model, IR spectroscopy, protein, oil, alkaloids

Acknowledgments: 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: Popov V.S., Salikova A.V., Perchuk I.N., Konkova N.G., Egorova G.P., Vishnyakova M.A., Shelenga T.V. Rapid assessment of the main economic value indicators in lupine flour samples using infrared spectroscopy. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):99-108. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-99-108

Введение

Люпин узколистный (*Lupinus angustifolius* L.) – перспективная и высокоадаптивная зернобобовая культура, подходящая для различных направлений использования. Значительное содержание белка (32–38%) и масла (5,0–6,5%) (Naumkin et al., 2009), учитывая аминокислотный и жирнокислотный состав, делает культуру привлекательной для использования в качестве высокобелковой кормовой добавки в животноводстве, расширения линейки продуктов здорового питания, включая вегетарианскую диету (Ageeva et al., 2018). Ограничением для пищевого и кормового использования является возможность накопления в семенах люпина узколистного значительных количеств хинолизидиновых алкалоидов. Высокоалкалоидные сорта (с содержанием алкалоидов более 40 мг/100 г) широко используются в качестве сырья для изготовления лекарственных препаратов (Timoshenko et al., 2022). Таким образом, биологическая ценность и направление использования люпина узколистного определяется его биохимическим составом.

Коллекция генетических ресурсов люпина узколистного ВИР представлена низко- и высокоалкалоидными формами диких, местных и селекционных образцов из разных стран мира. Изучение биохимического состава коллекционного материала дает возможность выявить образцы – источники хозяйственно ценных признаков, которые можно непосредственно использовать для кормовых, пищевых и фармакологических целей, в том числе включать в селекционные программы по созданию новых сортов люпина узколистного с улучшенным биохимическим составом для различных целей использования.

В связи с вышесказанным контроль за основными хозяйственно ценными показателями семян люпина узколистного является одним из ключевых звеньев для определения направления использования того или иного образца. Рутинным методом изучения содержания белка в растительных объектах является метод Кьельдаля, содержания масла – по сухому обезжиренному остатку в аппаратах Сокслета. Качественный и количественный состав хинолизидиновых алкалоидов в ВИР определяется по недавно разработанному методу (Kushnareva et al., 2020). Однако для изучения большого количества образцов семян и муки различных культур применяется спектроскопия в ближней области инфракрасного спектра (БИК) с использованием ИК-анализаторов, таких как Matrix-I (Bruker, Германия) (Burns, Ciurczak, 2007; Efimenko et al., 2015; Efimenko et al., 2016; Abd Manaf, Yap, 2018; Efimenko S.G., Efimenko S.K., 2019). Метод основан на возбуждении колебания молекул при прохождении ИК-излучения через образец (Wheeler, 1959; Vaccari et al., 1990; Burns, Ciurczak, 2007; Abd Manaf, Yap, 2018) и характеристиках процесса возбуждения, которые зависят от особенностей сканируемого материала. Зависимость свойств индивидуальных ИК-спектров от данных, полученных другими аналитическими методами посредством программного обеспечения, сопровождающего ИК-анализаторы, дают возможность получить калибровочные кривые, которые можно использовать для экспресс-анализа образцов (семян, муки и т. д.) (Efimenko et al., 2015; Efimenko et al., 2016; Abd Manaf, Yap, 2018; Efimenko S.G., Efimenko S.K., 2019). В текущей работе была апробирована возможность использования метода ИК-спектроскопии для оценки содержания белка и масла, отдельных ал-

калоидов и их суммы в муке семян высоко- и низкоалкалоидных форм люпина узколистного.

Целью данной работы явилась разработка градуировочных моделей для оценки основных показателей хозяйственной ценности (содержание масла, белка, общее содержание хинолизидиновых алкалоидов, содержание отдельных алкалоидов: люпина, гидроксилюпина, спартеина, изолюпина и ангустифолина) в муке образцов люпина узколистного (всего 62 образца). Проведена апробация полученных калибровочных кривых и оценка достоверности результатов, полученных с применением ИК-анализатора Matrix-I.

Ценность полученных калибровочных кривых состоит в снижении стоимости скрининга образцов люпина узколистного по основным показателям хозяйственной ценности (белок, масло, содержание алкалоидов), увеличении производительности труда (рост количества образцов, анализируемых за единицу рабочего времени). При необходимости разработанные ИК-модели калибровочных кривых возможно обновлять и дополнять новыми данными, полученными для образцов последующих лет репродукций, что дает возможность увеличения достоверности результатов ИК-калибровочных кривых. В дальнейшем необходим переход на зерновой модуль, что важно для сохранения ценного селекционного материала.

Материалы и методы

Объектом для построения калибровки служила выборка из 62 образцов люпина узколистного из коллекции ВИР (32 высокоалкалоидные формы и 30 низкоалкалоидных) (табл. 1). Все образцы выращивались в 2019 г. в условиях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» согласно методике, принятой для зернобобовых культур (Vishnyakova et al., 2018). Район выращивания относится к атлантического континентальной области умеренного климатического пояса. Сумма активных температур в год репродукции составила 1966°C, осадки – 175 мм, что соответствует типичным климатическим показателям региона.

Семена люпина узколистного предварительно измельчались на лабораторной мельнице Lab mill-1 (Labor tim, Венгрия) до состояния мелкодисперсной муки с размером частиц до 10 мкм. Образцы муки массой 40–50 г хранились в металлических коробках при комнатной температуре от 3 до 5 дней до проведения анализа. Биохимический анализ проводился в отделе биохимии и молекулярной биологии по методикам, принятым в ВИР (Ermakov et al., 1987).

Содержание белка определялось по методу Кьельдаля на автоматическом анализаторе белка VELP SCIENTIFICA UDK 159 (VELP, Италия). Общее содержание белка рассчитывалось по общему содержанию азота с коэффициентом 6.25. Содержание масла изучалось по массе сухого обезжиренного остатка с использованием аппарата Сокслета. Содержание алкалоидов определялось в экстрактах из образцов муки люпина узколистного, полученных добавлением этилацетата и водного раствора NaOH, на газовом хроматографе Agilent 6850, сопряженном с масс-спектрометром Agilent 5975 (Agilent Technologies, США). Значения показателей выражались в процентах на сухое вещество.

Спектры образцов муки люпина узколистного (высоко- и низкоалкалоидные формы) регистрировались в диапазоне 4000–10 500 см⁻¹ с разрешением 16 см⁻¹ в соот-

Таблица 1. Список образцов *Lupinus angustifolius* L. из коллекции ВИР, взятых в исследование
Table 1. List of *Lupinus angustifolius* L. accessions from the VIR collection selected for the study

№ по каталогу ВИР	Название	Происхождение	№ по каталогу ВИР	Название	Происхождение
96		Украина	3562	SLAPSKA	Чехословакия
140		Шотландия	3563	ROMMEL	ЮАР
1344	C-63	Россия	3565	STEVENS	ЮАР
1526	МЕСТНЫЙ	Украина	3605	SCHLOETENITZER ROTE	Германия
1546		Франция	3607	NS 028 B	Испания
2121	LA1	Польша	3623	18 86A250-2-4 EX LR2	Австралия
2183	IGRIS	Польша	3627	ДИКАФ-1	Россия
2248	№104	Россия	3628	ДИКАФ-11	Россия
2265	VIETEJE AILE	Латвия	3694	СНЕЖЕТЬ	Россия
2438	12-65-3-М (BITTER)	Великобритания	3758	16 85 A 198-118	Австралия
2570	MIRELA	Польша	3761	BOLIVIO	Германия
2662	EMIR	Польша	3779	84 S 065-26-7-3	Австралия
2831	ЛАФ-РБС/2	Беларусь	3784	84 S 065-47-1-1	Австралия
2856	AFRICA DE SUC	Африка	3804	СМЕНА	Россия
2868	LUP 155/80	Франция	3814	ОЛИГАРХ	Россия
2949	ДАНКО	Беларусь	3816	ЛАДНЫЙ 7	Россия
3048	81 A/105-3	Австралия	3842	ВЛАДЛЕН	Беларусь
3059	GUNGURRU	Австралия	3918	ГЕРКУЛЕС	Беларусь
3062	75 A/327	Австралия	3920	ЖОДЗИНСКИ	Беларусь
3064	75 A/330	Австралия	3922	ЛИПЕНЬ	Беларусь
3172	ГЛ-396	Беларусь	3923	МИТАН	Беларусь
3327	ТИМИРЯЗЕВСКИЙ 2	Россия	3926	РАННИ	Беларусь
3329	ЛИНИЯ 7	Россия	3929	СИНИЙ 16	Беларусь
3456	GS 178D	Испания	3932	ЩУЧИНСКИЙ 470	Беларусь
3457	GRC-5008 A	Греция	3939	СИДЕРАТ 46	Россия
3502	L-155	Польша	3947	БСЦ 15-14	Россия
3503	МУТАНТ 2	Россия	3949	СН 78-07	Россия
3508	БРЯНСКИЙ 268	Россия	1534		Литва
3526	БСХА-490	Беларусь	3455	G 077	Италия
3528	БСХА-506	Беларусь	3805	ВЕКТОР	Россия
3556	GRC-5060A	Греция	3832	ЯН	Беларусь

ветствии с руководством для ИК-спектрометра Matrix-I (рис. 1). Спектры для каждого образца регистрировались в трех повторностях с пересыпанием муки образца в кювете диаметром 51 мм (навеска 20–30 г). В результате получено 186 спектров, из них 96 для высокоалкалоидных и 90 для низкоалкалоидных форм люпина узколистного. С использованием полученных спектров методом векторной нормализации были построены градуировочные модели по определению общего содержания алкалоидов, отдельных алкалоидов: люпанина (рис. 2), гидроксилупанина, ангустифолина (рис. 3), изолюпанина, спартеина, суммарное содержание хинолизидиновых алкалоидов (рис. 4), белка (рис. 5), масла (рис. 6). Определение спектральных особенностей, обработка биохимических данных, построение моделей калибровочных кривых осуществлялись с помощью программного обеспечения OPUS Software.

Так как калибровочные кривые, построенные для отдельных алкалоидов и их общего содержания, имеют примерно одинаковые характеристики, то в тексте приводится описание калибровочных моделей для люпанина, ангустифолина и суммы хинолизидиновых алкалоидов (см. рис. 2, 3, 4).

На рисунках 2, 3 и 4 представлены калибровочные кривые для люпанина, ангустифолина и общего содержания алкалоидов в муке люпина узколистного. Предсказанные значения трех повторностей имели малую дисперсию, большая часть значений группировалась в левом нижнем углу, остальные значения были рассеяны вдоль оси X (см. рис. 2, 3, 4). Зеленым отмечены учтенные, красным – неучтенные значения содержания алкалоидов в образцах муки из семян люпина узколистного.

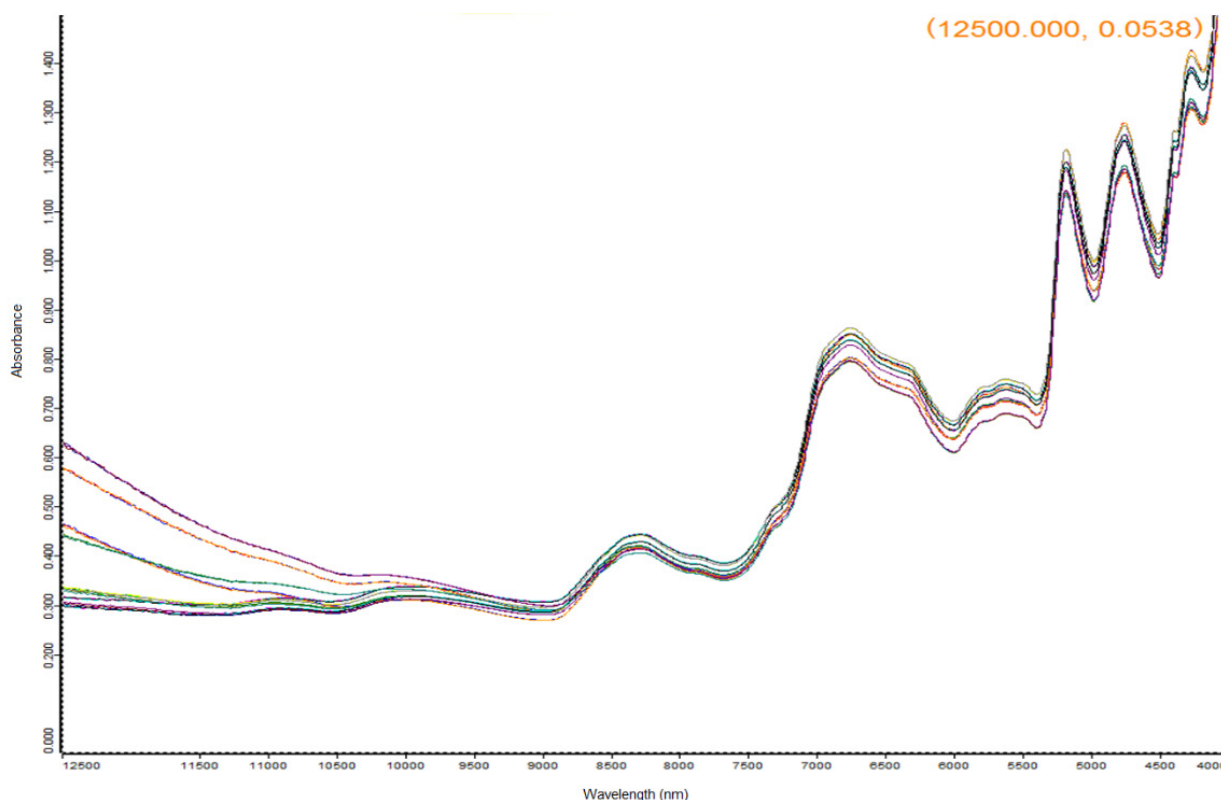


Рис. 1. ИК-спектры образцов муки высоко- и низкоалкалоидных форм *Lupinus angustifolius* L.

Fig. 1. IR spectra of flour samples from high- and low-alkaloid forms of *Lupinus angustifolius* L.

Результаты и их обсуждение

Общее содержание хинолизидиновых алкалоидов и показатели отдельных алкалоидов существенно влияют на направление использования каждого образца люпина узколистного. Для разработки градуировочных моделей необходимо установить зависимость содержания алкалоидов (мг/100г) в образцах муки семян люпина узколистного от характеристик спектров соответствующих образцов муки. Взаимосвязь устанавливается автоматически с помощью программного обеспечения OPUS.

По результатам анализа диапазон изменчивости алкалоидов составил: люпанина – от 1569,81 до 1,6; ангустифолина – от 35,33 до 0,04; гидроксилупанина – от 273,73 до 0,3; спартеина – от 173,16 до 0,2; изолюпанина – от 23,76 до 0,02 мг/100 г. Сумма алкалоидов – от 2013,45 до 2,01 мг/100 г.

Полученные модели для люпанина и ангустифолина имели очень низкие значения коэффициента детерминации (R^2): 22,66 и 21,29 при 5 и 3 рангах в многофакторном анализе соответственно. Несколько лучший результат показала модель, полученная для суммы хинолизидиновых алкалоидов: $R^2 = 54,48$ при 7 рангах. Среднеквадратичная ошибка прогнозирования (RMSEP) составила 262% для люпанина, 57,2% для ангустифолина и 211% для суммы алкалоидов. Следовательно, при использовании данных моделей для измерения содержания алкалоидов в муке люпина узколистного совпадение предсказанных значений с истинными невозможно. Показатель RPD (остаточное отклонение прогноза, или значение остаточного отклонения прогноза для ранга) разработанной калибровочной модели оценивает стабильность полученной зависимости, BIAS (показатель смещения, или статистической предвзятости) демонстрирует,

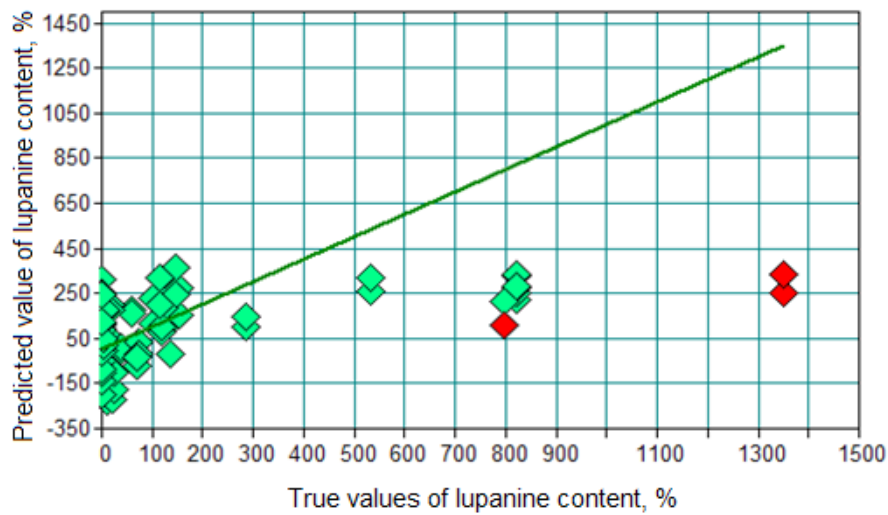


Рис. 2. График предсказанных значений содержания люпанина (ось Y) по сравнению с истинными значениями (ось X) согласно градуировочной модели «Люпин узколистный. Люпанин»
Fig. 2. Graph of predicted lupanine content values (Y-axis) compared to true values (X-axis) according to the calibration model "Narrowleaf lupine. Lupanine"

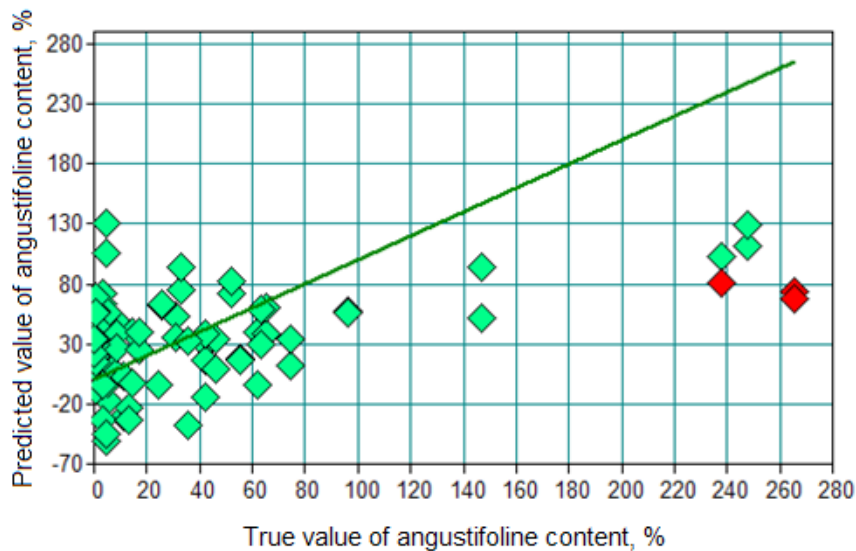


Рис. 3. График предсказанных значений содержания ангиустифолина (ось Y) по сравнению с истинными значениями (ось X) согласно градуировочной модели «Люпин узколистный. Ангиустифолин»
Fig. 3. Graph of predicted angustifoline content values (Y-axis) compared to true values (X-axis) according to the calibration model "Narrowleaf lupine. Angustifoline"

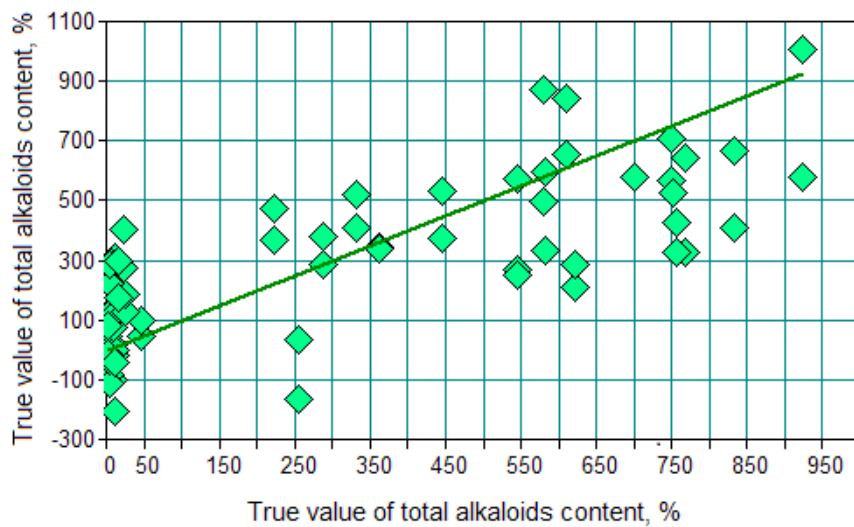


Рис. 4. График предсказанных значений суммарного содержания хинолизидиновых алкалоидов (ось Y) по сравнению с истинными значениями (ось X) согласно градуировочной модели «Люпин узколистный. Сумма хинолизидиновых алкалоидов»

Fig. 4. Graph of predicted total quinolizidine alkaloid content values (Y-axis) compared to true values (X-axis) according to the calibration model "Narrowleaf lupine. Total quinolizidine alkaloids"

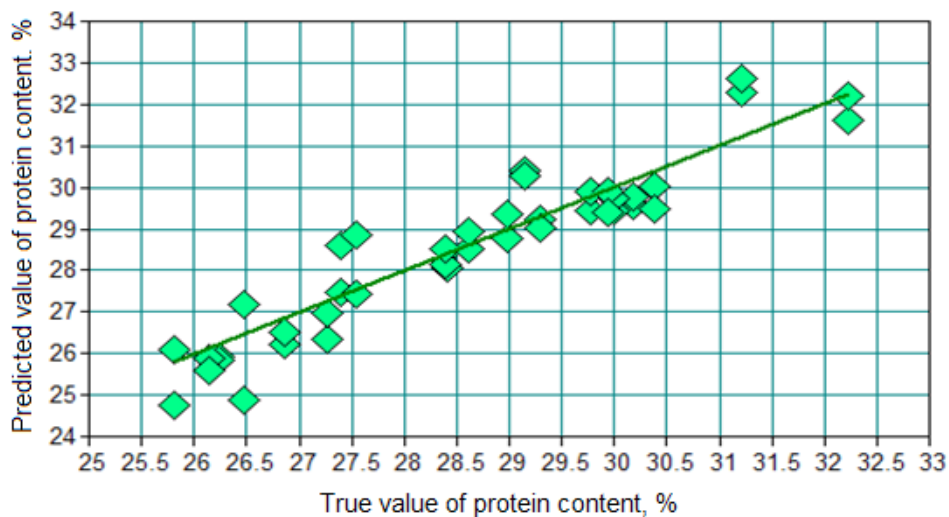


Рис. 5. График предсказанных значений содержания белка (ось Y) по сравнению с истинными значениями (ось X) согласно градуировочной модели «Люпин узколистный. Белок»

Fig. 5. Graph of predicted protein content values (Y-axis) compared to true values (X-axis) according to the calibration model "Narrowleaf lupine. Protein"

насколько существенно отклоняется прогнозируемое значение от истинного. Для калибровочных моделей люпина, ангустифолина и суммы алкалоидов RPD равнялся 1,17; 1,13 и 1,48; BIAS соответствовал 63,2; 64,9 и -1,45, что свидетельствует о возможности значительного отклонения результатов, полученных с помощью построенной модели, от реальных значений (Efimenko et al., 2015; Efimenko et al., 2016; Efimenko S.G., Efimenko S.K., 2019).

Таким образом, полученные модели калибровочных кривых не подходят для изучения содержания хинолизидиновых алкалоидов в муке люпина узколистного, однако характеристики калибровочной модели, полученной для суммы хинолизидиновых алкалоидов, позволяет предположить, что при расширении калибровочной кривой (увеличении количества образцов, включенных в модель) достоверность полученных с ее помощью результатов будет возрастать. В ходе проведенного эксперимента установлено, что использование ИК-калибровочной кривой для определения содержания хинолизидиновых алкалоидов в образцах муки люпина узколистного нецелесообразно.

Для низкоалкалоидных форм люпина узколистного существенное значение имеют показатели пищевой и кормовой ценности. К таким параметрам для люпина узколистного относятся содержание белка и масла. Для построения калибровочной модели по определению белка и масла было отобрано 30 образцов семян люпина узколистного с низким содержанием алкалоидов. Диапазон варьирования белка в изученной выборке оказался от 27,8 до 34,7%, масла – от 3,3 до 6,0%. Используя ИК-спектры и результаты анализа содержания белка и масла, полученные для муки низкоалкалоидных образцов люпина узколистного, были построены соответствующие градуировочные модели (рис. 5, 6).

На рисунках 5 и 6 представлены калибровочные модели для определения содержания белка и масла в муке люпина узколистного. Прогнозируемые значения трех повторностей демонстрировали небольшую дисперсию и располагались либо на калибровочной линии, либо ря-

дом с ней. Модели, полученные для белка и масла, имели достаточно высокий коэффициент детерминации (85,02 и 78,53) с 12 и 11 рангами при многомерном анализе соответственно. RMSEP для них составляла 0,67 и 0,235%, что дает надежную повторяемость полученных результатов; RPD – 2,5 и 2,22 соответственно, что говорит об «удовлетворительном качестве» построенных калибровочных моделей (Efimenko et al., 2015; Efimenko et al., 2016; Efimenko S.G., Efimenko S.K., 2019); BIAS – 0,0728 и -0,0557 соответственно, что подтверждает практически полное совпадение реальных результатов с результатами, полученными с помощью построенных моделей.

Для подтверждения достоверности показателей белка и масла, полученных с помощью построенной калибровочной модели, была проведена сверка данных химического анализа и ИК-спектроскопии на контрольной выборке образцов семян люпина узколистного (табл. 2).

Различия между ИК показаниями и химическими анализами по содержанию белка и масла в среднем составили 0,51 и 0,87%. Расхождение составило менее 1%, с максимальной ошибкой в единичных определениях до 1%, что укладывается в рамки технической погрешности прибора Matrix-I.

Заключение

Таким образом, разработанные в программе OPUS LAB калибровочные модели для определения содержания белка и масла в муке из семян люпина узколистного позволяют оценивать селекционный материал с точностью до 1% и подходят для рутинного анализа. Это позволяет оперативно проводить предварительную оценку селекционного материала одновременно по двум показателям (содержание белка и масла) в примерно 100 образцах за рабочую смену. Следовательно, калибровочные кривые для экспресс-оценки содержания белка и масла в муке низкоалкалоидных образцов люпина узколистного могут быть рекомендованы для дальнейшего использования.

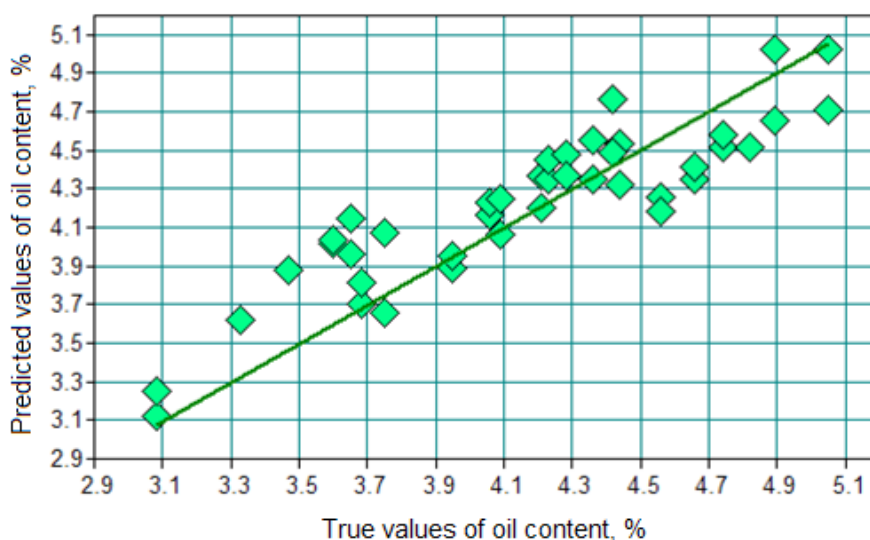


Рис. 6. График предсказанных значений содержания масла (ось Y) по сравнению с истинными значениями (ось X) согласно градуировочной модели «Люпин узколистный. Масло»

Fig. 6. Graph of predicted oil content values (Y-axis) compared to true values (X-axis) according to the calibration model "Narrowleaf lupine. Oil"

Таблица 2. Проверка ИК-градуировочной модели для определения содержания белка и масла в образцах муки семян люпина узколистного из коллекции ВИР

Table 2. Testing of the IR calibration model for measuring protein and oil content in flour samples from the seeds of *Lupinus angustifolius* L. accessions preserved in the VIR collection

Признак	N	$X_1 \pm S_e$	$X_2 \pm S_e$	Разница
Белок	48	33,46 ± 0,251	34,97 ± 0,51	0,51
Масло	48	4,72 ± 0,139	6,84 ± 1,52	0,87

Примечание: X_1 – средняя значений, полученных с помощью методов биохимического анализа; X_2 – средняя значений, полученных с помощью модельных калибровочных кривых; S_e – стандартное отклонение

Note: X_1 is the mean of the values obtained with biochemical methods; X_2 is the mean of the values obtained with the model calibration curves; S_e is the standard deviation

References / Литература

Abd Manaf F.Y., Yap A.K.C. Automatic crude oil dilution control with premium oil segregation using near infrared (NIR) on-line system. *Journal of Oil Palm Research*. 2018;30(2):2-9. DOI: 10.21894/jopr.2018.0012

Ageeva P.A., Pochutina N.A., Pigareva S.A. Comparative characteristics of grain and green mass quality of fodder narrow-leaved lupin varieties. *Adaptive Fodder Production*. 2018;(1):42-48. [in Russian] (Агеева П.А., Почутина Н.А., Пигарева С.А. Сравнительная характеристика кормовых сортов узколистного люпина по качеству зерна и зеленой массы. *Адаптивное кормопроизводство*. 2018;(1):42-48).

Burns D.A., Ciurczak E.W. (eds). Handbook of near-infrared analysis. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2007. DOI: 10.1201/9781420007374

Efimenko S.G., Efimenko S.K. Determination of oil and moisture contents in mustard seeds using IR spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2019;4(180):36-44. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К. Определение содержания масла и влаги в семенах горчицы с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2019;4(180):36-44). DOI: 10.25230/2412-608X-2019-4-180-36-44

Efimenko S.G., Efimenko S.K., Kucherenko L.A., Nagalevska Ya.A. Quick-assay of the content of the main fatty acids in oil of rapeseed seeds by means of IR-spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2015;4(164):35-40. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К., Кучеренко Л.А., Нагалеvская Я.А. Экспресс-оценка содержания основных жирных кислот в масле семян рапса с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2015;4(164):35-40).

Efimenko S.G., Kucherenko L.A., Efimenko S.K., Nagalevska Ya.A. Evaluation of the general qualitative traits of soybean seeds using IR-spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2016;3(167):33-38. [in Russian] (Ефименко С.Г., Кучеренко Л.А., Ефименко С.К., Нагалеvская Я.А. Оценка основных показателей качества семян сои с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2016;3(167):33-38).

Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P., Peruanskiy Yu.V., Lukovnikova G.A., Ikonnikova M.I. Methods of biochemical research in plants (Metody biokhimeskogo issledovaniya rasteniy). A.I. Ermakov (ed.). 3rd ed. Leningrad: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Ермаков А.И., Ара-

симович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А., Иконникова М.И. Методы биохимического исследования растений / под ред. А.И. Ермакова. 3-е изд. Ленинград: Агропромиздат; 1987).

Kushnareva A.V., Shelenga T.V., Perchuk I.N., Egorova G.P., Malyshev L.L., Kerv Yu.A. et al. Selection of an optimal method for screening the collection of narrow-leaved lupine held by the Vavilov Institute for the qualitative and quantitative composition of seed alkaloids. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(8):829-835. DOI: 10.18699/VJ20.680

Naumkin V.N., Naumkina L.A., Sergeeva V.A., Artgukhov A.I., Lukashevich M.I. Lupin crops prospects in the Central Black-Soil Zone. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2009;(1):27-29. [in Russian] (Наумкин В.Н., Наумкина Л.А., Сергеева В.А., Артюхов А.И., Лукашевич М.И. Перспективы культуры люпина в Центрально-Черноземном регионе. *Достижения науки и техники АПК*. 2009;(1):27-29).

Timoshenko E.S., Lukashevich M.I., Yagovenko G.L., Ageeva P.A., Zaitseva N.M. Characteristics of promising varieties of lupine Michurinsky and Belorozovy 144 for food use. *Storage and Processing of Farm Products*. 2022;(2):188-200. [in Russian] (Тимошенко Е.С., Лукашевич М.И., Яговенко Г.Л., Агеева П.А., Зайцева Н.М. Характеристика перспективных сортов люпина Мичуринский и Белорозовый 144 для пищевого использования. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2022;(2):188-200). DOI: 10.36107/10.36107/spfp.2022.310

Vaccari G., Mantovani G., Sgualdino G. The development of near-infrared (NIR) technique on-line in the sugar factory. *Sugar Journal*. 1990;52(10):4-8.

Vishnyakova M.A., Seferova I.V., Buravtseva T.V., Burlyayeva 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). 2nd ed. M.A. Vishnyakova (ed.). St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Семенова Е.В., Филипенко Г.И., Александрова Т.Г., Егорова Г.П., Яньков И.И., Бульнцев С.В., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение: (методические указания). 2-е изд. / под ред. М.А. Вишняковой. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-79-5

Wheeler O.H. Near infrared spectra of organic compounds. *Chemical Reviews* 1959;59(4):629-666. DOI: 10.1021/cr50028a004

Информация об авторах:

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

Александра Владимировна Саликова (Кушнарева), аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, kushnareva.vir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5709-7961>

Ирина Николаевна Перчук, 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, i.perchuk@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6568-5248>

Нина Григорьевна Конькова, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, n.konkova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4920-3904>

Галина Павловна Егорова, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, g.egorova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8645-3072>

Мargarита Афанасьевна Вишнякова, 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, m.vishnyakova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2808-7745>

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

Information about the authors

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

Aleksandra V. Salikova (Kushnareva), Postgraduate Student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kushnareva.vir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5709-7961>

Irina N. Perchuk, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, i.perchuk@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6568-5248>

Nina G. Konkova, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.konkova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4920-3904>

Galina P. Egorova, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, g.egorova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8645-3072>

Margarita A. Vishnyakova, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, m.vishnyakova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2808-7745>

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

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 11.09.2023; approved after reviewing on 08.11.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК 633.16:543.42
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117



Методические аспекты использования БИК-спектрометрии для определения биохимических показателей зерна ячменя

В. С. Попов, Т. В. Шеленга, О. Н. Ковалева, В. И. Хорева

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

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

Актуальность. В статье обсуждается возможность использования спектроскопии ближнего инфракрасного отражения (БИК) для экспресс-оценки биохимических показателей у различных форм и разновидностей ячменя. На основании данных, полученных в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР, построены калибровочные модели содержания белка, крахмала, масла, бета-глюканов и суммы фенольных веществ (ФВ) в зерне, позволяющие в дальнейшем проводить скрининговые исследования различных образцов ячменя.

Материалы и методы. Химический состав зерна изучали в образцах голозерного и пленчатого ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), выращенного в 2022 г. на северо-западе РФ. Калибровочные модели для определения белка, масла, крахмала, бета-глюканов и ФВ (80 образцов) разработаны для ИК-анализатора Matrix-I фирмы Bruker Optics (Германия). При их построении использовали показания, полученные общепринятыми химическими методами анализа. Содержание белка/азота определяли по Кьельдалю, масла – по массе сухого обезжиренного остатка в модификации С. В. Рушковского, крахмала – поляриметрическим методом по Эверсу, бета-глюканов – весовым методом, сумму ФВ – по методу Фолина и Чокальтеу в модификации Синглетона и Росси.

Результаты. Достоверность построенных калибровочных сопоставляли с результатами определения белка, крахмала, масла, бета-глюканов и ФВ, полученными химическими методами. В результате показано: данные, полученные с помощью калибровочных для определения белка и крахмала, являлись достоверными, остальные модели нуждаются в доработке.

Заключение. Предлагаемый метод позволяет сохранить ценный исходный материал, повысить эффективность труда, при этом не нуждается в применении химических реактивов. После сканирования каждого образца можно получить результаты сразу по нескольким показателям с заданной повторностью и стандартным отклонением.

Ключевые слова: зерновые культуры, пленчатый ячмень, голозерный ячмень, калибровочная модель, метод БИК-спектроскопии, белок, крахмал, масло, бета-глюканы, фенольные соединения

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-00005, <https://rscf.ru/project/23-76-00005/>.

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Попов В.С., Шеленга Т.В., Ковалева О.Н., Хорева В.И. Методические аспекты использования БИК-спектрометрии для определения биохимических показателей зерна ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):109-117. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117

Methodological aspects of using NIR spectroscopy to assess biochemical indicators in barley grain

Vitaliy S. Popov, Tatiana V. Shelenga, Olga N. Kovaleva, Valentina I. Khoreva

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

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

Background. The possibility of applying near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy for rapid assessment of various biochemical parameters in barley varieties and forms is discussed. The data obtained by the Biochemistry and Molecular Biology Department of VIR served to construct calibration models for the content of protein, starch, oil, beta-glucans, and total phenolic compounds (PhC) in grain, facilitating further screening of various barley samples.

Materials and methods. The chemical composition of grain was studied in naked and covered spring barley (*Hordeum vulgare* L.) accessions grown in 2022 in the northwest of Russia. Calibration models were developed to measure the content of protein, oil, starch, beta-glucans, and PhC (80 accessions) in barley grain with the Matrix-I IR analyzer (Bruker Optics, Germany). The models were constructed on the basis of the data obtained by conventional techniques of chemical analysis. The protein/nitrogen content was assessed using the Kjeldahl method, oil according to the method of defatted dry residue modified by S. V. Ruszkovsky, starch by the polarimetric method according to Evers, beta-glucans by gravimetric analysis, and the total PhC content by the Folin–Ciocâlțeu method modified by Singleton and Rossi.

Results. Statistical significance of the constructed calibration tests was compared with the results of measuring protein, starch, oil, beta-glucan and PhC levels by chemical methods. It was shown that the data of calibration techniques for protein and starch were significant, while the remaining models required improvement.

Conclusion. The proposed method helps to preserve valuable source material, increases labor efficiency, and does not require chemical reagents. Scanning each sample makes it possible to obtain data for several indicators at once, with a specified replication and standard deviation.

Keywords: cereals, covered barley, naked barley, calibration model, NIR spectroscopy, protein, starch, oil, beta-glucans, phenolic compounds

Acknowledgments: the study was supported by the grant from the Russian Science Foundation, No. 23-76-00005, <https://rscf.ru/project/23-76-00005/>.

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

For citation: Popov V.S., Shelenga T.V., Kovaleva O.N., Khoreva V.I. Methodological aspects of using NIR spectroscopy to assess biochemical indicators in barley grain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):109-117. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-109-117

Введение

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – одна из важнейших, широко распространенных зерновых культур. Ячмень, по данным ФАО (Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН), является четвертой зерновой культурой по объему производства после кукурузы, пшеницы и риса. Россия занимает второе место по производству ячменя в мире (Wiegmann et al., 2019). Наибольшие площади посева сосредоточены на Северном Кавказе, Урале, в Сибири, Центрально-Черноземной и Черноземной зонах. Площадь под посевами ярового и озимого ячменя в земледелии России в 2023 г. составляла 7986,6 тыс. га, что на 0,1% (10,5 тыс. га) превышает показатели 2022 г. (Results for 2023..., 2023).

Ячмень широко используется в различных отраслях народного хозяйства: в кормовой промышленности при производстве концентрата для животных, в пивоварении как сырье для приготовления солода, в пищевой промышленности для получения круп и пищевых продуктов, как добавка в хлебопечении в северных и высокогорных районах. В последние годы этот злак признан богатым источником функциональных пищевых ингредиентов благодаря высокому содержанию клетчатки, минералов и антиоксидантов (Shvachko et al., 2021).

По химическому составу зерновка ячменя относится к группе крахмалистого растительного сырья и является важнейшим энергетическим источником. Белок ячменя наиболее сбалансирован по аминокислотному составу по сравнению с другими злаками. Он отличается высоким содержанием незаменимых аминокислот, включая наиболее дефицитные – триптофан и лизин (Garkavy, Pylneva, 1980). Важнейшей составляющей пищевой ценности зерна ячменя является содержание масла и его жирнокислотный состав (Ribalka et al., 2013). По содержанию бета-глюканов ячмень превосходит другие зерновые культуры (Wood et al., 1977). Вязкие растворы бета-глюканов замедляют всасывание стеролов и глюкозы в кишечнике, что приводит к снижению уровня холестерина в сыворотке крови, постпрандиального уровня глюкозы в крови и инсулина (Krasilnikov et al., 2014). Фенольные вещества (ФВ) считаются важнейшими соединениями у злаковых культур, способствующими повышению их антиоксидантной активности. Эти молекулы являются важными метаболитами растений, обладающими различными физиологическими эффектами (Peng et al., 2015).

При рассмотрении общего химического состава зерна следует учесть, что он колеблется в широких пределах в зависимости от внешних и внутренних факторов. В целом в зерне ячменя содержится (% на сухое вещество): 7–25% белка; 45–68% крахмала; 1,6–3,2% масла, 3–11% бета-глюканов (неперевариваемых полисахаридов) (Pleshkov, 1987).

Наряду с факторами внешней среды немаловажное значение имеют и генетические особенности сорта (Kozmina, 1976). Широкий ареал ячменя в различных природно-климатических зонах, а также его разностороннее использование обуславливают наличие большого количества сортов с хозяйственно ценными признаками качества зерна. В коллекции ВИР в основном каталоге насчитывается 18 500 образцов (Kovaleva et al., 2017).

Для анализа химического состава и изменений, происходящих при созревании и хранении зерна, используются все имеющиеся на сегодняшний день методы анализа. Но более информативным и перспективным методом является БИК-спектроскопия, позволяющая быстро

проводить биохимические исследования большого количества коллекционного материала, выделять образцы с наиболее выраженным проявлением необходимых признаков качества семян для более эффективного использования в кормовой, пищевой промышленности, практической селекции. Этот метод является основой прогнозирования в работе селекционеров.

Цель работы – разработка экспресс-метода БИК-спектроскопии по определению основных биохимических показателей (белка, крахмала, масла, бета-глюканов и ФВ) в зерне ячменя и построение калибровочных моделей.

Материалы и методы

Материалом для построения калибровочных моделей служили образцы ярового ячменя из коллекции ВИР. Сформированный набор выращивали в условиях северо-запада РФ (Ленинградская область). Агробиологический контроль ячменя (посев, наблюдения и сбор урожая) проводился в соответствии с методическими рекомендациями (Loskutov et al., 2012).

Почвы опытного поля дерново-слабоподзолистые, супесчаные по текстуре, с нейтральной кислотностью (рН = 7,1–7,6). Климат характеризуется как умеренно теплый, со средней многолетней температурой воздуха в июле 16,5–17,7°C. Сумма положительных температур составляет 2100–2300°C. Период с температурой выше 10°C длится 105–115 дней. Количество осадков в течение вегетационного периода составляет 550–600 мм в год.

Для построения градуировочных моделей использовали различные по происхождению разновидности голозерных (46) и пленчатых (34) образцов ячменя вида *H. vulgare* за 2022 г. (всего 80 образцов) (Supplementary Materials, Table 1)¹.

Пробоподготовка и методы проведения анализа. Для проведения биохимических анализов зерно непосредственно перед анализом измельчали до размера частиц 10 мкм, используя лабораторную дисковую мельницу CM 290 Cemotec (FOSS, Швеция). Измельченное зерно (муку) помещали в непрозрачные бьюксы для защиты от света и окисления. Биохимический анализ проводили в отделе биохимии и молекулярной биологии ВИР согласно методикам ВИР (Ermakov, Arasimovich, 1987).

Содержание белка определяли по методу Кьельдаля на приборе UDK 159 Velp Scientifica (Италия). Общее содержание белка рассчитывали по азоту с коэффициентом 5,7. *Содержание масла* – по массе сухого обезжиренного остатка, используя аппарат Сокслета, применяя в качестве растворителя петролейный эфир (температура кипения – 40–70°C). *Содержание крахмала* – поляриметрическим методом по Эверсу с помощью автоматического поляриметра SAC-i (ATAGO, Япония). Коэффициент перерасчета для ячменя – 181,5. *Содержание бета-глюканов* – весовым методом согласно опубликованному описанию (Popov et al., 2023). *Сумму фенольных веществ* – по методу Фолина и Чокальтеу в модификации Синглетона и Росси. Полученные данные выражали в мг экв. галловой кислоты / 1 г образца (Singleton, Rossi, 1965). Влажность определяли измерением определенной массы муки до и после полного высушивания в сушильном шкафу при 100–102 °C.

¹ Приложение, таблица 1, представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117> / Electronic Supplementary Materials, Table 1. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117>.

С использованием программного обеспечения OPUS к спектрометру Matrix-I фирмы Bruker Optics (Германия) получены спектры отражения в ближней инфракрасной области 780–2770 нм ($12800\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ с разрешением 16 см^{-1}) для цельнозерновых образцов ячменя. Спектры каждого образца регистрировали в трех повторностях (навеска $30 \pm 5\text{ г}$).

Калибровочные модели рассчитывали методом многофакторного анализа по спектрам образцов с известными значениями определяемых параметров (зерно ячменя с известным содержанием белка, масла, крахмала, бета-глюканов, ФВ). Калибровочные образцы для моделей исследовали при их фактической влажности. Значение коэффициента корреляции модели составляло не менее 0,8.

Анализ. Анализируемую пробу засыпали в кювету, при этом необходимо помещать образец в измерительную кювету таким же образом и в том же объеме, как это делалось при регистрации спектров образцов с известными значениями определяемых показателей, поскольку на интенсивность ИК-спектров большое влияние оказывает плотность упаковки материала в кювете. За окончательный результат измерения принимали среднее арифметическое трех параллельных определений, выполненных в условиях повторяемости и удовлетворяющих условию приемлемости. Полученный результат округляли до первого десятичного знака (Khoreva et al., 2020).

Обработка биохимических данных, определение спектральных характеристик и построение моделей осуществлялись с помощью программного обеспечения OPUS Software. Статистическая обработка данных производилась с использованием пакета программ Microsoft Office 2016. В абсолютных единицах погрешность определения данного метода составляет не более 0,5% и незначительно превышает погрешность арбитражных методов.

Результаты и обсуждение

На спектральные данные большое влияние оказывают фено- и генотипические особенности образцов. Поэтому построение калибровочной модели и подбор об-

разцов для ее проверки необходимо проводить каждый год, периодически добавляя новые образцы, особенно те, которые выходят за определяемые границы, и заново пересчитывать калибровочную модель.

Для построения калибровочных моделей отобрано 80 образцов с содержанием белка (на сухое вещество) от 13,36% до 23,41%, крахмала – 44,52–62,45%, масла – 1,87–3,09%, бета-глюканов для пленчатых форм – 3,55–5,36%, для голозерных – 3,64–6,12%, ФВ – 128–234 мг%. Содержание сухого вещества в исследуемых образцах является относительно стабильным показателем с небольшим диапазоном изменчивости и составляло в среднем 91,83%.

Результаты исследований показали: за счет максимально широкого диапазона изменчивости признаков содержания белка, масла, крахмала, бета-глюканов и ФВ в зерне объединение всех образцов в одну калибровочную позволяет повысить ее устойчивость.

На этапе разработки моделей с помощью программного обеспечения OPUS партию образцов, выбранных для построения калибровочных, разделяли на две равноценные части – калибровочную и тестовую (по 40 образцов). В ходе построения модели по разным алгоритмам просчитывались до 240 спектров (80 образцов по три повторности) по калибровочным образцам с проверкой их на тестовых образцах. В результате анализа спектральных данных были построены калибровочные модели Barley – Protein, Barley – Starch, Barley – Oil, Barley – Glucans, Barley – Phenolic соответственно.

Однако в процессе разработки моделей для повышения коэффициента детерминации из таблицы спектров (240) часть из них была удалена: 5 спектров удалено из данных белка, 10 – из данных масла, 7 – из данных крахмала, 6 – из данных бета-глюканов и 5 – из данных ФВ.

Для модели белка (Barley – Protein) (рис. 1) уверенность в достоверности получаемых результатов дает высокий коэффициент детерминации $R^2 = 88,25$, количество рангов в многофакторном анализе – 13, среднеквадратичная ошибка прогнозирования (RMSECV) – 0,741%. Показатель остаточного отклонения прогноза для ранга (RPD) разработанной модели оценивает устойчивость

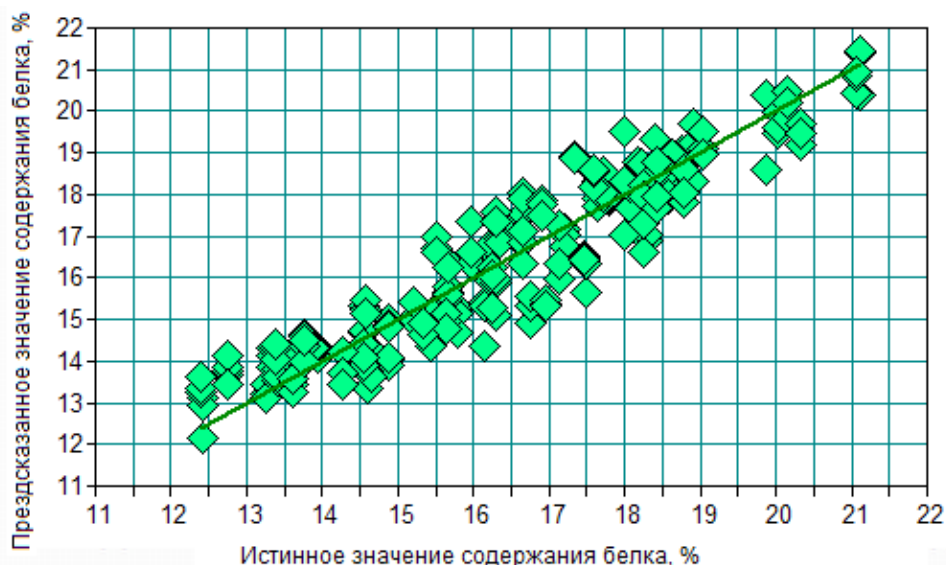


Рис. 1. Предсказанные значения содержания белка в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания белка (ось X) калибровочной модели Barley – Protein

Fig. 1. Predicted values of protein content in grain (Y-axis) versus true protein content (X-axis) of the Barley–Protein Calibration Model

полученной зависимости. Для калибровочной модели белка RPD – 2,92, что соответствует «удовлетворительному качеству» построенных моделей (Efimenko et al., 2015; Efimenko et al., 2016; Efimenko S.G., Efimenko S.K., 2019). Разница между истинным значением параметра, полученного с помощью биохимического анализа, и ожидаемым, то есть показателем смещения или статистической предвзятости (Bias), составляет 0,0213, что подтверждает практически полное совпадение.

Для калибровочной модели крахмала (Barley – Starch), масла (Barley – Oil), бета-глюканов (Barley – Glucans) и суммы ФВ (Barley – Phenolic) R^2 – 79,78; 65,44; 49,47;

26,61; количество рангов в многофакторном анализе – 17, 19, 7, 2; RMSECV – 1,08%, 0,141%, 0,462%, 21,9%; RPD – 2,22, 1,70, 1,41, 1,17; Bias – –0,0171, 0,0049, –0,0012, 0,897 соответственно (рис. 2, 3, 4, 5). Красным цветом выделены неучтенные значения содержания крахмала в образцах ячменя.

Согласно вышеуказанным показателям, калибровочные модели для бета-глюканов и ФВ не являются «устойчивыми» и в настоящий момент не могут быть использованы для экспресс-оценки зерна ячменя. Однако характер расположения значений в калибровочных моделях, полученных для белка, крахмала и масла, является пер-

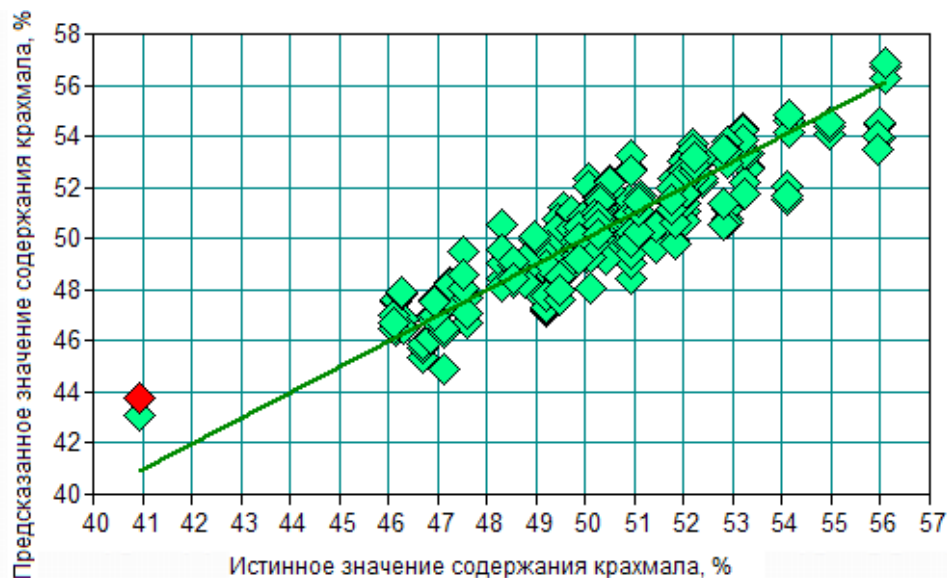


Рис. 2. Предсказанные значения содержания крахмала в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания крахмала (ось X) калибровочной модели Barley – Starch

Fig. 2. Predicted values of starch content in grain (Y-axis) versus true starch content (X-axis) of the Barley–Starch Calibration Model

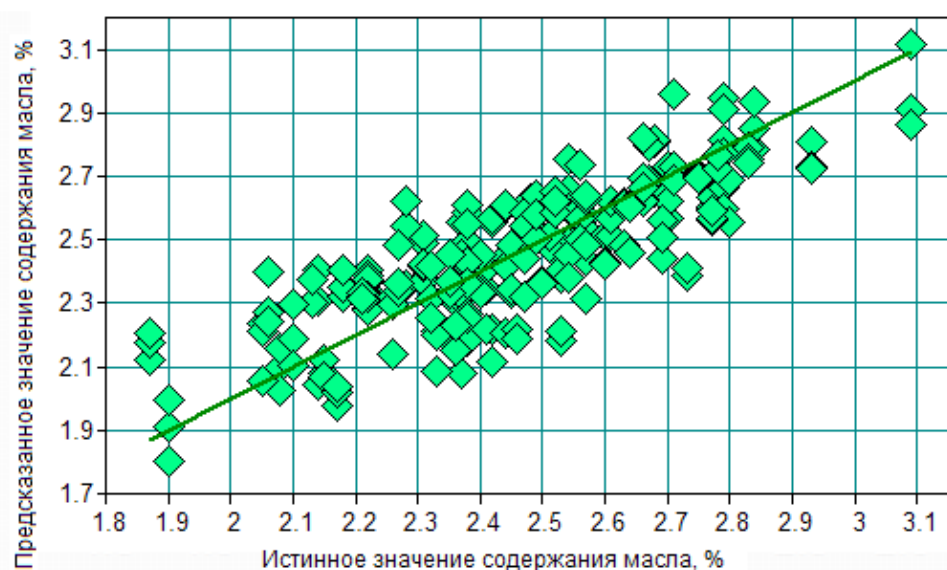


Рис. 3. Предсказанные значения содержания масла в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания масла (ось X) калибровочной модели Barley – Oil

Fig. 3. Predicted values of oil content in grain (Y-axis) versus true oil content (X-axis) of the Barley–Oil Calibration Model

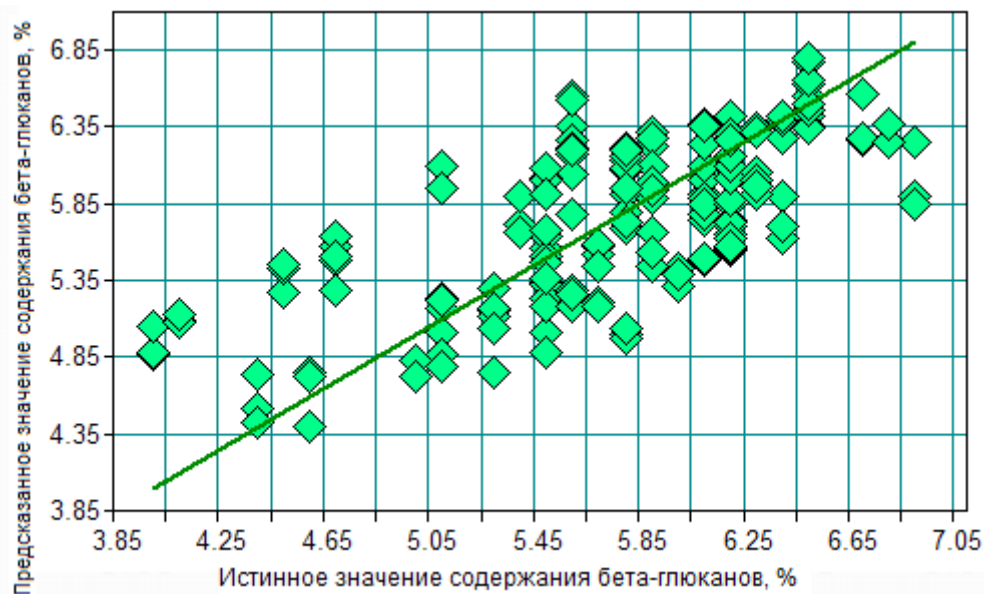


Рис. 4. Предсказанные значения содержания бета-глюканов в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания бета-глюканов (ось X) калибровочной модели Barley – Glucans

Fig. 4. Predicted values of beta-glucan content in grain (Y-axis) versus true beta-glucan content (X-axis) of the Barley–Glucans Calibration Model

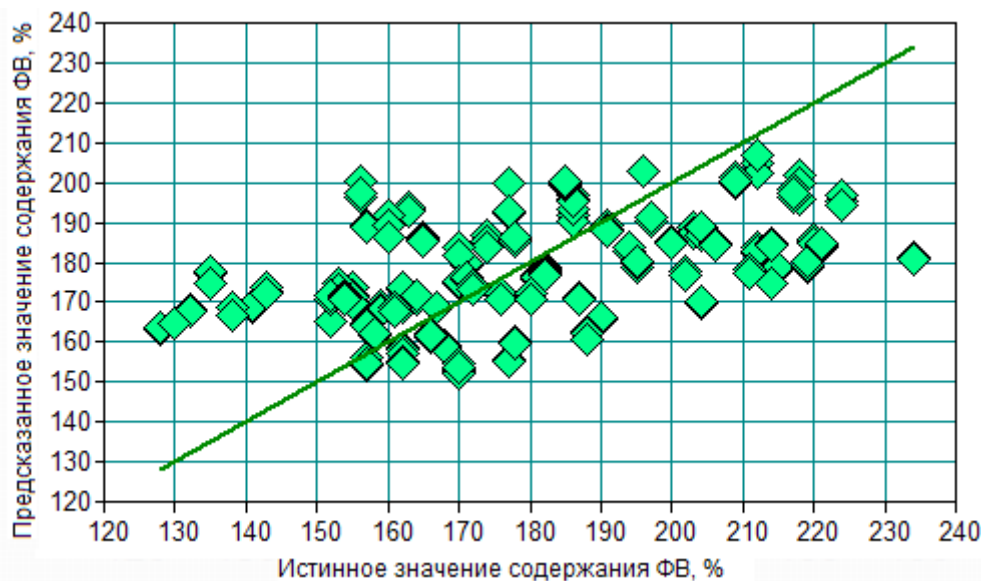


Рис. 5. Предсказанные значения содержания ФВ в зерне (ось Y) по сравнению с истинными значениями содержания ФВ (ось X) калибровочной модели Barley – Phenolic

Fig. 5. Predicted values of PhC content in grain (Y-axis) versus true PhC content (X-axis) of the Barley–Phenolic Calibration Model

спективным для последующей доработки с помощью результатов, полученных для образцов зерна ячменя других мест и лет репродукции.

Для проверки правильности построения градуировочных моделей были отобраны другие по происхождению и разновидностям голозерные (15) и пленчатые (15) зерна ячменя урожая 2023 г. (всего 30 образцов) (таблица).

Согласно ГОСТ 32749-2014 «Семена масличные, жмыхи и шроты. Определение влаги, жира, протеина и клетчатки методом спектроскопии в ближней инфракрасной области» (GOST 32749-2014..., 2019) рассчитывали рас-

хождение между показаниями ИК-анализатора и значениями, определенными стандартными методами. Среднее значение отклонения $\Delta\bar{X}$ вычисляли по формуле:

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum |X_{ик} - X_{ст}|}{n},$$

где $X_{ик}$ – значение показателя, полученное методом ИК-спектроскопии, %;

$X_{ст}$ – значение показателя, полученное стандартным методом, %;

n – количество образцов, использованных для проверки градуировки ($n = 30$).

Таблица. Образцы ячменя урожая 2023 г., отобранные для проверки градуировочных моделей
Table. Barley accessions of the 2023 harvest selected for testing the calibration models

№ по каталогу ВИР	Происхождение	Название сорта	Разновидности <i>Hordeum vulgare</i> L.
Группа голозерного ячменя			
31125	Челябинская обл.	Нудум 95	<i>nudum</i>
4526	Ивановская обл.	Местный	<i>nudum</i>
16535	Ставропольский край	-	<i>nudum</i>
29440	Беларусь	N16	<i>neogenes</i>
31178	Германия	Lawina	<i>nudum</i>
23491	Франция	De printemps	<i>nudum</i>
29415	Монголия	Алаг-Эрд-Эне	<i>nudum</i>
31049	США	Bear	<i>nudum</i>
13272	Турция	-	<i>nudum</i>
28645	Мексика	S-274	<i>nudum</i>
16547	Северная Осетия	-	<i>nudum</i>
3115	Таджикистан	Местный	<i>nudum</i>
31367	Латвия	Kornelja	<i>nudum</i>
5411	Болгария	Белый голозерный	<i>nudum</i>
25967	Франция	CF-113	<i>nudum</i>
Группа пленчатого ячменя			
31487	Франция	Авалон	<i>nutans</i>
31491	Германия	Татум	<i>nutans</i>
30984	Новосибирская обл.	Биом	<i>nutans</i>
30023	Швеция	Ingve	<i>nutans</i>
28163	Ленинградская обл.	Мутант 68	<i>nutans</i>
29002	Казахстан	Медикум	<i>medicum</i>
29622	Красноярский край	Маяк	<i>nutans</i>
5151	Тунис	France N104	<i>nutans</i>
12223	Китай	Ychang	<i>nutans</i>
17217	Грузия	032-28	<i>nutans</i>
19188	Украина	Ильинецкий 43	<i>nutans</i>
20236	Япония	Hatakaze	<i>erectum</i>
29435	Свердловская обл.	Импульс	<i>nutans</i>
29268	Респ. Бурятия	Алтан-Булаг	<i>nutans</i>
29001	Челябинская обл.	Таганай	<i>nutans</i>

Значение \overline{DX} не превышает погрешности стандартного метода (для белка – 0,17%, для масла – 0,06%, для крахмала – 0,28%) (Supplementary Materials, Table 2)².

Относительная разница между химическими методами анализа зерна и физическим методом, основанным на ИК-спектроскопии, не превышает 3–5%.

Заключение

Спектроскопию в ближней инфракрасной области применяли для оценки биохимических показателей в цельном зерне ячменя. БИК-спектроскопия является экспресс-методом, позволяет существенно ускорить получение данных по исследуемым показателям, поскольку не требуется предварительная пробоподготовка образцов, приготовление химических реактивов, а сам анализ занимает несколько минут.

На примере образцов зерна ячменя получены калибровочные модели по определению белка, крахмала, масла, бета-глюканов, фенольных веществ. Показатели, полученные с помощью калибровочных кривых для определения содержания белка, масла и крахмала, являлись достоверными и апробированы на новых образцах ячменя с известными значениями анализируемых показателей. Другие модели нуждаются в доработке.

БИК-спектроскопия предназначена для скрининговых анализов, дает возможность после сканирования образца получать результаты сразу по нескольким показателям с заданной повторяемостью и стандартным отклонением. Кроме того, полученные калибровочные модели можно периодически дорабатывать для увеличения точности измерений и при необходимости переносить с одного прибора на другой.

References / Литература

- Efimenko S.G., Efimenko S.K. Determination of oil and moisture contents in mustard seeds using IR spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2019;4(180):36-44. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К. Определение содержания масла и влаги в семенах горчицы с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2019;4(180):36-44). DOI: 10.25230/2412-608X-2019-4-180-36-44
- Efimenko S.G., Efimenko S.K., Kucherenko L.A., Nagalevskaya Ya.A. Quick-assay of the content of the main fatty acids in oil of rapeseed seeds by means of IR-spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2015;4(164):35-40. [in Russian] (Ефименко С.Г., Ефименко С.К., Кучеренко Л.А., Нагалеvская Я.А. Экспресс-оценка содержания основных жирных кислот в масле семян рапса с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2015;4(164):35-40).
- Efimenko S.G., Kucherenko L.A., Efimenko S.K., Nagalevskaya Ya.A. Evaluation of the general qualitative traits of soybean seeds using IR-spectrometry. *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2016;3(167):33-38. [in Russian] (Ефименко С.Г., Кучеренко Л.А., Ефименко С.К., Нагалеvская Я.А. Оценка основных показателей качества семян сои с помощью ИК-спектрометрии. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2016;3(167):33-38).
- Ermakov A.I., Arasimovich V.V., Yarosh N.P., Peruanskiy Yu.V., Lukovnikova G.A., Ikonnikova M.I. Methods of biochemical research in plants (*Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy*). A.I. Ermakov (ed.). 3rd ed. Leningrad: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П., Перуанский Ю.В., Луковникова Г.А., Иконникова М.И. Методы биохимического исследования растений / под ред. А.И. Ермакова. 3-е изд. Ленинград: Агропромиздат; 1987).
- Garkavy P.F., Pylneva P.N. Amino acid composition of grain in common and high-lysine forms of barley (*Aminokislotny sostav zerna obychnykh i vysokolizinykh form yachmenya*). *Vestnik selskokhozyaystvennoy nauki = Bulletin of Agricultural Science*. 1980;7:71-73. [in Russian] (Гаркавый П.Ф., Пыльнева П.Н. Аминокислотный состав зерна обычных и высоколизинных форм ячменя. *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1980;7:71-73).
- GOST 32749-2014. Interstate standard. Oilseeds, oilcakes and oilmeals. Determination of moisture, oil, protein and fiber by Near-Infrared Reflectance. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 32749-2014. Межгосударственный стандарт. Семена масличные, жмыхи и шроты. Определение влаги, жира, протеина и клетчатки методом спектроскопии в ближней инфракрасной области. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: <https://docs.cntd.ru/document/120011470> [дата обращения: 21.07.2023].
- Khoreva V.I., Popov V.S., Kon'kova N.G. Application of the IR spectrometry method in the screening study of various oat species. *Ecological Genetics*. 2022;20(4):349-357. DOI: 10.17816/ecogen108503
- Kovaleva O.N., Ivanova N.N., Khoreva V.I., Teplyakova S.B., Potokina E.K. Catalogue of the VIR global collection. Issue 851. Barley. Agrobiological characterization of barley accessions and results of molecular testing of alleles of *PPD* photoperiodic reaction genes and *VRN* vernalization genes. I.G. Loskutov (ed.). St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Ковалева О.Н., Иванова Н.Н., Хорева В.И., Теплякова С.Б., Потокина Е.К. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 851. Ячмень. Агробиологическая характеристика образцов ячменя и результаты молекулярного тестирования аллелей генов фотопериодической реакции *PPD* и генов яровизации *VRN* / под ред. И.Г. Лоскутова. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).
- Kozmina N.P. Biochemistry of grain and products of its processing (*Biokhimiya zerna i produktov ego pererabotki*). Moscow: Kolos; 1976. [in Russian] (Козьмина Н.П. Биохимия зерна и продуктов его переработки. Москва: Колос; 1976).
- Krasilnikov V.N., Barsukova N.V., Popov V.S. Roles of oat beta-glucan in functional and dietetic food. *Problemy ekonomiki i upravleniya v trgovle i promyshlennosti = Problems of Economics and Management in Trade and Industry*. 2014;2(6):78-83. [in Russian] (Красильников В.Н., Барсукова Н.В., Попов В.С. Бета-глюканы овса в функциональном и лечебном питании. *Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности*. 2014;2(6):78-83).
- Loskutov I.G., Kovaleva O.N., Blinova E.V. (comp.). Methodological guidelines for the study and preservation of the world collection of barley and oats (*Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu i sokhraneniyu mirovoy kollektsii yachmenya i ovsa*). I.G. Loskutov (ed.). St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса /

² Приложение, таблица 2, представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117> / Electronic Supplementary Materials, Table 2. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-109-117>.

- сост. И.Г. Лоскутов, О.Н. Ковалева, Е.В. Блинова; под ред. И.Г. Лоскутова. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).
- Peng X.R., Liu J.Q., Wang C.F., Han Z.H., Shu Y., Li X.Y. et al. Unusual prenylated phenols with antioxidant activities from *Ganoderma cochlear*. *Food Chemistry*. 2015;171:251-257. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.08.127
- Pleshkov B.P. Biochemistry of agricultural plants (Biokhimiya selskokhozyaystvennykh rasteniy). Moscow: Agropromizdat; 1987. [in Russian] [Плешков Б.П. Биохимия сельскохозяйственных растений. Москва: Агропромиздат; 1987].
- Popov V.S., Konarev A.V., Kovaleva O.N., Konkova N.G., Khoreva V.I. Weight method for determination of soluble β -glucans in barley grain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):45-52. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-45-52
- Results for 2023. Sown areas of cereals and grain legumes in Russia (Itogi za 2023 god. Posevnye ploshchadi zernovykh i zernobobovykh kultur v Rossii). Agrovestnik Internet Portal; Aug. 16, 2023. [in Russian] [Итоги за 2023 год. Посевные площади зерновых и зернобобовых культур в России. Интернет-портал Агровестник; 16.08.2023]. URL: <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/itogi-za-2023-god-posevnye-ploshchadi-zernovykh-i-zernobobovykh-kultur-v-rossii.html> [дата обращения 21.01.2024].
- Ribalka O.I., Polishchuk S.S., Kirdoglo E.K., Morgun B.V. Genetic and breeding criteria for the direct development of naked food barley cultivars (Genetichni ta selekcijni kriterii stvorenyya sortiv golozernogo yachmenyu harchovogo napryamu). *Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants*. 2013;45(3):187-205. [in Ukrainian] [Рибалка О.И., Поліщук С.С., Кірдогло Є.К., Моргун Б.В. Генетичні та селекційні критерії створення сортів голозерного ячменю харчового напрямку. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2013;45(3):187-205].
- Shvachko N.A., Loskutov I.G., Semilet T.V., Popov V.S., Kovaleva O.N., Konarev A.V. Bioactive components in oat and barley grain as a promising breeding trend for functional food production. *Molecules*. 2021;26(8):2260. DOI: 10.3390/molecules26082260
- Singleton V.L., Rossi J.A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*. 1965;16(3):144-158. DOI: 10.5344/ajev.1965.16.3.144
- Wiegmann M., Maurer A., Pham A., March T.J., Al-Abdallat A., Thomas W.T.B. et al. Barley yield formation under abiotic stress depends on the interplay between flowering time genes and environmental cues. *Scientific Reports*. 2019;9(1):6397. DOI: 10.1038/s41598-019-42673-1
- Wood P.J., Paton D., Siddiqui I.R. Determination of beta-glucan in oats and barley. *Cereal Chemistry*. 1977;54:524-533.

Информация об авторах

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

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

Ольга Николаевна Ковалева, 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>

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>

Information about the authors

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

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

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>

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>

Вклад авторов: Попов В. С. – 35%; Шеленга Т. В. – 20%; Ковалева О. Н. – 15%; Хорева В. И. – 30%.

Contribution of the authors: Popov V. S. – 35%; Shelenga T. V. – 20%; Kovaleva O. N. – 15%; Khoreva V. I. – 30%.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 13.09.2023; approved after reviewing on 23.11.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.19:631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-118-128



Адаптивные особенности образцов озимой тритикале коллекции ВИР

Н. Ш. Гараева, С. Н. Пономарев, М. Л. Пономарева

Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр Российской академии наук, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, Казань, Россия

Автор, ответственный за переписку: Назлыгуль Шамсутдиновна Гараева, cimba93@inbox.ru

Актуальность. В условиях глобального изменения климата становится актуальным изучение и создание генетического материала, обладающего экологической пластичностью и стабильностью проявления признаков. Достигнутые научно-практические результаты в области селекции тритикале ставят ее в ряд наиболее востребованных по хозяйственному значению злаковых зерновых культур. Однако основная проблема для селекционного использования тритикале – ограниченность генетических ресурсов.

Материал и методы. Материал для исследований представлен 161 образцом озимой тритикале (*× Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) из мировой коллекции ВИР. Изучение и селекционная проработка материала осуществлялись по традиционным методикам селекции в соответствии с методическими указаниями ВИР с небольшими дополнениями. Полученные данные исследований подвергали статистическому анализу методом А. В. Кильчевского и Л. В. Хотылевой.

Результаты. В условиях Средневолжского региона РФ проведен анализ эколого-генетических параметров. Выделены генотипы, отличающиеся высокой общей адаптивной способностью, то есть обеспечивающие максимальный средний урожай по всей совокупности сред, а также сорта, формирующие высокую урожайность, которая в наименьшей степени менялась в зависимости от погодных условий. Проведенный анализ показал, что в исследуемом коллекционном наборе были стабильными как высокопродуктивные, так и низкопродуктивные генотипы, а среднее значение признака и его средовая чувствительность относительно независимы и могут сочетаться в одном генотипе в различных комбинациях, что может использоваться в селекционном процессе.

Ключевые слова: *× Triticosecale* Wittm. ex A. Camus, генофонд, урожайность, стрессоустойчивость, стабильность, селекционная ценность генотипа

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Татарского НИИСХ – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН (тема № 1220118000138-7). Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Гараева Н.Ш., Пономарев С.Н., Пономарева М.Л. Адаптивные особенности образцов озимой тритикале коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):118-128. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-118-128

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-118-128

Adaptive features of winter triticale accessions from the VIR collection

Nazlygul Sh. Garaeva, Sergey N. Ponomarev, Mira L. Ponomareva

Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Tatar Research Institute of Agriculture, Kazan, Russia

Corresponding author: Nazlygul Sh. Garaeva, cimba93@inbox.ru

Background. In the context of global climate change, the study and development of genetic material with environmental plasticity and stability in the manifestation of its traits becomes relevant. The scientific and practical results achieved in triticale breeding place this crop among the most popular cereals in terms of economic importance. However, the main problem for the use of triticale in breeding practice is its limited genetic resources.

Materials and methods. The research materials were 161 winter triticale (\times *Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) accessions from the global collection of VIR. The study and breeding-oriented assessment of the material were based on conventional breeding techniques and carried out according to the guidelines approved by VIR with minor amendments. The obtained research data underwent statistical analysis using the method by A. V. Kilchevsky and L. V. Khotyleva.

Results. Environmental and genetic parameters were analyzed under the conditions of the Middle Volga Region of Russia. Genotypes were identified for their high general adaptability, i. e., securing the highest average yield in the entire set of environments. Cultivars were also selected for their least variable high yields under the impact of weather conditions. The analysis of the studied set of accessions showed that both high-yielding and low-yielding genotypes were stable. The character's mean value and its environmental sensitivity were relatively independent and could be incorporated in one genotype in various combinations. This finding can be used in the process of triticale breeding.

Keywords: \times *Triticosecale* Wittm. ex A. Camus, gene pool, yield, stress tolerance, stability, breeding value of a genotype

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of the Tatar Research Institute of Agriculture, subdivision of Kazan Scientific Center of the RAS (Theme No. 1220118000138-7). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Garaeva N.Sh., Ponomarev S.N., Ponomareva M.L. Adaptive features of winter triticale accessions from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):118-128. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-118-128

Введение

Сочетание межродовой гибридизации пшеницы с рожью и экспериментальной полиплоидии привело к созданию новой зерновой культуры тритикале (*× Triticosecale* Wittm. ex A. Camus, AABBRR), что стало крупнейшим достижением генетики и селекции растений прошлого столетия (Gordei et al., 2010). Генофонд тритикале синтезировался путем получения аллополиплоидных/амфиполиплоидных форм с разным уровнем ploидности (4x, 6x и 8x) и комбинирования хромосом и геномов из разных таксонов. В отличие от других возделываемых растений генетическое разнообразие тритикале представлено исключительно селекционными сортами, линиями и популяциями.

По последним данным, в коллекциях разных стран хранится порядка 16 000 образцов тритикале, из которых более 11 700 сосредоточены в 23 генбанках 18 стран Европы. Генофонд тритикале большей частью представлен селекционными сортами Польши, Германии, Беларуси, Франции и России (Sokolenko, Komarov, 2021). В России основным биоресурсным центром растений является Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), в котором хранятся и поддерживаются биологические коллекции сельскохозяйственных растений (Dzyubenko, 2012). В настоящее время коллекция тритикале ВИР включает в себя около 4242 образцов из 47 стран мира. Коллекционные образцы служат основой расширения генетического разнообразия и являются основным источником для селекции новых сортов целевого направления.

В Государственном реестре селекционных достижений на 2023 год предложены к использованию 105 сортов озимого образа жизни (State Register..., 2023). Несмотря на такое селекционное разнообразие в 2022 г. площади тритикале в РФ составили всего лишь 96 тыс. га (данные Росстата). По сравнению с наиболее удачными 2015/2016 г. (228–250 тыс. га) возделывание культуры в России сократилось в 2,5 раза. Зерна тритикале в России собрали порядка 2,7 млн тонн при средней урожайности культуры 28,5 ц/га. Одной из причин снижения производства тритикале является недостаточная экологическая устойчивость районированных сортов, которая приводит к существенным различиям между потенциально возможной и реальной продуктивностью сортов в условиях производства. Так, по словам ряда авторов, в благоприятные годы тритикале дает урожай в 10–11 т/га (Kasynkina et al., 2017; Grabovets, 2019; Gordinskaya et al., 2021), но в годы с неблагоприятными факторами этот потенциал реализуется лишь на 40–50%. Поэтому первоочередной задачей селекционной программы является повышение адаптивного потенциала и увеличение стабильности урожайности зерна сортов тритикале независимо от года и зоны выращивания.

Для оценки эколого-генетических свойств генотипов важно использовать такие критерии как адаптивность (приспособляемость) и стабильность (устойчивость). Новые сорта должны противостоять неблагоприятным факторам, эффективно использовать благоприятные условия внешней среды, иметь высокую потенциальную продуктивность и способность ее сохранять в разных средах. Следовательно, понятие «адаптивный сорт» включает приспособленность не только к оптимуму, но и к минимуму и максимуму факторов внешней среды.

Изучение реакции тритикале на различное сочетание и действие экологических факторов вызывает все больший интерес со стороны исследователей-селекционеров (Ponomarev et al., 2018; Krokmal et al., 2019; Krokmal' et al., 2020). Этому способствует открывающаяся перспектива оценить адаптивный потенциал и отобрать генотипы по комплексу селекционно ценных признаков для определенных эколого-географических условий, прежде всего для создания ценного исходного материала. А. В. Кильчевский и Л. В. Хотылева во многих своих публикациях, в частности в работах 1989 и 1997 г., отмечают важность опытов по испытанию генотипов в различных средах. Главный вывод из этих работ – в основе адаптивной селекции лежит взаимодействие генотипа и среды. В условиях глобального изменения климата и его региональном проявлении остается актуальной проблема создания, изучения и выделения генетического материала, обладающего высокой экологической пластичностью и стабильностью проявления признаков, влияющих прямо или косвенно на продуктивность культурных растений в агроценозах (Ripberger et al., 2015).

В связи с этим была поставлена *цель исследований* – дать всестороннюю оценку образцам озимой тритикале из коллекции ВИР по параметрам адаптивности и урожайности в условиях Средневолжского региона.

Материалы и методы

Исследовательская работа выполнена в 2018–2021 гг. в лаборатории селекции озимой ржи и тритикале Татарского научно-исследовательского института сельского хозяйства – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН).

Полевые исследования образцов озимой тритикале, полученных из мировой коллекции ВИР, проведены на селекционном севообороте института. Землепользование расположено в северной части Республики Татарстан на правом берегу р. Кама к западу от р. Вятка в Лаишевском муниципальном районе (с. Большие Кабаны). Посевы размещались на серых лесных хорошо окультуренных почвах по чистому пару. При закладке опытов и в уходе за растениями применяли общепринятую в зоне агротехнику для озимой тритикале. Посев осуществляли сеялкой ССФК8 на делянках площадью 2,5 м² с нормой высева 5 млн всхожих семян/га в двукратной повторности. Сроки сева – последняя пятнадцатка августа.

В исследовании использовали 160 образцов из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) различного эколого-географического и генетического происхождения; в качестве стандарта использовался сорт 'Башкирская Короткостебельная'.

Организацию полевых испытаний и биометрические измерения осуществляли в соответствии с методическими разработками ВИР (Merezhko et al., 1999) с нашими дополнениями.

Годы исследований различались как по погодным условиям (табл. 1), так и по эпидемиологической ситуации с болезнями. Например, в 2019 г. наблюдалось сильное поражение озимых культур снежной плесенью, в Республике Татарстан даже было объявлено о ЧС, и коллекция тритикале практически полностью погибла.

Начало весенней вегетации озимой тритикале в 2018 г. характеризовалось пониженным температур-

Таблица 1. Характеристика весенне-летних месяцев вегетационного периода
(по данным метеостанции ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН)**Table 1. Characteristics of the spring and summer months of the growing season**
(according to the weather station of the Tatar Research Institute of Agriculture FRC KazSC of RAS)

Показатель	Среднеголетнее за 1980–2010 гг.	2018 г.	2020 г.	2021 г.
Средняя температура воздуха, °С				
Май	13,0	14,2	13,4	18,0
Июнь	18,3	16,8	16,6	22,2
Июль	19,5	23,0	22,1	21,9
Сумма эффективных температур, $T > 10^{\circ}\text{C}$ (май – июль)	1058	1197	1136	1443
Сумма осадков (май – июль), мм	161	98	127	60
ГТК (май – июль)	1,05	0,59	0,87	0,31

ным режимом при хорошем увлажнении почвы. Это способствовало хорошему отрастанию растений после зимовки и продуктивному весеннему кущению. Затем наступила продолжительная сухая погода. Июнь был холоднее нормы, а июль жарче обычного на $3,5^{\circ}\text{C}$. ГТК равнялся 0,59, что характеризует погодные условия как засушливые.

Условия вегетации тритикале (май – июль) в 2020 г. протекали при недостаточной влажности (ГТК = 0,87). Сумма осадков за май – июль в 2020 г. составила 127 мм. В 2021 г. этот период вегетации характеризовался крайним дефицитом влаги и аномально жаркой погодой (ГТК = 0,31), самыми экстремальными засушливыми были май и июль. Количество осадков составило всего 60 мм (см. табл. 1), наблюдались высокие дневные температуры, низкое содержание продуктивной влаги в метровом слое почвы в критические периоды развития растений. Все это привело к резкому снижению урожайности изучаемых сортов озимой тритикале. В то же время такие экстремальные условия послужили уникальным естественным фоном для определения наиболее адаптированных и стабильных генотипов, что играет немаловажную роль в селекционном процессе.

Полученные данные исследований подвергали статистическому анализу методом А. В. Кильчевского и Л. В. Хотылевой (Kilchevsky, Khotyleva, 1985), вычисляя показатели: OAC_i (общая адаптивная способность генотипа), $\sigma^2_{CAC_i}$ (варианса специфической адаптивной способности генотипа), σ_{CAC_i} (стандартное отклонение специфической адаптивной способности), $\sigma^2_{(G \times E)_{gi}}$ (варианса взаимодействия генотипа и среды), S_{gi} (относительная стабильность генотипа), $СЦГ_i$ (селекционная ценность генотипа). Уровень стрессоустойчивости рассчитывался по формуле ($Y_{cr} = Y_{max} - Y_{min}$) (Goncharenko, 2005).

Результаты

Обеспечение стабильности высоких урожаев при выращивании озимой тритикале в варьирующих неблагоприятных условиях внешней среды остается нерешенной проблемой, которая имеет особое значение для Средневолжского региона, основные зоны сельскохозяйственного производства которого характеризуются

крайне неравномерной влагообеспеченностью, высокой изменчивостью факторов перезимовки и сложной фитопатогенной ситуацией.

Когда речь заходит о зерновых культурах, то первый критерий, на который стоит обратить внимание, – это урожайность. Нами проведена оценка адаптивной способности и стабильности по урожайности зерна значительного числа озимой тритикале из коллекции ВИР. Показано, что в зависимости от складывающихся погодных условий этот показатель колеблется значительно (рис. 1). На рисунке 1 представлена диаграмма размаха в виде так называемого «ящика с усами».

Размер ящика представляет межквартильный размах, горизонтальная линия – медиана, знак плюс – среднее значение, усы – минимальные и максимальные значения, точки вне ящиков – выбросы. Так, в 2018 г. в среднем урожайность составила $513,1 \pm 124,2$ с амплитудой варьирования от 156 до 788 г/м^2 . В наиболее благоприятном 2020 г. урожайность колебалась от 260 до 874 г/м^2 при среднем значении $575,5 \pm 131,4$, а в самом острозасушливом 2021 г. перечисленные показатели снизились до значений от 32 до 408 г/м^2 и $200,6 \pm 81,2 \text{ г/м}^2$ соответственно. Ящичная диаграмма наглядно демонстрирует, что наименьшая длина бокса-плота и усов отмечается в 2021 г., что говорит о жесткости влияния стрессового фактора на все изучаемые образцы.

Общая адаптивная способность (ОАС) по урожайности характеризует среднее значение признака в различных условиях среды. В наших исследованиях наибольшее значение эффектов ОАС из выбранных генотипов отмечено у сорта 'Жниво' (176,4), а наименьшее – у сорта 'Каприз' (73,7). Из 160 образцов только 22 генотипа (13,7%) существенно превосходили стандарт по урожайности.

Распределение по урожайности показало, что 7% коллекционных образцов имели крайне низкое значение признака ($190\text{--}300 \text{ г/м}^2$) и 27% – от 301 до 400 г/м^2 (рис. 2). В группу с продуктивностью $401\text{--}500 \text{ г/м}^2$ вошли 82 образца (51%), а свыше 500 г/м^2 – 24 образца (15% от числа изученных).

При оценке изученного нами генотипа в среднем за три года наибольшей урожайностью обладали образцы 'Жниво' ($602,7 \text{ г/м}^2$), 'АДМ 9' ($577,3 \text{ г/м}^2$), 'Святозар' ($568,0 \text{ г/м}^2$), 'Докучаевский 13' ($559,0 \text{ г/м}^2$), 'Вектор'

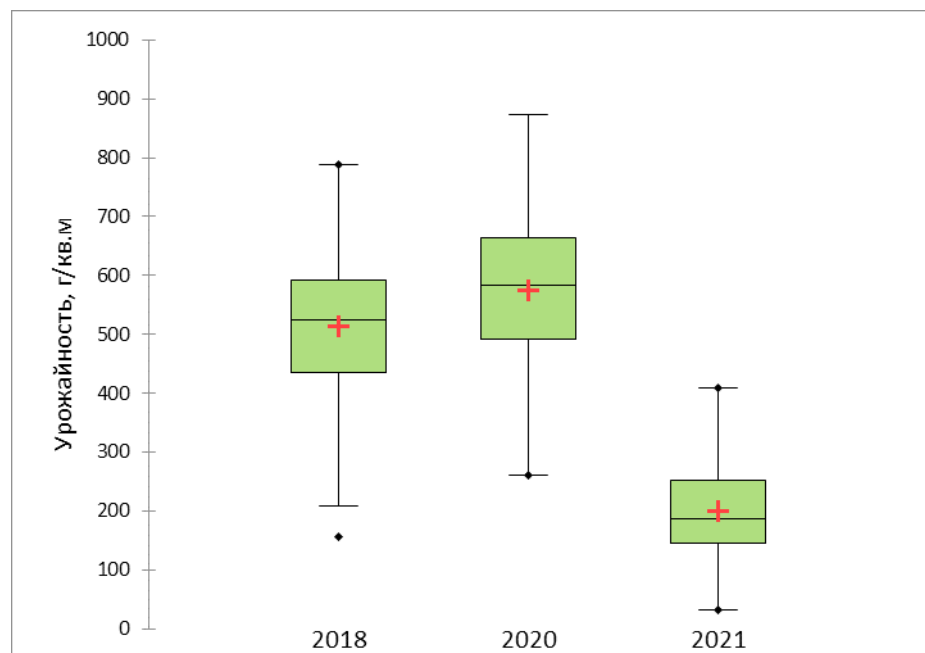


Рис. 1. Диаграмма размаха, показывающая изменчивость урожайности у сортов озимой тритикале в 2018, 2020, 2021 г. (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, Республика Татарстан)

Fig. 1. The range diagram showing yield variability among winter triticale cultivars in 2018, 2020 and 2021 (Tatar Research Institute of Agriculture FRC KazSC of RAS, Republic of Tatarstan)

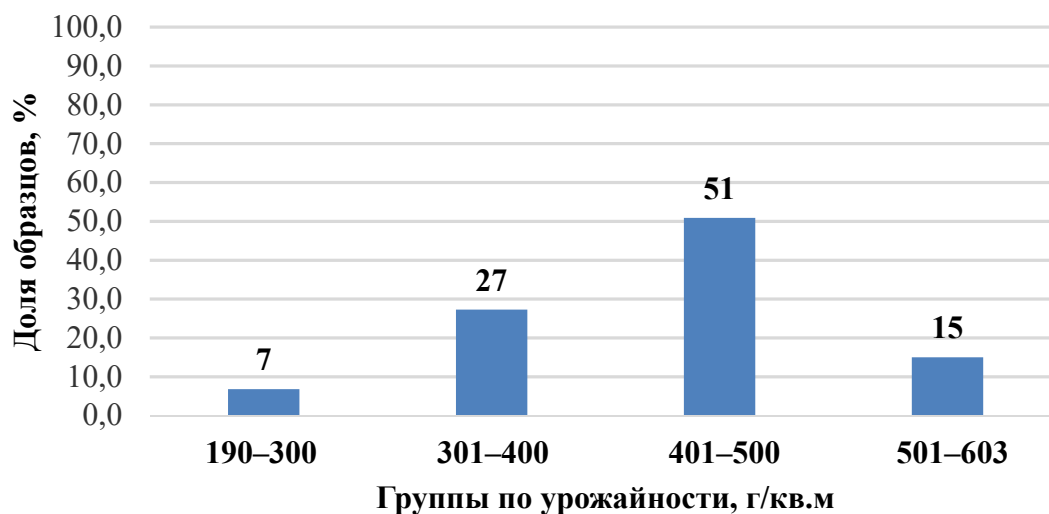


Рис. 2. Распределение 161 образца озимой тритикале по группам в зависимости от урожайности (среднее за 3 года) (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, Республика Татарстан, 2018, 2020, 2021 г.)

Fig. 2. Distribution of 161 winter triticale accessions into groups depending on their yield (average for 3 years) (Tatar Research Institute of Agriculture FRC KazSC of RAS, Republic of Tatarstan, 2018, 2020 and 2021)

(556,7 г/м²), 'Башкирская 3' (550,7 г/м²), при этом у стандарта 'Башкирская Короткостебельная' урожайность была на уровне 462,7 г/м².

Селекционная ценность генотипа (СЦГ) – второй по значимости параметр, который необходим селекционеру для определения сортов, сочетающих продуктивность и стабильность. Лучшим будет считаться тот генотип, который сочетает высокую ОАС, демонстрирует наибольшую урожайность в благоприятных условиях произрастания и обеспечивает высокую стабильность максимального выражения признака.

Общая оценка 15 лучших генотипов, отобранных нами по селекционной ценности, представлена в таблице 2. Анализ показывает, что высокоурожайные образцы не всегда обладали высокой адаптивностью к изменяющимся условиям среды. Так, сорта 'Nord', 'Kortego' и 'Эра', составляющие тройку лидеров по СЦГ, имели урожайность от 495,3 до 538,7 г/м². Наилучшим сочетанием эффектов ОАС и селекционной ценности генотипа выделились образцы 'Жниво', 'АДМ 9' и 'Вектор', сформировавшие наивысшую продуктивность (602,7; 577,3 и 556,7 г/м² соответственно) и параметры, опре-

Таблица 2. Урожайность и параметры адаптивной способности образцов озимой тритикале, выделенных по селекционной ценности генотипа (ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, Республика Татарстан, 2018, 2020, 2021 г.)**Table 2. Yield and adaptability parameters of winter triticale accessions identified for the breeding value of the genotype** (Tatar Research Institute of Agriculture FRC KazSC of RAS, Republic of Tatarstan, 2018, 2020 and 2021)

№ по каталогу ВИР	Образец	Урожайность, г/м ²	ОАС _i	σ _{САСi}	СЦГ _i	Ранг по СЦГ
-	Башкирская Короткостебельная (ст.)	462,7	36,4	227,5	237,4	56
-	Nord	526,0	99,7	97,5	429,4	1
3752	Kortego	495,3	69,0	75,1	421,0	2
3957	Эра	538,7	112,4	134,2	405,8	3
3899	Импульс	526,0	99,7	150,1	377,4	4
-	Жниво	602,7	176,4	229,6	375,3	5
3900	Прометей	542,7	116,4	182,1	362,3	6
3689	Михась	447,3	21,0	86,6	361,5	7
-	Капелла	468,0	41,7	108,9	360,2	8
3421	АДМ 9	577,3	151,0	219,4	360,0	9
-	Башкирская 3	550,7	124,4	198,9	353,7	10
3863	SW Falmoro	470,7	44,4	121,0	350,9	11
3926	Утро	540,7	114,4	194,0	348,5	12
-	Динамо	502,7	76,4	159,1	345,1	13
3925	Руно	480,7	54,4	154,8	327,3	14
3756	Вектор	556,7	130,4	231,6	327,3	15
НСР₀₅		42,7				

Примечание: ОАС_i – общая адаптивная способность генотипа; σ_{САСi} – стандартное отклонение специфической адаптивной способности генотипа; СЦГ_i – селекционная ценность генотипа

Note: ОАС_i – general adaptive capacity of the genotype; σ_{САСi} – standard deviation of the specific adaptive capacity of the genotype; СЦГ_i – breeding value of the genotype

деляющие стабильность (СЦГ_i = 375,3; 360,0; 327,3 соответственно).

По мере повышения потенциальной продуктивности довольно часто отмечается значительная разница между минимальной и максимальной урожайностью (Goncharenko, 2005). Сравнительные показатели взаимодействия генотипа и среды, установили, что изменение внешних факторов может значительно ослабить или усилить формирование урожайности у образцов 'Lamberto', 'Ясь' и 'Magnat', имеющих наибольшие значения (табл. 3).

В то же время для образцов 'Ozozko', 'Вокализ' и 'ПРАГ Д 454' эффект взаимодействия был самым низким. Показано, что относительно высокой стрессоустойчивостью характеризовались как высокопродуктивные образцы 'Kortego', 'Nord' и 'Эра', у которых этот показатель равнялся 130, 186 и 240 соответственно, так и низкопродуктивные в наших условиях генотипы ('ПРАГ 456', 'ПРАГ 520', 'ПРАГ Д 454'). Важно, что первые два названных образца имели высокий нижний порог урожайности, что очень ценно для селекции. Следует также отметить, что из 15 приведенных, наиболее стабильных по урожайности сортов, только 8 значимо превзошли стандарт.

Показатель САС характеризует отклонение от ОАС в определенной среде, поэтому чем больше σ_{САСi}², тем менее стабилен признак при изменении условий среды. По дисперсии специфической адаптивной способности судили о стабильности сорта по продуктивности в разные по погодным условиям годы. Чем меньше значение дисперсии САС, тем более стабилен сорт по этому признаку. Тренд ранжирования, который наблюдается по стрессоустойчивости, в большой степени схож с параметром σ_{САСi}. По комплексу параметров, характеризующих устойчивость к стрессам и стабильности в сочетании с высокой урожайностью, выделены сорта 'Эра', 'Nord', 'Kortego', 'SW Falmoro', 'Ozozko', 'Михась', 'Капелла'.

Способность сортов в результате регуляторных механизмов поддерживать определенную урожайность растений на разных фонах характеризует и показатель относительной стабильности (S_{gi}, %): чем меньше его значение, тем стабильнее сорт в выражении этого признака (S_{gi} аналогичен коэффициенту вариации). В целом по изучаемой коллекции данный параметр изменялся от 15,2 до 89,2%. Самыми нестабильными по урожайности были 'ПРАГ Д 426' и 'Марс'. Коллекционные образцы с лучшими показателями S_{gi} приведены в таблице 4.

Таблица 3. Параметры урожайности (г/м²) и стабильности у образцов озимой тритикале, выделенных по стрессоустойчивости (среднее за 2018, 2020–2021 гг., ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, Республика Татарстан)**Table 3. Yield (g/m²) and stability parameters of winter triticale accessions identified for their stress resistance (average for 2018 and 2020–2021, Tatar Research Institute of Agriculture FRC KazSC of RAS, Republic of Tatarstan)**

№ по каталогу ВИР	Образец	Среднее	$\sigma^2_{(G \times E)_{gi}}$	σ_{CAC_i}	Минимум	Максимум	Стрессоустойчивость
–	Башкирская К/ст. (ст.)	462,7	1727,0	227,5	200	596	396
3751	Magnat	300,0	31828,1	54,4	260	362	102
3754	Lamberto	322,7	35290,4	62,0	268	390	122
3752	Kortego	495,3	26430,4	75,1	452	582	130
–	ПРАГ 456	193,3	23687,8	78,9	140	284	144
3686	Дубрава	396,0	22784,1	90,4	336	500	164
3689	Михась	447,3	12593,8	86,6	350	516	166
–	Балтико	404,0	12007,2	90,4	304	480	176
–	Nord	526,0	18805,9	97,5	450	636	186
3857	ПРАГ 520	190,0	16790,8	94,9	108	294	186
–	Капелла	468,0	21075,8	108,9	368	584	216
3939	Мамучар	308,0	17374,5	113,4	220	436	216
3759	Ясь	398,0	33649,4	117,7	304	530	226
3863	SW Falmoro	470,7	17765,4	121,0	380	608	228
3458	Colina	303,3	11079,3	115,2	192	422	230
–	3 oh Ag 3690	319,3	6528,3	120,4	186	420	234
3905	Вокализ	439,3	4465,0	133,0	286	524	238
3957	Эра	538,7	5257,2	134,2	384	624	240
–	Тарасовская Юбилейная	332,0	5562,1	133,8	178	420	242
3953	ПРАГ Д 454	225,3	5184,1	127,5	82	326	244
–	Ozozko	467,3	3540,3	144,9	300	552	252
НСР ₀₅		42,7					

Примечание: $\sigma^2_{(G \times E)_{gi}}$ – вариация взаимодействия генотипа и среды; σ_{CAC_i} – стандартное отклонение специфической адаптивной способности генотипа

Note: $\sigma^2_{(G \times E)_{gi}}$ – variance of the genotype-environment interaction; σ_{CAC_i} – standard deviation of the specific adaptive capacity of the genotype

Изучаемый показатель очень изменчив: только 5 образцов имели $S_{gi} < 20\%$, то есть умеренную изменчивость по урожайности. Остальные образцы характеризовались высокой вариабельностью за годы исследований. Выделены 5 сортов, сочетающих относительную стабильность и СЦГ: 'Nord', 'Kortego', 'Эра', 'Прометей' и 'Импульс'.

Обсуждение результатов

Степень реализации генетического потенциала продуктивности сорта зависит от большого количества экогенных факторов, которые определяются условиями

и интенсивностью возделывания, а также характеризуются высокой изменчивостью, что влечет за собой значительную вариабельность конечной урожайности. Рациональный подбор исходного материала для селекции предполагает комплексную оценку генетических ресурсов с тем, чтобы достичь уровня адаптивности, характерного для родительских видов – пшеницы и ржи. Однако применительно к тритикале эти ресурсы довольно ограничены. В связи с чем нами в 2018, 2020–2021 гг. исследованы 160 образцов из коллекции ВИР, происходящих из 10 стран, в сравнении с районированным сортом 'Башкирская Короткостебельная'. Большая часть исследуемо-

Таблица 4. Параметры адаптивной способности и селекционной ценности у образцов озимой тритикале, выделенных по относительной стабильности урожайности

(ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН, Республика Татарстан, 2018, 2020, 2021 г.)

Table 4. Adaptability and breeding value parameters of winter triticale accessions identified for their relative yield stability (Tatar Research Institute of Agriculture FRC KazSC of RAS, Republic of Tatarstan, 2018, 2020 and 2021)

№ по каталогу ВИР	Образец	ОАС _i	$\sigma^2_{(G \times E)gi}$	$\sigma^2_{CAC_i}$	σ_{CAC_i}	S _{gi}	СЦГ _i
-	Башкирская К/ст. (ст.)	36,4	1727,0	51749,3	227,5	49,2	237,4
3752	Kortego	69,0	26430,4	5633,3	75,1	15,2	421,0
3751	Magnat	-126,3	31828,1	2964,0	54,4	18,1	246,1
-	Nord	99,7	18805,9	9516,0	97,5	18,5	429,4
3754	Lamberto	-103,6	35290,4	3841,3	62,0	19,2	261,3
3689	Михась	21,0	12593,8	7505,3	86,6	19,4	361,5
-	Балтико	-22,3	12007,2	8176,0	90,4	22,4	314,4
3686	Дубрава	-30,3	22784,1	8176,0	90,4	22,8	306,4
-	Капелла	41,7	21075,8	11856,0	108,9	23,3	360,2
3957	Эра	112,4	5257,2	18005,3	134,2	24,9	405,8
3863	SW Falmogo	44,4	17765,4	14629,3	121,0	25,7	350,9
3899	Импульс	99,7	25070,5	22516,0	150,1	28,5	377,4
3759	Ясь	-28,3	33649,4	13852,0	117,7	29,6	281,4
3905	Вокализ	13,0	4465,0	17697,3	133,0	30,3	307,6
-	Ozozko	41,0	3540,3	21001,3	144,9	31,0	323,8
-	Динамо	76,4	3642,7	25305,3	159,1	31,6	345,1
3627	Lasho	29,7	2927,6	21072,0	145,2	31,8	312,2
3925	Руно	54,4	9956,2	23969,3	154,8	32,2	327,3
3748	Lupus	24,4	5312,7	21317,3	146,0	32,4	306,1
3896	Адась	13,0	50467,3	21177,3	145,5	33,1	295,2
3900	Прометей	116,4	17410,5	33157,3	182,1	33,6	362,3
	НСР₀₅	22,7					

Примечание: ОАС_i – общая адаптивная способность генотипа; $\sigma^2_{(G \times E)gi}$ – варианса взаимодействия генотипа и среды; $\sigma^2_{CAC_i}$ – варианса специфической адаптивной способности генотипа; σ_{CAC_i} – стандартное отклонение специфической адаптивной способности генотипа; S_{gi} – относительная стабильность генотипа; СЦГ_i – селекционная ценность генотипа

Note: ОАС_i – general adaptive capacity of the genotype; $\sigma^2_{(G \times E)gi}$ – variance of the genotype-environment interaction; $\sigma^2_{CAC_i}$ – variance of the specific adaptive capacity of the genotype; σ_{CAC_i} – standard deviation of the specific adaptive capacity of the genotype; S_{gi} – relative stability of the genotype; СЦГ_i – breeding value of the genotype

го генотипов колебалась в широких пределах: от 32 до 874 г/м² ('ПРАГ 468/1' и 'Марс' соответственно), а по средним значениям – в пределах от 200,6 (2021 г.) до 575,5 г/м² (2020 г.). При оценке исходного материала учитывалась общая адаптивная способность генотипа, которая характеризует среднюю величину признака в раз-

личных условиях среды и позволяет выделить сорта, обеспечивающие максимальный средний урожай во всей совокупности сред. Высокой ОАС_i обладали генотипы 'Жниво', 'АДМ 9', 'Святозар', 'Докучаевский 13', 'Вектор', 'Башкирская 3', 'Докучаевский 12', 'Немчиновский 56', 'Прометей', 'Утро', 'Эра', 'Тера', 'Сотник'. Среди приведенного перечня для включения в селекционную программу рекомендуются 'Жниво', 'АДМ 9' и 'Вектор', сочетающие высокую продуктивность и высокую средовую устойчивость.

личных условиях среды и позволяет выделить сорта, обеспечивающие максимальный средний урожай во всей совокупности сред. Высокой ОАС_i обладали генотипы 'Жниво', 'АДМ 9', 'Святозар', 'Докучаевский 13', 'Вектор', 'Башкирская 3', 'Докучаевский 12', 'Немчиновский 56', 'Прометей', 'Утро', 'Эра', 'Тера', 'Сотник'. Среди приведенного перечня для включения в селекционную программу рекомендуются 'Жниво', 'АДМ 9' и 'Вектор', сочетающие высокую продуктивность и высокую средовую устойчивость.

Э. Л. Климашевский (Klimashevsky, 1991) показал, что генетически обусловленный потенциал продуктивности можно выявить не только в благоприятных (оптимум влагообеспечения или минерального питания), но и в крайних (стрессовых) условиях. Условия возделывания озимой тритикале в Республике Татарстан, особенно в ее юго-восточной части, отличаются недостаточным увлажнением и ежегодным проявлением ростингибирующих температур в различные периоды онтогенеза. Согласно полученным нами результатам, в благоприятные по осадкам и температурному режиму годы наиболее полно свои потенциальные возможности проявляют сорта тритикале западноевропейского происхождения, однако в засушливых условиях они резко снижали урожай.

Повышение показателей стабильности урожайности во многом зависит от отзывчивости на благоприятные условия выращивания и устойчивости к стрессовым факторам. Поэтому нами проанализированы параметры, характеризующие устойчивость этого признака.

Стрессоустойчивость ($Y_{\max} - Y_{\min}$) отражает колебания урожайности по годам, независимо от ее величины. Сравнительно невысокие колебания отмечены у сортов 'Magnat', 'Lamberto', 'Kortego', 'ПРАГ 456'. Среди стрессоустойчивых генотипов лишь два ('Nord' и 'Эра') существенно превосходили 'Башкирскую Короткостебельную' по урожайности. Шесть образцов имели сравнимую со стандартом ($420-505,4 \text{ г/м}^2$, что на уровне НСР₀₅) урожайность: 'SW Falmoro', 'Kortego', 'Михась', 'Капелла', 'Вокализ' и 'Ozozko', а остальные – значимо более низкую.

В целом для большинства изученных сортов отмечалась значительная разность между максимальной и минимальной урожайностью, что свидетельствует о недостаточной устойчивости генотипов тритикале к неблагоприятным факторам среды.

Стабильность реакции генотипа по продуктивности также определяется величиной параметра $\sigma^2_{CAC_i}$. Сорта с высокими значениями урожайности и ее стабильности способны быть устойчивыми к специфическим условиям сред выращивания (эпифитотия заболеваний, засуха, высокие температуры, обильные осадки и пр.) и являются ценным исходным материалом. По нашим расчетам, к генотипам с высокими параметрами ($\sigma^2_{CAC_i}$ 153 388–74 585) следует отнести российские сорта 'Докучаевский 12', 'Докучаевский 13', 'Гера', 'Валентин', 'Сотник', 'Святозар' и 'Зимогор'. Можно заметить, что в группу генотипов с высокой ОАС попали сорта 'Докучаевский 13', 'Докучаевский 12', 'Прометей' и 'Гера', отличающиеся наименьшей стабильностью. Такие генотипы не обеспечат гарантированного высокого урожая в любой год испытания.

В то же время параметр $\sigma^2_{CAC_i}$ характеризует специфическую адаптивную способность, то есть названные сорта с высокой величиной этого показателя формируют большую урожайность, полнее используя благоприятные условия среды. Самыми нестабильными по вариансе специфической адаптивной способности ($\sigma^2_{CAC_i}$) оказались сорта 'Марс', 'АДМ 8', 'Парус', 'Варвара', 'Устинья', 'АД 412/2'.

В средних по продуктивности средах сохраняется изменчивость генотипов по норме реакции, и можно рассчитывать, что эффективность отбора на общую адаптивную способность будет высокой. Отбор только в комфортных или крайне неблагоприятных средах может привести к потере экологической стабильности и выделению только узко приспособленных генотипов.

Ориентируясь на показатель относительной стабильности, следует подбирать сорта с наименьшим значением S_{gi} при одновременно высоком ОАС. Сочетанием таких параметров выделялись генотипы 'Эра', 'Импульс' и 'Nord'. Это указывает на то, что данные образцы формируют высокую урожайность, которая в наименьшей степени менялась в зависимости от погодных условий.

Для достижения оптимального баланса при отборе по продуктивности и стабильности рассчитан показатель СЦГ. Лучшими генотипами, сочетающими высокую продуктивность со стабильным урожаем, оказались 'Жниво', 'АДМ 9', 'Башкирская 3', 'Прометей', 'Утро', 'Эра'.

Коэффициент корреляции между показателем S_{gi} (%) и стрессоустойчивостью, рассчитанный по всем 161 образцам, равняется 0,765, тогда как взаимосвязь между первым показателем и СЦГ была значимой и отрицательной ($r = -0,861$). Коэффициент корреляции между варианой взаимодействия «генотип – среда» и показателем σ_{CAC_i} характеризующим стабильность, также был невысоким ($r = 0,120$), что предполагает наличие генотипов с дестабилизирующим эффектом, таких как, например, сорта 'Торнадо', 'Кристалл', 'АД 52'. Взаимосвязь между средней урожайностью и селекционной ценностью генотипа была значимой и умеренной ($r = 0,690$). Однако корреляция между средней продуктивностью генотипа и другими параметрами стабильности урожайности ($\sigma^2_{(G \times E)_{gi}}$, $\sigma^2_{CAC_i}$, σ_{CAC_i} , S_{gi}) отсутствовала ($r = 0,018-0,399$). Это говорит о том, что в исследуемом наборе были стабильными как высокопродуктивные, так и низкопродуктивные генотипы, а среднее значение признака и его средовая чувствительность относительно независимы и могут сочетаться в одном генотипе в различных комбинациях.

Заключение

Представлены результаты определения параметров адаптивности и стабильности 161 образца озимой тритикале из коллекции ВИР в Средневолжском регионе РФ. В результате проведенных исследований выделены генотипы, отличающиеся высокой общей адаптивной способностью и обеспечивающие максимальный средний урожай по всей совокупности сред: 'Жниво', 'АДМ 9', 'Башкирская 3', 'Прометей', 'Утро', 'Эра', 'Святозар', 'Докучаевский 13', 'Вектор', 'Докучаевский 12', 'Немчиновский 56', 'Гера', 'Сотник'. Из перечисленных сортов первые шесть сочетали высокую продуктивность со стабильным урожаем. К стрессоустойчивым генотипам, достоверно превосходящим стандарт, отнесены образцы 'Nord' и 'Эра'. Наилучшей селекционной ценностью генотипа обладали сорта 'Жниво', 'АДМ 9' и 'Вектор', сочетающие высокую продуктивность и высокую средовую устойчивость, которые рекомендованы для включения в селекционный процесс. Сорта 'Эра', 'Импульс' и 'Nord' выделялись сочетанием наименьшего значения S_{gi} при одновременно высоком ОАС. Данные сорта формируют высокую урожайность, которая в наименьшей степени зависит от погодных условий. Относительная стабильность генотипа положительно тесно коррелировала со стрессоустойчивостью и отрицательно – с селекционной ценностью генотипа. Корреляция между средней урожайностью и СЦГ была значимой и умеренной ($r = 0,690$), а с другими эколого-генетическими параметрами, характеризующими стабильность, отсутствовала. Проведенный анализ показал, что в исследуемом коллекционном наборе из 161 образца были стабильными как высокопродуктивные,

так и низкопродуктивные генотипы, а среднее значение признака и его средовая чувствительность относительно независимы и могут сочетаться в одном генотипе в различных комбинациях.

References / Литература

- Dzyubenko N.I. Vavilov strategy of collecting, maintaining and rational utilization of plant genetic resources of cultivated plants and their wild relatives. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;169:4-40. [in Russian] (Дзюбенко Н.И. Вавиловская стратегия пополнения, сохранения и рационального использования генетических ресурсов культурных растений и их диких родичей. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;169:4-40).
- Goncharenko A.A. On adaptivity and ecological resistance of grain crop varieties. *Vestnik of the Russian Academy of Agricultural Sciences*. 2005;(6):49-53. [in Russian] (Гончаренко А.А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур. *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2005;(6):49-53).
- Gordei I.A., Lyusikov O.M., Belko N.B., Khotyleva L.V., Kaminskaya L.N., Koren L.V. et al. Triticale (Tritikale). In: *Genetic Foundations of Plant Breeding. In 4 volumes. Vol. 2. Genetics Proper of Plants (Geneticheskiye osnovy selektsii rasteniy. V 4 tomakh. T. 2. Chastnaya genetika rasteniy)*. Minsk; 2010. p.52-119. [in Russian] (Гордей И.А., Люсиков О.М., Белько Н.Б., Хотылева Л.В., Каминская Л.Н., Корень Л.В. и др. Тритикале. В кн.: *Генетические основы селекции растений. В 4 томах. Т. 2. Частная генетика растений*. Минск; 2010. С.52-119).
- Gordinskaya E.A., Krochmal A.V., Grabovets A.I., Barulina N.I., Biryukova O.V. *Characteristic of biological potential of winter triticale varieties. Legumes and Groat Crops*. 2021;38(2):158-164. [in Russian] (Гординская Е.А. Крохмаль А.В., Грабовец А.И., Барулина Н.И., Бирюкова О.В. Характеристика биологического потенциала сортов озимого тритикале. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2021;38(2):158-164). DOI: 10.24412/2309-348X-2021-2-158-164
- Grabovets A.I. Triticale – results of selection and issues of use. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019;(1):32-36. [in Russian] (Грабовец А.И. Тритикале – итоги селекции и проблемы использования. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019;(1):32-36). DOI: 10.30850/vrhn/2019/1/32-36
- Kasynkina O.M., Orlova N.S., Kanevskaya I.Yu. Evaluation of winter varieties of triticale on disease resistance. *The Agrarian Scientific Journal*. 2017;(8):7-10. [in Russian] (Касынкина О.М., Орлова Н.С., Каневская И.Ю. Оценка озимых сортов тритикале на устойчивость к болезням. *Аграрный научный журнал*. 2017;(8):7-10).
- Kilchevsky A.V., Khotyleva L.V. A method for estimation of genotypes adaptive ability and stability, of environment's differentiative ability. I. Grounds of the method. *Russian Journal of Genetics*. 1985;21(9):1481-1490. [in Russian] (Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Метод оценки адаптивной способности и стабильности генотипов, дифференцирующей способности среды. Сообщение 1. Обоснование метода. *Генетика*. 1985;21(9):1481-1490).
- Klimashevsky E.L. Genetic aspect of plant mineral nutrition (Geneticheskiy aspekt mineralnogo pitaniya rasteniy). Moscow: Agropromizdat; 1991. [in Russian] (Климашевский Э.Л. Генетический аспект минерального питания растений. Москва: Агропромиздат; 1991).
- Krokhmal A.V., Grabovets A.I., Gordinskaya E.A., Fomicheva A.A. Effect of the results of winter durum wheat selection on the crop yields and adaptability in the Don region. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2019;2(76):67-69. [in Russian] (Крохмаль А.В., Грабовец А.И., Гординская Е.А., Фомичева А.А. Результаты селекции озимого тритикале на продуктивность и адаптивность на Дону. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019;2(76):67-69).
- Krokhmal' A.V., Grabovets A.I., Gordinskaya E.A., Biryukov K.N., Barulina N.I. Breeding of feed triticale for good productivity and adaptability. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2020;34(6):54-58. [in Russian] (Крохмаль А.В., Грабовец А.И., Гординская Е.А., Бирюков К.Н., Барулина Н.И. Селекция тритикале кормового направления на продуктивность и адаптивность. *Достижения науки и техники АПК*. 2020;34(6):54-58). DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10610
- Merezhko A.F., Udachin R.A., Zuev E.V., Filatenko A.A., Serbin A.A., Lyapunova O.A., Kosov V.Yu., Kurkiev U.K., Okhotnikova T.V., Navruzbekov N.A., Boguslavskiy R.L., Abdulaeva A.K., Chikida N.N., Mitrofanova O.P., Potokina S.A. Replenishment, preservation in living form and study of the world collection of wheat, Aegilops and triticale: guidelines (Popolneniye, sokhraneniye v zhivom vide i izucheniye mirovoy kolleksitsii pshenitsy, egilopsa i tritikale: metodicheskiye ukazaniya). A.F. Merezhko (ed.). St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Мережко А.Ф., Удачин Р.А., Зуев Е.В., Филатенко А.А., Сербин А.А., Ляпунова О.А., Косов В.Ю., Куркиев У.К., Охотникова Т.В., Наврузбеков Н.А., Богуславский Р.Л., Абдулаева А.К., Чикида Н.Н., Митрофанова О.П., Потоккина С.А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания / под ред. А.Ф. Мережко. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).
- Ponomarev S.N., Ponomareva M.L., Tagirov M.Sh. Evaluation of phenotypic stability of winter triticale varieties by grain yield by biplot analysis. *Zemledelie = Crop Farming*. 2018;(8):34-37. [in Russian] (Пономарев С.Н., Пономарева М.Л., Тагиров М.Ш. Оценка фенотипической стабильности сортов озимой тритикале по урожайности зерна методом биplot-анализа. *Земледелие*. 2018;(8):34-37). DOI: 10.24411/0044-3913-2018-10810
- Ripberger E.I., Bome N.A., Trautz D. Variability of the height of plants of hybrid forms of spring common wheat (*Triticum aestivum* L.) under different ecological and geographical conditions. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2015;19(2):35-40. [in Russian] (Рипбергер Е.И., Боме Н.А., Траутц Д. Изменчивость высоты растений гибридных форм яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) как способ их адаптации в различных эколого-географических условиях. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2015;19(2):35-40).
- Sokolenko N.I., Komarov N.M. Evaluation of triticale variety samples by crop structure elements. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2021;2(26):200-207. [in Russian] (Соколенко Н.И., Комаров Н.М. Оценка сортообразцов тритикале по элементам структуры урожая. *Таврический вестник аграрной науки*. 2021;2(26):200-207). DOI: 10.33952/2542-0720-2021-2-26-200-207
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotech; 2023. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достиже-

ний, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформаротех; 2023).

Uspenskaja V.A., Bekish L.P., Chikida N.N. Sources of economically valuable traits for winter triticale breeding in the northwest of the Russian Federation. *Proceedings on*

Applied Botany, Genetics and Breeding. 2018;179(3):85-94. [in Russian] (Успенская В.А., Бекиш В.А., Чикида Н.Н. Источники хозяйственно ценных признаков для селекции озимой тритикале на Северо-Западе РФ. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(3):85-94). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-85-94

Информация об авторах

Назлыгуль Шамсутдиновна Гараева, аспирант, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр Российской академии наук, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение КазНЦ РАН, 420059 Россия, Казань, Оренбургский тракт, 48, cimba93@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7401-8946>

Сергей Николаевич Пономарев, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр Российской академии наук, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение КазНЦ РАН, 420059 Россия, Казань, Оренбургский тракт, 48, s.ponomarev2020@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8898-4435>

Мира Леонидовна Пономарева, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией, Федеральный исследовательский центр Казанский научный центр Российской академии наук, Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное структурное подразделение КазНЦ РАН, 420059 Россия, Казань, Оренбургский тракт, 48, smponomarev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

Information about the authors

Nazlygul Sh. Garaeva, Postgraduate Student, Researcher, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Tatar Research Institute of Agriculture, subdivision of the KazSC RAS, 48 Orenburgsky Tract, Kazan 420059, Russia, cimba93@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7401-8946>

Sergey N. Ponomarev, Dr. Sci. (Agriculture), Chief Researcher, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Tatar Research Institute of Agriculture, subdivision of the KazSC RAS, 48 Orenburgsky Tract, Kazan 420059, Russia, s.ponomarev2020@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8898-4435>

Mira L. Ponomareva, Dr. Sci. (Biology), Professor, Chief Researcher, Head of a Laboratory, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Tatar Research Institute of Agriculture, subdivision of the KazSC RAS, 48 Orenburgsky Tract, Kazan 420059, Russia, smponomarev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

Вклад авторов: Гараева Н. Ш. – анализ литературных данных; проведение экспериментов; написание текста статьи. Пономарев С. Н. – общее научное руководство; формирование методологии исследования; редактирование статьи. Пономарева М. Л. – общее научное руководство; формирование методологии исследования; редактирование статьи.

Contribution of the authors: Garaeva N. Sh. – analysis of published data; performance of the experiments; writing of the text of the article. Ponomarev S. N. – general scientific supervision; development of the research methodology; editing of the article. Ponomareva M. L. – general scientific supervision; development of the research methodology; editing of the article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 16.09.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 16.09.2023; approved after reviewing on 05.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.13:58.051
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138



Изучение разнообразия алюмоустойчивости образцов овса из коллекции ВИР

И. Г. Лоскутов^{1,2}, Е. В. Блинова¹, Л. Ю. Новикова¹

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Блинова, e.blinova@vir.nw.ru

Актуальность. Овес является важной продовольственной и кормовой зерновой культурой в России. Площади посевов овса составляют в мире 10 млн га, в нашей стране – 3 млн га. Несмотря на высокую экологическую пластичность овса, важным условием получения высоких урожаев является создание новых сортов с устойчивостью к неблагоприятным факторам внешней среды, в том числе к металлотоксичности и повышенной кислотности почв. Цель работы – поиск устойчивых к неблагоприятным почвенным факторам (избыток ионов H^+ и Al^{3+}) сортов для использования в селекции на эдафическую устойчивость.

Материалы и методы. Материалом для исследований служили 687 сортов (образцов) овса из коллекции генетических ресурсов растений ВИР. Лабораторную оценку алюмотолерантности образцов овса проводили на начальных этапах роста и развития с использованием метода учета прироста корешков после стрессорного воздействия алюминия. Математически доказана воспроизводимость использованной модификации метода.

Результаты и обсуждение. Показано значительное варьирование изученного признака между образцами. Определены регионы – источники ценных генов алюмоустойчивости культуры. Среди изученных образцов овса выделены алюмотолерантные сорта. Они могут быть использованы в селекционном процессе на продуктивность и эдафическую устойчивость для создания сортов овса.

Ключевые слова: *Avena sativa* L., подвижный алюминий, отрастание корешков, алюмотолерантность

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».

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

Для цитирования: Лоскутов И.Г., Блинова Е.В., Новикова Л.Ю. Изучение разнообразия алюмоустойчивости образцов овса из коллекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):129-138. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138

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

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138

Evaluation of aluminum tolerance diversity in *Avena sativa* L. from the VIR collection

Igor G. Loskutov^{1,2}, Elena V. Blinova¹, Liubov Yu. Novikova¹

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

² St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Elena V. Blinova, e.blinova@vir.nw.ru

Background. Oat is an important food and feed cereal crop in Russia. The area under oats is 10 million ha worldwide, and 3 million ha in Russia. Acid soils with excessive content of exchangeable aluminum occupy almost every third hectare in the ex-USSR territory. Oats are relatively resistant to unfavorable soil factors. Among cereal crops, oat is second only to rye and triticale in terms of resistance to exchangeable Al forms. Despite the crop's high environmental plasticity, an important condition for obtaining sustainable oat yields is the development of new cultivars with resistance to adverse environmental factors, including metal toxicity and high soil acidity. The objective of this work was to search for oat cultivars resistant to soil stressors (excess of H⁺ and Al³⁺) for use in breeding for edaphic resistance.

Materials and methods. The research material included 687 oat accessions from the VIR global plant genetic resources collection. The accessions underwent laboratory evaluation of their aluminum tolerance at the initial growth and development stages using the method of measuring radicle growth after the exposure to aluminum stress. Reproducibility of the used modification of the method was mathematically proved.

Results and discussion. Significant variation in the resistance to the studied stressor was observed among the accessions. The regions acting as sources of valuable aluminum resistance genes were identified for the crop. The accessions selected for their high resistance to exchangeable aluminum can be used in breeding programs to develop high-yielding oat cultivars with edaphic resistance.

Keywords: oat, exchangeable aluminum, radicle growth, aluminum tolerance

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan 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".

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

For citation: Loskutov I.G., Blinova E.V., Novikova L.Yu. Evaluation of aluminum tolerance diversity in *Avena sativa* L. from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):129-138. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-129-138

Введение

Неблагоприятные эдафические условия, помимо погодных условий, являются одним из лимитирующих факторов внешней среды. Зерновые культуры характеризуются разнообразной реакцией на эдафический стресс, что в свою очередь влияет на общую адаптивность растений. Условия, связанные с повышенной кислотностью почвы и накоплением токсичных ионов алюминия, являются одними из лимитирующих факторов окружающей среды. Они влияют на физиологические и биохимические процессы в корнях, что сказывается на поступлении основных элементов питания в растение, а также на продолжительности прохождения отдельных фаз развития и всего вегетационного периода, на формировании отдельных элементов продуктивности и в конечном счете на общей продуктивности растений (Aniol, 1997; Nava et al., 2006; Silva, 2012; Gupta et al., 2013; Zhao, Shen, 2018).

Кислые почвы с избыточным содержанием подвижного алюминия занимают на территории Российской Федерации почти каждый третий гектар. Овес посевной проявляет относительную устойчивость к неблагоприятным почвенным факторам. Он менее требователен к плодородию почвы, чем пшеница и ячмень, и может произрастать на супесчаных, глинистых и торфянистых почвах. Также посевной овес меньше других зерновых культур сокращает свою продуктивность при различном уровне кислотности, а некоторые сорта могут произрастать в засушливых условиях и на засоленных почвах, что обеспечивает ему распространение во многих сельскохозяйственных регионах мира (Rodionova et al., 1994). По устойчивости к подвижному алюминию среди зерновых культур овес не превосходит только рожь и тритикале. Тем не менее оптимум pH почвенного раствора для культивирования овса составляет 5,0–7,7, а избыток подвижного алюминия в кислой почве приводит к существенному уменьшению зерновой продуктивности у данной культуры (Nettevich, 1976).

В связи с этим выведение кислотоустойчивых сортов овса – одно из важнейших направлений селекции. Как известно, такие сорта способны в наибольшей степени усваивать труднодоступные элементы почвы и требуют меньших доз извести и минеральных удобрений при их выращивании (Avdonin, 1972).

Идентификация генов толерантности к алюминию у овса не проводилась. Однако при работе с другими зерновыми культурами было установлено, что гены толерантности к алюминию у пшеницы были локализованы в плечах хромосом 6AL, 7AS, 2DL, 3DL, 4DL и 4BL и на хромосоме 7D. Основные гены толерантности у ржи, по-видимому, расположены на 3R и 6RS, а другие гены – на 4R. Экспрессия этих генов, расположенных на хромосомах ржи, при скрещивании с пшеницей часто подавлялась действием неустановленных генов на фоне генома пшеницы (Aniol, Gustafson, 1984).

Поиск новых источников толерантности к алюминию у диких видов культурных растений приобретает особое значение, так как эти признаки, первоначально присущие диким предкам, утратились культурными видами в ходе эволюции. Исследования диких видов овса установили, что виды с С-геномом (диплоидные и тетраплоидные) имели низкий уровень алюмотолерантности, тогда как виды с А-геномом с разным уровнем пloidности чаще показывали высокую толерантность. Самая большая группа толерантных форм среди

диких видов овса принадлежала к гексаплоидам (Loskutov et al., 2017).

Для более детального изучения культурных видов овса на толерантность к алюминию применялись молекулярно-генетические методы. С использованием RFLP-маркеров были протестированы регионы, где сравнительное картирование показало вероятность нахождения локусов ортологичных количественных признаков (QTL) толерантности к алюминию у других видов растений (Wright et al., 2006). Для оценки реакции роста корней на воздействие Al разработали хромосомную генетическую карту для рекомбинантной инбредной популяции посевного овса и для идентификации маркеров SNP, связанных с локусами количественных признаков (QTL) (Schneider et al., 2015).

Формирование исходного материала, отбор образцов с проявлением признака алюмотолерантности имеют большое значение в селекции овса посевного (Kosareva et al., 2013). Ранее нами была установлена значительная меж- и внутривидовая изменчивость в роде *Avena* L. по признаку устойчивости к алюмотоксичности и определены регионы, из которых происходили устойчивые образцы (Kosareva et al., 1998; Kosareva, 2012; Loskutov et al., 2017).

Целью настоящего исследования было изучение алюмоустойчивости большого набора образцов овса из мировой коллекции ВИР для использования в селекции на продуктивность и эдафическую устойчивость данной культуры.

Материалы и методы

В изучение были взяты 687 образцов овса из мировой коллекции ВИР, различающихся по эколого-географическому происхождению (Kosareva et al., 2021). Образцы овса проходили полевое изучение на полях научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» по основным хозяйственно ценным признакам в 2011 г. и в 2014–2019 гг. Размножение и изучение образцов коллекции проводили по методическим указаниям ВИР (Loskutov et al., 2012).

Лабораторное изучение образцов коллекции проводили в климатической камере с освещенностью 7 Лк, температурой 19–21°C и фотопериодом 16 ч. За основу нами был взят метод оценки алюмоустойчивости А. Aniol (1991, 1996) в нашей модификации (Kosareva et al., 1995; Kosareva, Semenova, 2005) с использованием эриохромцианинового красителя, разработанный для зерновых культур, в основе которого лежит учет степени восстановления (или отсутствия восстановления) митотической активности корней проростков, подвергнутых шоковому воздействию повышенных концентраций алюминия. Устойчивость растений к алюминию определяли по длине отрастания кончика корешка.

Статистическая обработка результатов. Для каждого образца по всем вариантам опыта рассчитывали основные статистические параметры (среднее в см, ошибка среднего, коэффициент вариации CV в %, значения минимума и максимума прироста корня в см). Для статистической обработки данных использовали пакет программ Statistica 13.3. Для сравнения двух испытаний алюмоустойчивости набора образцов использован t-критерий Стьюдента для связанных выборок. Различия групп географического происхождения показаны дисперсионным анализом с апостериорным критерием LSD.

Результаты и обсуждение

В ходе исследований проверяли воспроизводимость метода оценки алюмоустойчивости образцов овса. Для этого одни и те же образцы высевали в течение двух лет (2014–2015 гг.) и тестировали алюмоустойчивость полученных зерен (табл. 1). Критерий Стьюдента (t-критерий) для связанных выборок показал отсутствие различий между повторностями ($p = 0,597$). При этом для 19 сортов из 20 достоверных различий между повторностями нет; только для одного образца (к-12104) устойчивость во второй повторности была ниже, чем в первой (0,6 вместо 0,8; $p = 0,021$). Таким образом, данный показатель характеризуется высокой воспроизводимостью.

Повторяемость опыта дает возможность сравнивать результаты, полученные на зерне разных образцов овса, выращенных в разные годы изучения.

По результатам лабораторного скрининга установлено, что устойчивость образцов, выраженная через отрастание кончика корня, варьировала от 0,1 до 2,1 см. Устойчивых образцов, с отсутствием репарационного отрастания, не было. Среднее значение устойчивости в выборке – 0,96 см, медианное – 0,94 см; 50% изученных образцов имели устойчивость в интервале 0,64–1,25 см. По величине отрастания корня образцы разделены на группы устойчивости. Слабой устойчивостью (отрастание 0,1–0,75 см) отличались 187 образцов. Из них у 6 образцов отмечено минимальное отрастание (0,1 см): у сортов

Таблица 1. Сравнение результатов оценки алюмоустойчивости образцов овса, выращенных в полевых условиях научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», 2014–2015 гг.

Table 1. Comparison of the aluminum resistance assessment results among oat accessions grown under the field conditions at Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR in 2014–2015

№ по каталогу ВИР	Отрастание кончика корня, см							
	2014				2015			
	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
10796	1,0	0,3	0,6	1,4	1,2	0,3	0,7	1,5
10870	0,9	0,1	0,8	1,0	0,9	0,3	0,5	1,2
10935	1,4	0,4	1,0	1,8	1,3	0,3	0,8	1,7
11369	0,8	0,0	0,8	0,8	0,9	0,2	0,5	1,5
11718	1,0	0,2	0,8	1,1	0,7	0,3	0,3	1,0
11901	1,0	0,0	1,0	1,0	0,8	0,3	0,5	1,3
11902	1,4	0,1	1,3	1,4	1,1	0,3	0,7	1,5
12104	0,8	0,1	0,7	1,0	0,6	0,2	0,3	0,9
12105	0,6	0,0	0,6	0,6	0,6	0,2	0,3	1,1
12363	0,5	0,0	0,5	0,5	0,5	0,1	0,4	0,6
12370	1,1	0,3	0,5	1,7	1,1	0,2	0,7	1,3
12371	0,8	0,2	0,4	1,2	0,8	0,2	0,5	1,2
12380	1,2	0,4	0,7	1,8	1,2	0,2	0,8	1,5
12381	1,2	0,3	0,8	1,7	1,2	0,2	0,9	1,4
12382	1,2	0,4	0,8	1,7	1,1	0,2	0,8	1,4
12383	0,7	0,2	0,4	1,1	0,6	0,2	0,3	1,1
12385	1,5	0,3	0,9	2,0	1,4	0,3	0,9	1,8
12387	0,6	0,1	0,4	0,8	0,5	0,1	0,3	0,8
12402	1,4	0,3	1,0	1,8	1,4	0,3	0,7	1,7
12436	1,6	0,3	1,0	1,8	1,6	0,1	1,3	1,7
Среднее	1,1	0,4	0,4	2,0	1,0	0,4	0,3	1,8

‘Владыка’ (к-15408, Беларусь), ‘Wombat’ (к-15748, Австралия) и образцов из Бразилии (к-15489, к-15597, к-15610, к-15730). Высокую устойчивость (отрастание больше 1,5 см) показали 88 образцов овса, в том числе максимальную величину отрастания (2,0–2,1 см) имели 5 образцов: из России – ‘Козырь’ (к-14029, Московская обл.), У 70/14 (к-15572, Ульяновская обл.), Австралии – ‘Tungoo’ (к-15750), Бразилии – к-15735, к-15740 (табл. 2). Следует отметить, что наибольшее число устойчивых образцов происходит из Российской Федерации (Московской, Кировской, Ульяновской, Томской областей, Алтайского края) и Бразилии. Основная масса образцов показала среднюю устойчивость к алюмотоксичности (рис. 1).

Рассмотрено проявление признака устойчивости к токсичному действию алюминия у образцов овса различного эколого-географического происхождения (табл. 3).

Наибольшее число изученных образцов было из России – 384, Бразилии – 125, Китая – 29, Германии и США – по 20, Словакии – 17, Швеции – 14 образцов.

Исследовали особенности групп географического происхождения с числом образцов 10 и более. Однофакторный дисперсионный анализ показал наличие выделяющихся по устойчивости групп ($p = 0,000$) (рис. 2).

Апостериорный критерий LSD показал наличие контрастных групп, достоверно отличающихся друг от дру-

Таблица 2. Характеристика алюмоустойчивости выделенных образцов овса

Table 3. Characterization of aluminum resistance in the selected oat accessions

Номер по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Число измерений, шт.	Отрастание кончика корня, см			
				Среднее	Коэффициент вариации, %	Минимум	Максимум
14029	‘Козырь’	Россия, Московская обл.	39	2,00 ± 0,05	15,8	1,3	2,5
15573	У-70/14	Россия, Ульяновская обл.	41	2,01 ± 0,04	11,9	1,5	2,4
15735	UFRGS 03 8028-6	Бразилия	36	2,11 ± 0,04	11,7	1,7	2,7
15740	UFRGS 04 7000-1	Бразилия	35	2,00 ± 0,04	1,32	1,5	2,5
15750	‘Tungoo’	Австралия	36	2,03 ± 0,04	12,4	1,7	2,5

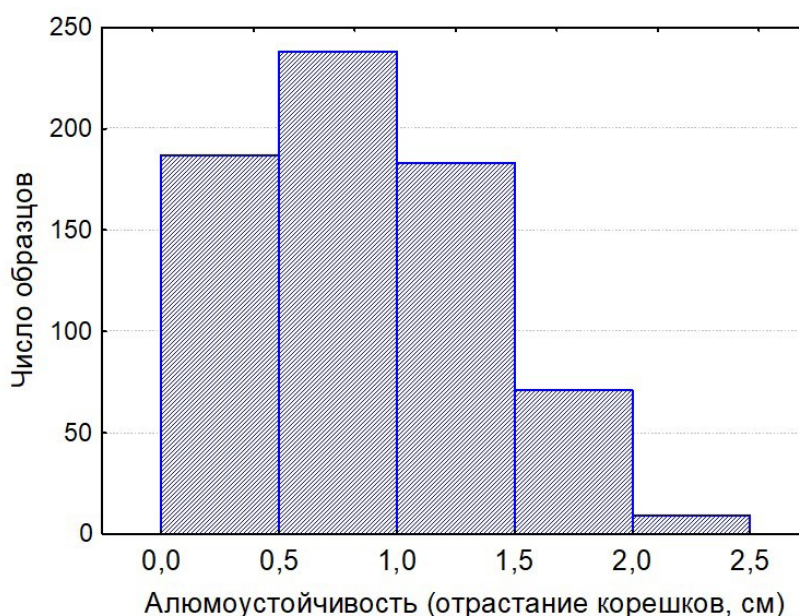


Рис. 1. Распределение 687 образцов овса по алюмоустойчивости

Fig. 1. Distribution of 687 oat accessions according to their aluminum resistance

Таблица 3. Проявление признака устойчивости к алюминию у образцов овса

Table 2. Characterization of aluminum resistance in oat accessions

Происхождение	Число образцов, шт.	Отрастание кончика корня, см				
		Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Минимум	Максимум
Австралия	9	0,94 ± 0,19	0,58	61,2	0,14	2,03
Австрия	8	0,79 ± 0,13	0,37	46,7	0,20	1,32
Беларусь	4	1,04 ± 0,11	0,22	21,3	0,90	1,37
Болгария	1	0,81	-	-	0,81	0,81
Бразилия	125	0,7 ± 0,04	0,48	68,8	0,10	2,11
Великобритания	4	0,57 ± 0,15	0,31	53,4	0,37	1,02
Германия	20	1,04 ± 0,06	0,27	25,8	0,53	1,59
Казахстан	7	0,7 ± 0,1	0,27	38,2	0,31	1,08
Канада	7	0,72 ± 0,1	0,26	35,6	0,47	1,13
Кипр	1	0,2	-	-	0,2	0,2
Китай	29	0,57 ± 0,07	0,40	69,6	0,16	1,67
Киргизия	1	1,16	-	-	1,16	1,16
Латвия	2	1,46 ± 0,04	0,05	3,7	1,43	1,50
Нидерланды	2	1,52 ± 0,04	0,06	3,6	1,48	1,56
Норвегия	4	0,97 ± 0,11	0,22	23,2	0,80	1,29
Перу	1	0,65	-	-	0,65	0,65
Польша	11	1,03 ± 0,09	0,31	30,5	0,57	1,58
Португалия	1	1,14	-	-	1,14	1,14
Россия, Адыгея	5	1,07 ± 0,25	0,57	53,2	0,47	1,79
Россия, Алтайский край	19	1,44 ± 0,08	0,34	23,4	0,83	1,89
Россия, Архангельская обл.	1	0,67	-	-	0,67	0,67
Россия, Бурятия	4	0,85 ± 0,13	0,26	31,0	0,58	1,18
Россия, Свердловская обл.	8	0,93 ± 0,08	0,22	23,5	0,66	1,17
Россия, Иркутская обл.	6	1,18 ± 0,18	0,44	37,0	0,82	1,79
Россия, Кемеровская обл.	8	1,11 ± 0,18	0,50	44,6	0,48	1,95
Россия, Кировская обл.	96	1,09 ± 0,03	0,33	30,4	0,30	1,85
Россия, Краснодарский край	6	1,16 ± 0,16	0,38	33,1	0,68	1,63
Россия, Красноярский край	4	1,15 ± 0,3	0,60	52,1	0,31	1,60

Таблица 3. Окончание
Table 2. The end

Происхождение	Число образцов, шт.	Отрастание кончика корня, см				
		Среднее	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Минимум	Максимум
Россия, Курская обл.	4	0,86 ± 0,14	0,28	33,1	0,70	1,29
Россия, Ленинградская обл.	10	1,1 ± 0,11	0,36	32,7	0,58	1,72
Россия, Московская обл.	82	1,06 ± 0,04	0,38	36,1	0,10	2,00
Россия, Мурманская обл.	1	1,05	-	-	1,05	1,05
Россия, Новосибирская обл.	6	1,31 ± 0,08	0,20	15,4	1,00	1,59
Россия, Омская обл.	33	1,07 ± 0,07	0,38	35,2	0,49	1,77
Россия, Орловская обл.	1	0,94	-	-	0,94	0,94
Россия, Республика Саха	3	0,87 ± 0,28	0,48	55,0	0,43	1,38
Россия, Сахалинская обл.	1	0,63	-	-	0,63	0,63
Россия, Свердловская обл.	6	1,6 ± 0,13	0,32	20,0	1,10	1,95
Россия, Томская обл.	18	1,25 ± 0,09	0,37	29,6	0,59	1,85
Россия, Тюменская обл.	13	1,27 ± 0,08	0,27	21,4	0,87	1,84
Россия, Ульяновская обл.	45	0,9 ± 0,06	0,43	48,0	0,12	2,01
Россия, Хабаровский край	4	1,14 ± 0,1	0,19	17,0	0,87	1,30
Словакия	17	0,71 ± 0,07	0,31	43,3	0,25	1,43
США	20	1,04 ± 0,09	0,41	39,0	0,52	1,98
Турция	1	1,76	-	-	1,76	1,76
Украина	1	0,84	-	-	0,84	0,84
Финляндия	3	1,13 ± 0,14	0,24	21,6	0,88	1,36
Франция	2	0,92 ± 0,38	0,54	58,9	0,54	1,31
Чехия	4	1,09 ± 0,21	0,41	38,0	0,47	1,35
Швейцария	1	0,84	-	-	0,84	0,84
Швеция	14	1,01 ± 0,07	0,28	27,5	0,55	1,46
Эквадор	1	0,53	-	-	0,53	0,53
Эстония	1	0,73	-	-	0,73	0,73
Япония	1	0,77	-	-	0,77	0,77
Всего	687	0,96 ± 0,02	0,44	45,1	0,10	2,11

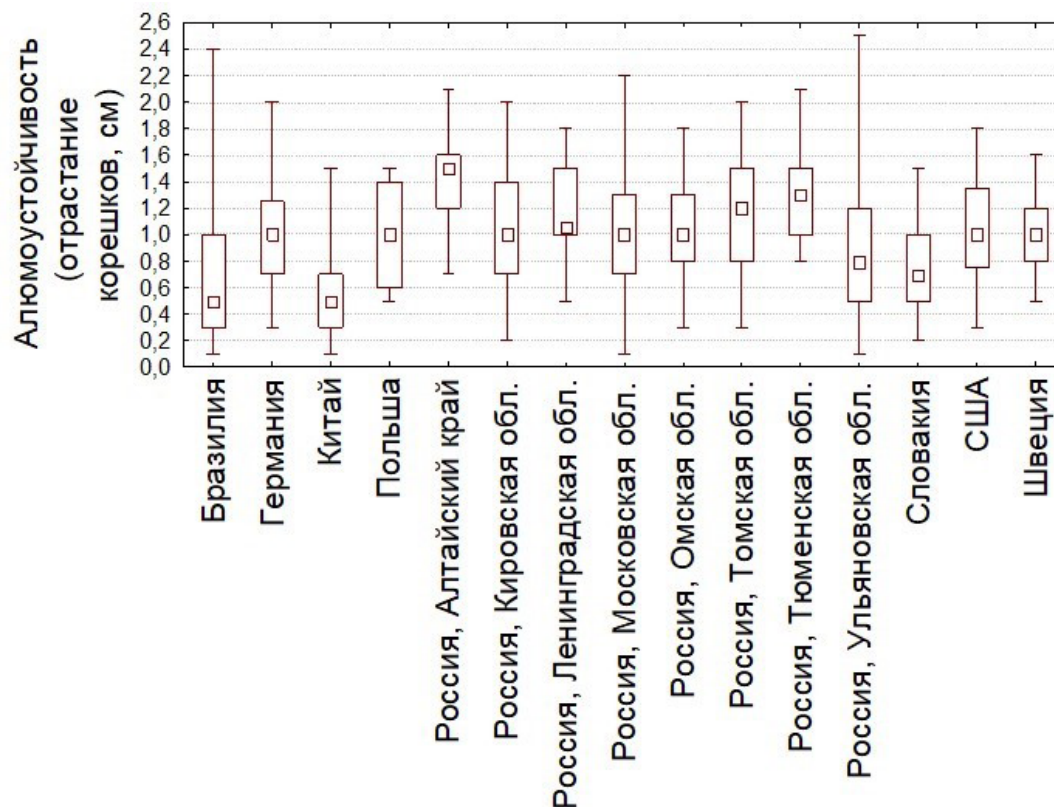


Рис. 2. Характеристика групп овса различного географического происхождения, представленных более чем 10 образцами (показаны медиана, квантили, минимальное, максимальное значения)

Fig. 2. Characteristics of the oat groups of different geographic origin represented by more than 10 accessions (showing medians, quartiles, minimum and maximum values)

га – с наименьшей устойчивостью (приростом корешков после шокового воздействия алюминия): Китай (0,57 см), Бразилия (0,70 см), Словакия (0,74 см) и наибольшей – Россия, Ленинградская обл. (1,12 см), Томская обл. (1,21 см), Тюменская обл. (1,34 см), Алтайский край (1,42 см).

Все выделенные образцы могут быть рекомендованы в качестве источников для селекции овса на алюмоустойчивость в регионах с кислыми почвами.

Заключение

Метод оценки алюмоустойчивости А. Aniol (1996) в модификации И. А. Косаревой и Е. В. Семеновой (Kosareva, Semenova, 2005) с использованием эриохромцианинового красителя имеет хорошую повторяемость, что позволяет проводить однократную оценку. В результате изучения 687 образцов овса выделены слабо-, средне- и высокоустойчивые к токсичному действию ионов Al^{3+} образцы. Большинство образцов имели среднюю устойчивость (отрастание корня от 0,76 до 1,5 см). Установлено, что наибольшей устойчивостью (приростом корешков после шокового воздействия алюминия) обладали образцы из России, а именно из Ленинградской (1,12 см), Томской (1,21 см), Тюменской (1,34 см) областей и Алтайского края (1,42 см). Выделено 5 источников алюмотолерантности для использования в селекции овса в регионах с кислыми почвами: образцы из России – ‘Козырь’ (к-14029, Московская обл.), У 70/14 (к-15572, Ульяновская обл.), из Австралии – ‘Tungoo’ (к-15750), Бразилия – к-15735, к-15740.

References / Литература

- Aniol A. Aluminium uptake by roots of rye seedlings of differing tolerance to aluminium toxicity. *Euphytica*. 1996;92:155-162. DOI: 10/1007/BF00022841
- Aniol A. Metody określania tolerancji zboż na toksyczne działanie jonów glinu. *Bulletin of Plant Breeding and Acclimatization Institute*. 1991;(143):7-11. [in Polish]
- Aniol A. The aluminum tolerance in wheat. In: V. Ruzgas, E. Lemežis, M. Apanavičienė, A. Basiulis, J. Bilis (eds). *Plant Breeding: Theories, Achievements and Problems. Proceedings of the international conference; Kėdainiai, Lithuania; 14–16 July 1997*. Kėdainiai: Dotnuva-Akademija; 1997. p.14-22.
- Aniol A., Gustafson J.P. Chromosome location of genes controlling aluminum tolerance in wheat, rye and triticale. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1984;26(6):701-705. DOI: 10.1139/g84-111
- Avdonin N.S. Scientific fundamentals of fertilizer application (Nauchnye osnovy primeneniya udobreniy). Moscow; 1972. [in Russian] (Авдонин Н.С. Научные основы применения удобрений. Москва; 1972).
- Gupta N., Gaurav S.S., Kumar A. Molecular basis of aluminium toxicity in plants: a review. *American Journal of Plant Sciences*. 2013;4(12):21-37. DOI: 10.4236/ajps.2013.412A3004
- Kosareva I.A. The study of crops and wild relatives collections for signs of resistance to toxic elements of acid soils. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;170:34-44. [in Russian] (Косарева И.А. Изучение коллекций сельскохозяйственных культур и диких родичей по признакам устойчивости к токсическим

- элементам кислых почв. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;170:34-44).
- Kosareva I.A., Blinova E.V., Loskutov I.G. Catalogue of the VIR global collection. Issue 934. Oats: Description of accessions according to their resistance to aluminum. St. Petersburg: VIR; 2021. [in Russian] (Косарева И.А., Блинова Е.В., Лоскутов И.Г. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 934. Овес: Характеристика образцов по устойчивости к алюмоотоксичности кислых почв. Санкт-Петербург: ВИР; 2021). DOI: 10.30901/978-5-907145-77-1
- Kosareva I.A., Davydova G.V., Semenova E.V. Diagnostics of the resistance of oat plants to increased content of aluminum ions in the soil solution (Diagnostika ustoychivosti rasteniy ovsa posevnogo k povyshennomu sodержaniyu ionov alyuminiya v pochvennom rastvore). *Agricultural Biology*. 1998;33(5):73-76. [in Russian] (Косарева И.А., Давыдова Г.В., Семенова Е.В. Диагностика устойчивости растений овса посевного к повышенному содержанию ионов алюминия в почвенном растворе. *Сельскохозяйственная биология*. 1998;33(5):73-76).
- Kosareva I.A., Davydova G.V., Semenova E.R. Guidelines for acid resistance assessment in cereal crops (Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu kislotoustoychivosti zernovykh kultur). St. Petersburg: VIR; 1995. [in Russian] (Методические указания по определению кислотоустойчивости зерновых культур. Санкт-Петербург: ВИР; 1995).
- Kosareva I.A., Loskutov I.G., Melnikova S.V. Aluminium tolerance in Russian breeding oat varieties. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2013;171:114-116. [in Russian] (Косарева И.А., Лоскутов И.Г., Мельникова С.В. Алюмоустойчивость сортов овса отечественной селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2013;171:114-116).
- Kosareva I.A., Semenova Ye.V. Laboratory screening in wheat species on alumotolerance. *Russian Agricultural Sciences*. 2005;(5):5-7. [in Russian] (Косарева И.А., Семенова Е.В. Лабораторный скрининг коллекции пшеницы на алюмотолерантность. *Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук*. 2005;(5):5-7).
- Loskutov I.G., Kosareva I.A., Melnikova S.V., Blinova E.V., Bagmet L.V. Genetic diversity in tolerance of wild *Avena* species to aluminium (Al). *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2017;64(5):955-965. DOI: 10.1007/s10722-016-0417-9
- 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).
- Nava I.C., Delatorre C.A., de Lima Duarte I.T., Pacheco M.T., Federizzi L.C. Inheritance of aluminum tolerance and its effects on grain yield and grain quality in oats (*Avena sativa* L.). *Euphytica*. 2006;148(3):353-358. DOI: 10.1007/s10681-005-9048-5
- Nettevich E.D. Spring wheat in the Non-Black-Earth Zone (Yarovaya pshenitsa v Nechernozemnoy zone). Moscow: Rosselkhozizdat; 1976. [in Russian] (Неттевич Э.Д. Яровая пшеница в Нечерноземной зоне. Москва: Россельхозиздат; 1976).
- Rodionova N.A., Soldatov V.N., Merezhko V.E., Yarosh N.P., Kobylansky V.D. Flora of cultivated plants. Vol. 2 (Pt 3). Oat (Kulturnaya flora. T. 2, ch. 3. Oves). Moscow: Kolos; 1994. [in Russian] (Родионова Н.А., Солдатов В.Н., Мережко В.Е., Ярош Н.П., Кобылянский В.Д. Культурная флора СССР. Т. 2, ч. 3. Овес. Москва: Колос; 1994).
- Schneider A.B., Nava I.C., Hervé C.B., Islamovic E., Limberger E., Jackson E.W. et al. Chromosome-anchored QTL conferring aluminum tolerance in hexaploid oat. *Molecular Breeding*. 2015;35(5):121. DOI: 10.1007/s11032-015-0315-4
- Silva S. Aluminium toxicity targets in plants. *Journal of Botany*. 2012;2012(11):219462. DOI: 10.1155/2012/219462
- Wright C.P., Kibite S., Tinker N.A., Molnar S.J. Identification of molecular markers for aluminium tolerance in diploid oat through comparative mapping and QTL analysis. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;112(2):222-231. DOI: 10.1007/s00122-005-0114-0
- Zhao X.Q., Shen R.F. Aluminum-nitrogen interactions in the soil-plant system. *Frontiers in Plant Science*. 2018;9:807. DOI: 10.3389/fpls.2018.00807

Информация об авторах

Игорь Градиславович Лоскутов, доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник, заведующий отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, i.loskutov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9250-7225>

Елена Владимировна Блинова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.blinova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-4926>

Любовь Юрьевна Новикова, доктор сельскохозяйственных наук, заведующая отделом, 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>

Information about the authors

Igor G. Loskutov, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, 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, Professor, St. Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya Emb., St. Petersburg 199034, Russia, i.loskutov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9250-7225>

Elena V. Blinova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.blinova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8898-4926>

Liubov Yu. Novikova, Dr. Sci. (Agriculture), Head of a Department, 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>

Вклад авторов: все результаты по алюмоустойчивости образцов овса были получены в лаборатории физиологии растений ВИР под руководством кандидата сельскохозяйственных наук Ирины Александровны Косаревой. Лоскутов И. Г., Блинова Е. В. и Новикова Л.Ю. проанализировали полученные результаты исследований, обобщили и написали текст данной статьи.

Contribution of the authors: all results on the aluminum tolerance of oat accessions were obtained at the Plant Physiology Laboratory of VIR under the supervision of its head Irina A. Kosareva, Cand. Sci. (Agriculture). Loskutov I. G., Blinova E. V. and Novikova L. Yu. analyzed the research results, summarized them and wrote the text of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 04.10.2023; одобрена после рецензирования 27.12.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 04.10.2023; approved after reviewing on 27.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.112.6:575.827.5
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-139-151



Аллельные различия ключевых генов биосинтеза беталаинов у контрастных по окраске корнеплода образцов свеклы столовой коллекции ВИР

А. С. Михайлова¹, Д. В. Соколова¹, Н. А. Швачко¹, В. С. Попов¹, Е. К. Хлесткина^{1,2}

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-технологический университет «Сирiuс», Центр генетики и наук о жизни, Краснодарский край, Россия

Автор, ответственный за переписку: Диана Викторовна Соколова, dianasokol@bk.ru

Актуальность. Свекла столовая (*Beta vulgaris* L.) – основной источник важнейшего натурального красителя бетанина. Ряд предприятий вынуждены импортировать зарубежные красители ввиду недостаточных запасов отечественного растительного сырья. В связи с этим особую актуальность приобретает создание сортов с повышенным содержанием беталаиновых пигментов.

Материалы и методы. Проведен скрининг аллельных различий ключевых генов биосинтеза беталаинов у контрастных по окраске корнеплода образцов свеклы столовой из коллекции ВИР по методу Сэнгера.

Результаты и обсуждение. Нами впервые была выявлена нонсенс-мутация в гене *CYP76AD1* у образца сорта 'Сердолик' с желтой окраской мякоти корнеплода, приводящая к усечению функционального домена P450, а также ряд миссенс-мутаций у образца 'Аваланч' в первом экзоне гена *BvDODA1*, вероятно, ассоциированных с проявлением неокрашенного фенотипа. В ходе анализа *in silico*, на основании последовательности аннотированного ранее в хромосоме 9 гена *CYP76AD5*, вблизи него идентифицированы еще две tandemно дублированные высокомолекулярные копии *CYP76AD5.1* и *CYP76AD5.3*, которые, по предварительной оценке, вместе с геном *CYP76AD6* являются наиболее подходящими генами-мишенями для нокаута.

Заключение. Используя сформированную ранее группу высокобетаниновых образцов свеклы столовой и выявленные нами закономерности, возможно выбрать наиболее подходящие образцы для дальнейшего редактирования. Кроме того, обнаруженные в настоящем исследовании аллельные различия ключевых генов биосинтеза беталаинов будут полезны при конструировании молекулярных маркеров для ускоренного отбора форм свеклы столовой с заданными свойствами.

Ключевые слова: *Beta vulgaris* L., гены семейства цитохром P450, *BvDODA1*, *BvMYB1*, бетацианины, бетаксантины, окраска мякоти корнеплода

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 21-66-00012 «Создание с использованием генетических технологий и изучение новых линий растений, адаптированных к меняющимся условиям окружающей среды, обладающих повышенной продуктивностью и диетической ценностью». Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Михайлова А.С., Соколова Д.В., Швачко Н.А., Попов В.С., Хлесткина Е.К. Аллельные различия ключевых генов биосинтеза беталаинов у контрастных по окраске корнеплода образцов свеклы столовой коллекции ВИР. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024;185(1):139-151. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-139-151

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-139-151

Allelic differences in the key genes of betalain biosynthesis in table beet accessions with contrasting root color from the VIR collection

Aleksandra S. Mikhailova¹, Diana V. Sokolova¹, Natalia A. Shvachko¹, Vitaliy S. Popov¹, Elena K. Khlestkina^{1,2}

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

² Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, Krasnodar Territory, Russia

Corresponding author: Diana V. Sokolova, dianasokol@bk.ru

Background. Table beet (*Beta vulgaris* L.) contains a great amount of naturally red-colored betanins. A number of enterprises are forced to import foreign dyes because the reserves of domestic plant raw materials are insufficient. With this in view, the development of cultivars with high betalain pigment content is now required.

Materials and methods. Allelic differences were screened in the key genes of the betalain biosynthesis pathway among table beet accessions with various root color from the VIR collection using the Sanger DNA sequencing method.

Results and discussion. For the first time we identified a nonsense mutation in the *CYP76AD1* gene in cv. 'Serdolik' with yellow flesh; it led to the truncation of the functional P450 domain. We suggested that the detected polymorphism correlated with phenotypic switching because the well-known role of *CYP76AD1* was essential for the red betalain accumulation. Moreover, a number of missense mutations in cv. 'Avalanche' in the first exon of the *BvDODA1* gene were found. These mutations were probably associated with the expression of the uncolored phenotype. An *in silico* analysis revealed highly homologous copies of *CYP76AD5*, located tandemly on chromosome 9. Attention should be paid to these copies, together with the *CYP76AD6* gene, as they seem the most preferable targets for a knockout to increase the red pigment content.

Conclusion. It is possible to identify the best table beet accessions for further genome editing among a previously selected high-betanin group. In addition, this study revealed the allelic differences in the key genes of the betalain biosynthesis pathway. These results will be useful for the development of DNA molecular markers to facilitate the selection of table beet forms with required properties.

Keywords: *Beta vulgaris* L., genes of the cytochrome P450 family, *BvDODA1*, *BvMYB1*, betacyanins, betaxanthins, root flesh color

Acknowledgments: this research was supported by the Russian Science Foundation under Project No. 21-66-00012 "The development with genetic technologies and the study of new plant lines adapted to changing environmental conditions, with increased productivity and dietary value".

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

For citation: Mikhailova A.S., Sokolova D.V., Shvachko N.A., Popov V.S., Khlestkina E.K. Allelic differences in the key genes of betalain biosynthesis in table beet accessions with contrasting root color from the VIR collection. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):139-151. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-139-151

Введение

Беталаины – природные пигменты растительного происхождения, которым в последние десятилетия уделяется пристальное внимание, что вызвано не только ориентацией рынка на использование натуральных пищевых красителей, но и широким спектром их биологической активности (Stintzing, Carle, 2007). Положительное влияние беталаинов на здоровье человека подтверждено результатами исследований: отмечены выраженные противовоспалительные, антиканцерогенные и антиоксидантные свойства (Tesoriere et al., 2004; Ninfali et al., 2017; Gopalan, Jadhav, 2021; Bastos, Schliemann, 2022).

Наряду с антоцианами, каротиноидами и хлорофиллом, беталаины составляют обширную группу растительных пигментов (Yudina et al., 2021). Большинство представителей порядка Гвоздичноцветные (Caryophyllales) содержат азотсодержащие производные индолина и дигидропиридина – красно-фиолетовые бетацианины и желто-оранжевые бетаксантины.

Как известно, тирозин является предшественником в биосинтезе беталаиновых пигментов (Strack et al., 2003; Khan et al., 2015). Гены *CYP76AD1*, *CYP76AD5*, *CYP76AD6* семейства цитохром P450 кодируют ферменты, осуществляющие гидроксилирование тирозина с образованием 3,4-дигидрокси-L-фенилаланина (L-ДОФА). Кроме того, продукт гена *CYP76AD1* вовлечен в циклизацию L-ДОФА до 5,6-дигидроксииндолин-2-карбоновой кислоты (цикло-ДОФА) у свеклы с красной окраской корнеплода.

BvDODA1 осуществляет превращение L-ДОФА в беталамовую кислоту – предшественник в биосинтезе бетаксантинов и бетацианинов (Brockington et al., 2015). Регуляторный ген семейства *R2R3-Myb* – *BvMYB1* – является позитивным регулятором биосинтеза беталаинов, активируя транскрипцию *CYP76AD1* и *BvDODA1* путем связывания непосредственно с их промоторной последовательностью (рис. 1) (Hatlestad et al., 2015).

Свекла столовая (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris* var. *conditiva* Alef.) признана рекордсменом по содержанию беталаинов. На основе имеющихся в коллекции ВИР образцов свеклы столовой, контрастных по признаку окраски мякоти, была сформирована репрезентативная выборка, в рамках которой проведен биохимический анализ по определению концентрации беталаинов в кожуре и мякоти в динамике в течение периода вегетации (Sokolova et al., 2022). Выявлено преобладание бетацианинов у красноокрашенных генотипов и бетаксантинов у желтоокрашенных, в то время как у образцов с белой окраской корнеплода пигменты не обнаружены. Скрининг аллельных различий ключевых генов биосинтеза беталаинов у образцов рассматриваемой выборки позволит выбрать гены, играющие ключевую роль в проявлении различий на уровне фенотипа. Дальнейшее маркирование этих генов для ускорения маркер-ориентированной селекции или использование их в качестве мишеней для редактирования позволит ускорить процесс выведения сортов и гибридов свеклы с заданным содержанием беталаинов для удовлетворения запросов пищевой промышленности.

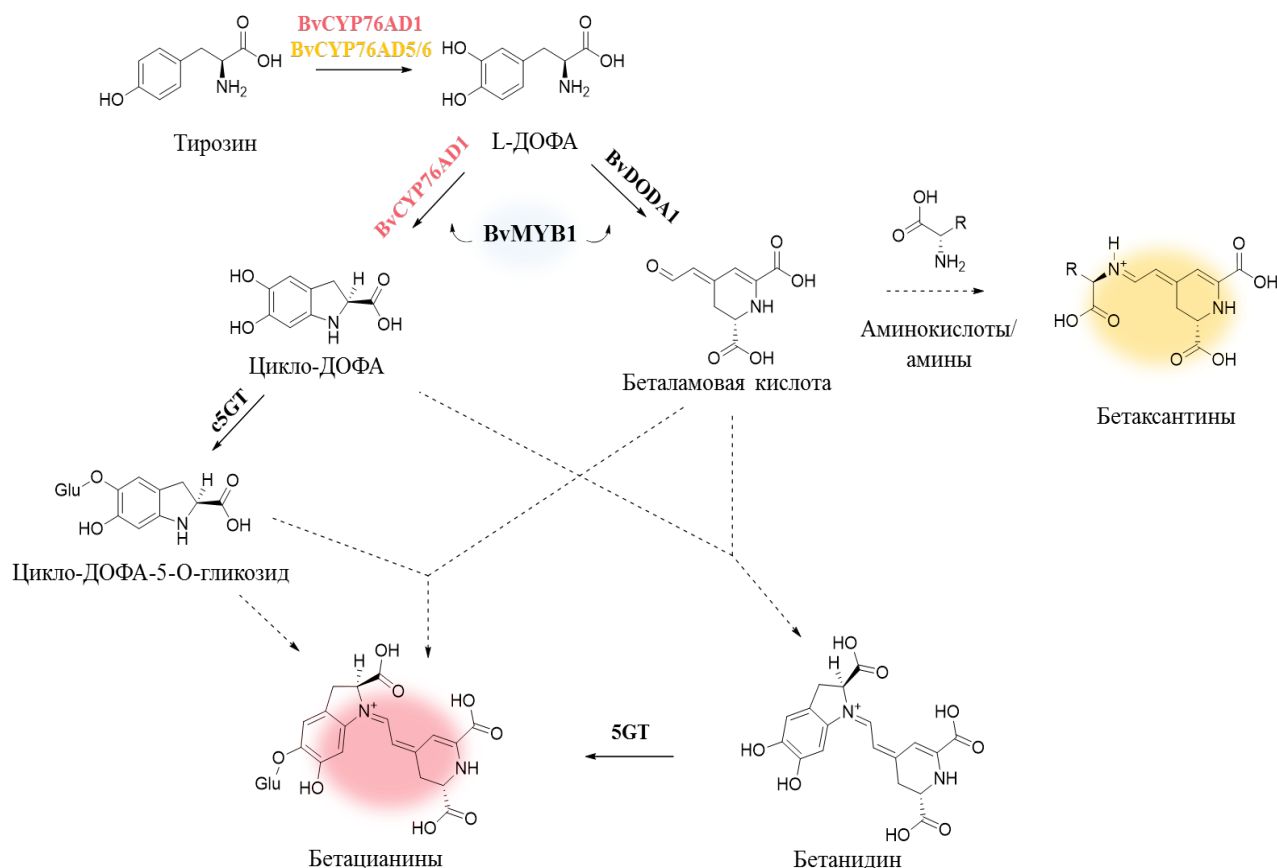


Рис. 1. Схема биосинтеза беталаиновых пигментов столовой свеклы, модифицированная версия (Hatlestad et al., 2015)

Fig. 1. Betalain biosynthesis scheme in table beet, modified version (Hatlestad et al., 2015)

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили четыре образца свеклы столовой с контрастной окраской корнеплодов из коллекции ВИР (табл. 1).

мощью инструмента OligoAnalyzer Tool, доступного на онлайн-платформе Integrated DNA Technologies (<https://eu.idtdna.com/pages/tools/oligoanalyzer?returnurl=%2Fcal%2Fanalyze>). Амплификацию геномной ДНК проводили в термоциклерах T-100 (Biorad) и SimpliAmp Plus

Таблица 1. Характеристика образцов свеклы столовой из коллекции ВИР
Table 1. Characteristics of table beet accessions from the VIR collection

Окраска корнеплода / Root color				
Название образца / Name of the accession	‘Бордо односемянная’	‘Кубанская Борщевая’	‘Сердолик’	‘Аваланч’
№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	к-3151	к-1967	к-4017	к-3881
Происхождение / Origin	Россия	Россия	Россия	Нидерланды
Содержание бетацианина, мг/100 г* / Betacyanin content, mg/100 g	807,9	213,5	11,1	Не выявлено
Содержание бетаксантина, мг/100 г* / Betaxanthin content, mg/100 g	188,6	51,7	31,6	Не выявлено
Генотип** / Genotype	R-Y-BL-	R-Y-blbl	rrY-blbl	R-yuBL-
Окраска кожицы корнеплода / Root skin color	Темно-бордовая	Красная	Желто- оранжевая	Белая
Окраска мякоти / Root flesh color	Темно-бордовая	Пятнисто- красная	Пятнисто-желтая	Белая
Окраска гипокотыля / Hypocotyl color	Темно-бордовая	Красная	Зелено-желтая	Красная

Примечание: * – на сырую массу; ** – указано аллельное состояние генов, при котором проявляется подобный фенотип
Note: * – fresh weight; ** – the allelic state of genes at which such phenotype as indicated appears

Из свежих листьев образцов свеклы столовой в рамках сформированной выборки выделена тотальная геномная ДНК с помощью набора DNeasy Plant Mini Kit (QIAGEN). Концентрацию и качество ДНК оценивали с помощью электрофоретического анализа в 1-процентном агарозном геле и спектрофотометрического определения соотношения оптических плотностей при 230, 260 и 280 нм (A260/280 и A260/230).

В геноме сахарной свеклы с помощью поиска по гомологии на основании ранее аннотированных генов в базе данных NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>) был осуществлен поиск ключевых генов биосинтеза беталаинов: *BvMYB1* (GenBank: JF432080), *CYP76AD1* (GenBank: HQ656023), *CYP76AD5* (GenBank: KM592961), *CYP76AD6* (GenBank: KT962274), *BvDODA1* (GenBank: HQ656027). Для выявленных в ходе анализа *in silico* ключевых генов сконструированы аллель-специфичные праймеры для ресеквенирования аллелей генов биосинтеза беталаинов у образцов, контрастных по признаку окраски корнеплода (Supplementary Materials, Suppl. 1)¹.

Аллель-специфичные праймеры были сконструированы с учетом выравнивания целевых нуклеотидных последовательностей на геном и проанализированы с по-

(Thermo Fisher). ПЦР-смесь общим объемом 20 мкл содержала: 70 нг ДНК-матрицы, по 1 нг каждого из праймеров, 5U Taq ДНК-полимеразу и 1x реакционный буфер (67 mM TrisHCl, pH 8.8, 10 mM dNTPs, 15 mM MgCl₂, 0.01% Твин-20). Амплифицированные ПЦР-фрагменты элюированы с помощью набора *diaGene* для элюции фирмы «ДИА-М» согласно инструкции производителя. Очищенную ДНК-матрицу в количестве 30–50 нг использовали для секвенирующей реакции, которая протекала в 10 мкл смеси по протоколу, соответствующему рекомендации производителя (BigDye™ Terminator v3.1 5X Sequencing Buffer, Thermo FS).

Ресеквенирование участков (промоторные последовательности и аллели 1-го экзона) ключевых генов биосинтеза беталаинов у образцов свеклы, контрастных по содержанию беталаинов, проведено с помощью генетического анализатора ABI 3500 (Thermo Fisher Scientific, Япония) по методу Сэнгера. Обработка полученных секвенограмм, в том числе оценка качества данных и выравнивание на референсный геном, осуществлялась с использованием программного обеспечения Unipro UGENE (<http://ugene.net/ru/>) и MEGA-X (<https://www.megasoftware.net/>). В качестве референсного генома выступала последовательность сахарной свеклы *B. vulgaris* subsp. *vulgaris*, доступная в базе данных Phytozome 13 (Phytozome genome ID: 548; https://phytozome-next.jgi.doe.gov/info/Bvulgaris_EL10_1_0).

¹ Приложение 1 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 1. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

Для множественного выравнивания как нуклеотидных, так и аминокислотных последовательностей применяли алгоритм MUSCLE, доступный в базе данных UniProt (<https://www.uniprot.org/align>), а также программу MultAlin (<http://multalin.toulouse.inra.fr/multalin/>). Полученные файлы формата clustal_num визуализировали в SnapGene Viewer 6.0.7 (<https://www.snapgene.com/>). Аннотацию консервативных доменов проводили в базах Pfam (<http://pfam.xfam.org/>) и GenomeNet (<https://www.genome.jp/tools/motif/>). Процент идентичности нуклеотидных аминокислотных последовательностей рассчитан с помощью сервера UVA FASTA (lalign) (https://fasta.bioch.virginia.edu/fasta_www2/fasta_www.cgi?rm=lalign&pgm=lal). Открытую рамку считывания предсказывали с помощью сервиса NCBI Open Reading Frame Finder (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/orffinder/>). Предсказание третичной структуры белка осуществляли с помощью сервера SWISS-MODEL (<https://swissmodel.expasy.org/interactive>) (Waterhouse et al., 2018). В качестве шаблона был использован белок 6KKS, размещенный в репозитории базы SWISS-MODEL Template Library (SMTL ID: 6KKS) (<https://swissmodel.expasy.org/templates/6kks.1>). Последовательность шаблона 6KKS соответствует фактору транскрипции WER (WEREWOLF) у *Arabidopsis thaliana*, который относится к семейству R2R3-MYB и кодируется геном *AtMYB66* (семейство R2R3-MYB; GenBank: AT5G14750), специфически взаимодействующим с большой бороздкой ДНК (Wang et al., 2019).

Результаты

В геноме сахарной свеклы *B. vulgaris* subsp. *vulgaris* (2n = 18) с помощью поиска по гомологии на основании ранее аннотированной последовательности гена *CYP76AD5*, размещенной в базе данных NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>), с помощью алгоритма BLASTN найдены высокогомологичные копии (E-value = 0), расположенные tandemно в хромосоме 9 (Phytozome: EL10Ac9g22160, EL10Ac9g22161, EL10Ac9g22162). В рамках данной работы для удобства обсуждения мы обозначаем эти гены по порядку их расположения в хромосоме: *CYP76AD5.1* (EL10Ac9g22160), *CYP76AD5.2* (EL10Ac9g22161) и *CYP76AD5.3* (EL10Ac9g22162). Расстояние от *CYP76AD5.2* до *CYP76AD5.1* и *CYP76AD5.3* составляет 8319 пн и 10 956 пн соответственно. Важно отметить, что в качестве исходных данных для поиска высокогомологичных копий послужила последовательность гена *CYP76AD5.2*, аннотированная в NCBI под номером KM592961. В той же хромосоме обнаружен ген *CYP76AD6* (Phytozome: EL10Ac9g22144) на расстоянии около 196 тысяч пар нуклеотидов (тпн) от кластера генов *CYP76AD5.1-5.3*. Остальные гены: *CYP76AD1* (GenBank: HQ656023; Phytozome: EL10Ac2g04268), *BvDODA1* (GenBank: HQ656027; Phytozome: EL10Ac2g04269) и *BvMYB1* (GenBank: JF432080; Phytozome: EL10Ac2g04153) – локализованы в хромосоме 2. Расстояние между генами *CYP76AD1* и *BvDODA1* составляет около 44 тпн; левее на хромосоме, на удалении около 1500 тпн от *CYP76AD1*, располагается ген *BvMYB1*.

Различия по сравнению с референсной последовательностью в промоторной области и первом экзоне выявлены у всех исследуемых образцов в случае структурных генов, однако отличие кодирующей последовательности регуляторного гена *BvMYB1* обнаружено только у образца с неоднородной светлоокрашенной мякотью 'Кубанская Борщевая' (к-1967, Россия) (Supplementary

Materials, Suppl. 2)². В ходе ресеквенирования в промоторной и кодирующей последовательностях гена *CYP76AD1* у исследуемых образцов обнаружены отличия от референсной последовательности (Supplementary Materials, Suppl. 3)³. Однонуклеотидные замены у образцов к-3151, к-1967 и к-3881, выявленные в области первого экзона, являются синонимичными, тогда как вставка цитозина в положении 240 пн от сайта начала транскрипции у образца к-4017 с желто-пятнистой окраской мякоти корнеплода приводит к сдвигу рамки считывания и образованию стоп-кодона UAA. Как следствие, кодируемый функциональный домен семейства цитохром P450 (Pfam: PF00067) усечен, что, вероятнее всего, приводит к утрате функции гена *CYP76AD1* у образца свеклы столовой с желто-пятнистой окраской мякоти и зеленым гипокотилем (рис. 2).

В ходе анализа *in silico* в геноме сахарной свеклы на основании аннотированного ранее гена *CYP76AD5* было идентифицировано три гомологичные последовательности в базе данных Phytozome. Идентичность нуклеотидных последовательностей генов *CYP76AD5.1* (EL10Ac9g22160) и *CYP76AD5.2* (EL10Ac9g22161) составляет 96,7%, аминокислотных последовательностей белковых продуктов этих генов – 99,0%, тогда как нуклеотидная последовательность третьей копии *CYP76AD5.3* (EL10Ac9g22162) в среднем в сравнении с предыдущими составила 75,4%. Учитывая высокую степень гомологии данных последовательностей, к каждой копии были сконструированы аллель-специфичные праймеры с дальнейшим ресеквенированием соответствующих аллелей у образцов исследуемой выборки.

По результатам ресеквенирования промоторная область гена *CYP76AD5.1* отличается более выраженным полиморфизмом в сравнении с кодирующей (Supplementary Materials, Suppl. 4)⁴. Интересно отметить, что паттерн распределения инделей в промоторной области в большей степени схож между последовательностями образцов с белой и пятнисто-желтой окраской мякоти корнеплода и между последовательностями образцов с пятнисто-красной и темно-бордовой окраской. У продуктов гена *CYP76AD5.1* образцов к-1967, к-3881 и к-4017 обнаружена аминокислотная замена остатка треонина в положении 27 на аланин (Thr27Ala); в положении 272 – вставка треонина в сравнении с референсной последовательностью (рис. 3).

Аллели гена *CYP76AD5.2* у контрастных по окраске форм отличаются от референсной последовательности, однако идентичны между собой (Supplementary Materials, Suppl. 5)⁵. Обнаруженные нуклеотидные замены в обла-

² Приложение 2 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 2. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

³ Приложение 3 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 3. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

⁴ Приложение 4 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 4. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

⁵ Приложение 5 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 5. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

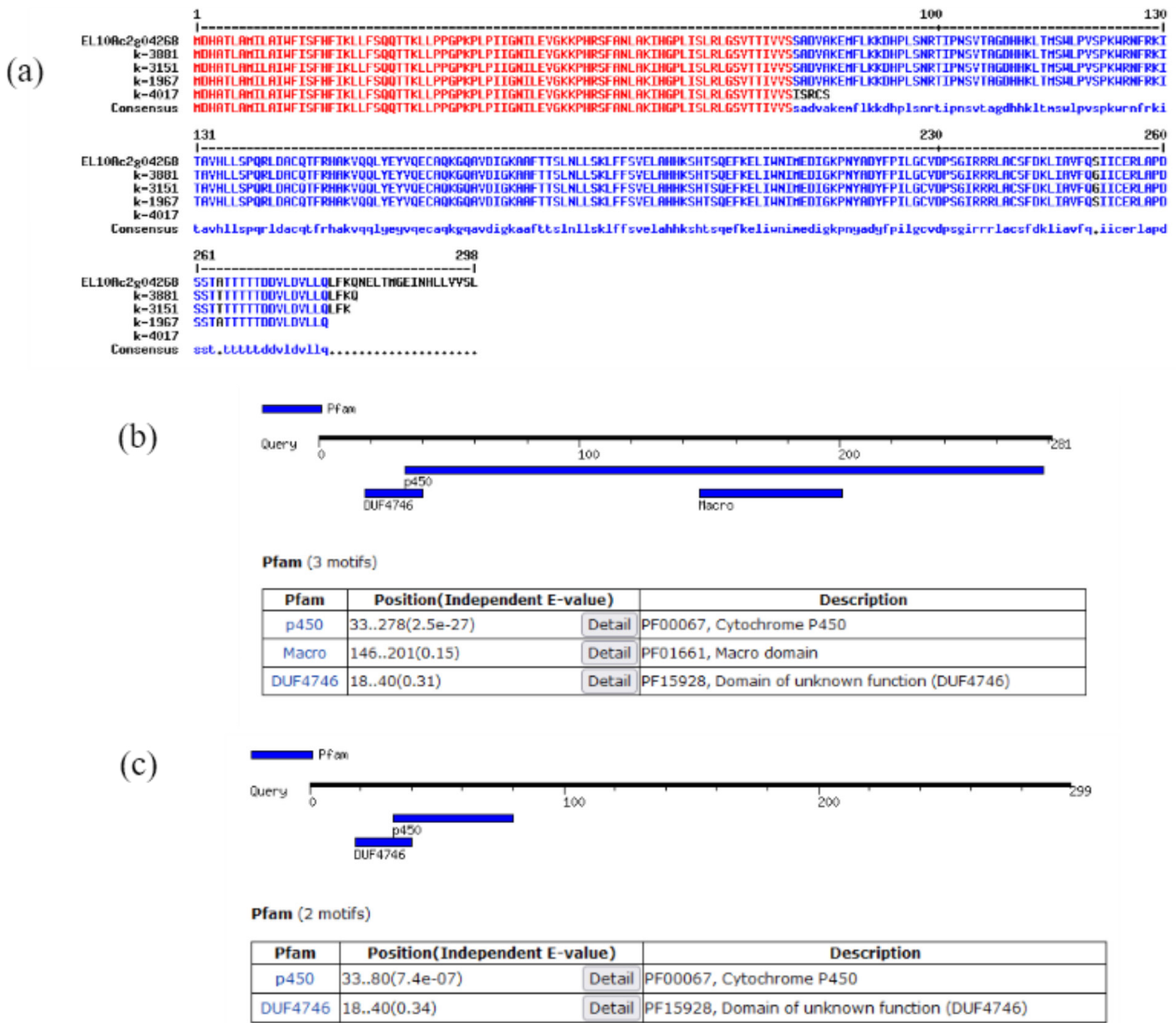


Рис. 2. Анализ аминокислотной последовательности, кодируемой первым экзоном гена *CYP76AD1*: (a) множественное выравнивание аминокислотных последовательностей, кодируемых первым экзоном гена *CYP76AD1*, выполненное с помощью программы MultAlin; (b, c) функциональный домен семейства цитохром P450 (Pfam: PF00067), кодируемый первым экзоном гена *CYP76AD1* у (b) образцов к-3881, к-3151, к-1967 и (c) образца к-4017 с пятнисто-желтой окраской мякоти корнеплода

Fig. 2. Analysis of the amino acid sequence encoded by the first exon of *CYP76AD1*: (a) multiple alignment of the translated amino acid sequences of *CYP76AD1* performed with the MultAlin software; (b, c) the functional domain of the cytochrome P450 family (Pfam: PF00067) encoded by the first exon of the *CYP76AD1* gene in accessions (b) k-3881, k-3151, k-1967, and (c) k-4017 with spotted yellow color of the root flesh

сти первого экзона *CYP76AD5.2* являются синонимичными, за исключением трехнуклеотидной вставки САА, приводящей к появлению треонина в положении 272, аналогично *CYP76AD5.1* (рис. 3). Выявленные замены, вероятно, не влияют на функциональность белков *CYP76AD5.1* и *CYP76AD5.2*, поскольку размер и положение консервативного домена семейства P450, кодируемого в первом экзоне соответствующими генами, постоянны у всех образцов.

Однонуклеотидные замены в последовательности первого экзона гена *CYP76AD5.3* синонимичные, за исключением замен, приводящих к изменению в продукте гена аминокислотных остатков в положениях 243 и 261: полярного остатка треонина на неполярный аланин

(Thr243Ala) и полярного, положительно заряженного остатка аргинина на неполярный лейцин (Arg261Leu) в области домена семейства P450 (см. рис. 3 и Supplementary Materials, Suppl. 6)⁶. Изменение полярности аминокислотных остатков может нарушать исходную третичную укладку белка, что в свою очередь влияет на активность фермента.

С помощью программы NCBI Open Reading Frame Finder, предсказывающей расположение открытой рамки счи-

⁶ Приложение 6 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 6. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

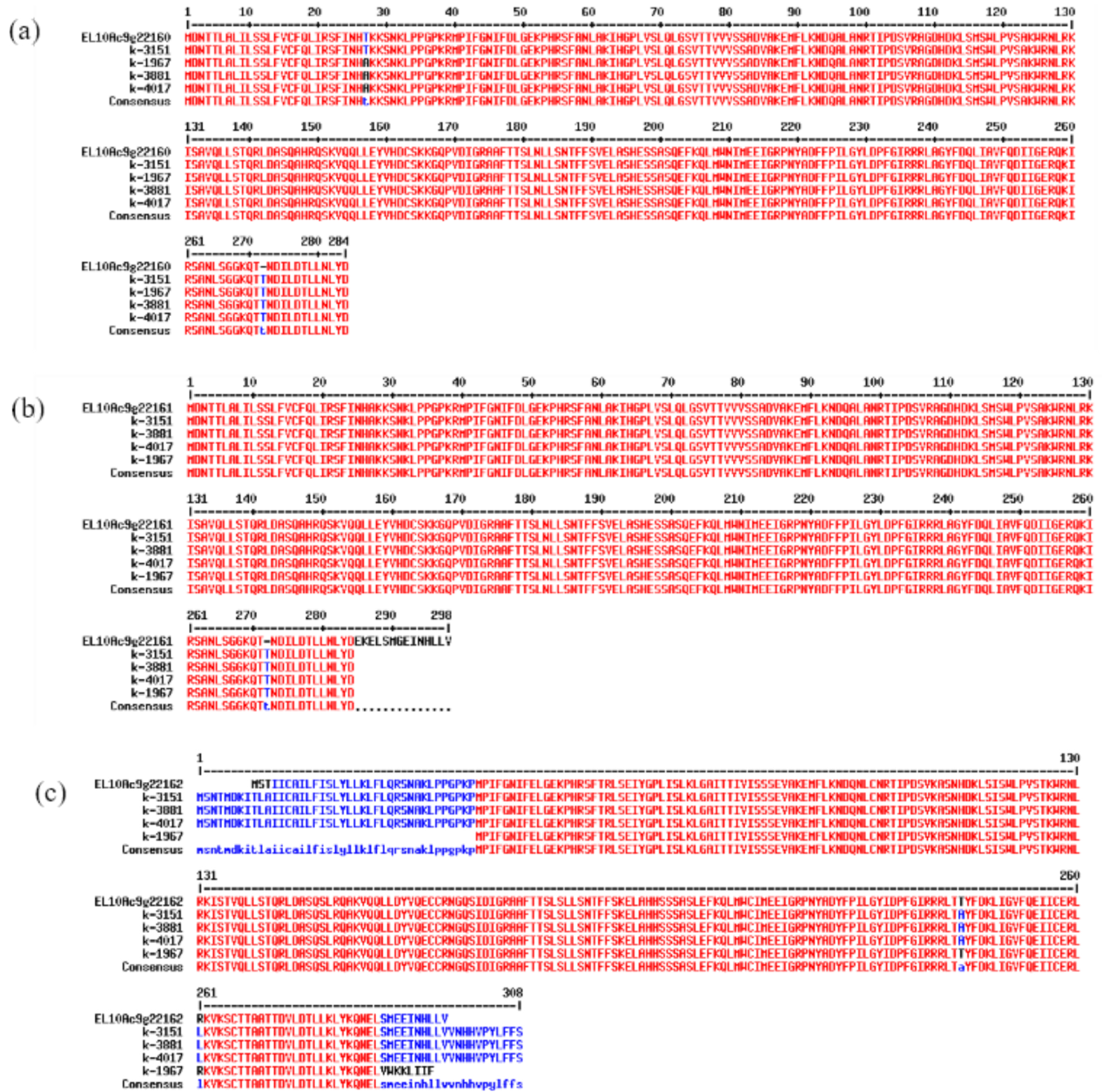


Рис. 3. Множественное выравнивание аминокислотных последовательностей, кодируемых первым экзоном генов: (a) *CYP76AD5.1* (EL10Ac9g22160), (b) *CYP76AD5.2* (EL10Ac9g22161), (c) *CYP76AD5.3* (EL10Ac9g22162), выполненное с помощью программы MultAlin

Fig. 3. Multiple alignment of the translated amino acid sequences encoded by the first exon of: (a) *CYP76AD5.1* (EL10Ac9g22160), (b) *CYP76AD5.2* (EL10Ac9g22161), and (c) *CYP76AD5.3* (EL10Ac9g22162), performed using the MultAlin software

тивания на ресеквенированных последовательностях, удалось идентифицировать сайт начала транскрипции и определить длину аминокислотной последовательности CYP76AD5.3, которая у образца к-1967 с пятнисто-красной окраской мякоти корнеплода составила 254 аминокислотных остатка в сравнении с 308 у остальных. Согласно проведенному анализу в базе данных Pfam, консервативный домен семейства P450 (Pfam: PF00067) аннотируется в транслированной аминокислотной последовательности CYP76AD5.3 этого образца. Однако однозначные выводы о влиянии смещения рамки считывания на функциональность гена CYP76AD5.3 у образца к-1967, с учетом имеющихся данных, сделать невозможно.

При ресеквенировании аллелей гена CYP76AD6 у образцов свеклы столовой выявлены синонимичные и несинонимичные замены. У всех исследуемых образцов у продукта гена в положениях 150 и 161 остатки треонина и аспарагиновой кислоты меняются на аланин и валин соответственно (Supplementary Materials, Suppl. 7)⁷. Кроме того, у образцов к-3151, к-3881 и к-4017 наблюдается замена лизина на глутаминовую кислоту (Lys164Glu). Тем не менее размер и положение консервативного домена семейства цитохром P450 (Pfam: PF00067), согласно аннотации в базе данных Pfam, совпадают у белковых продуктов этого гена среди всех исследуемых образцов. В рамках рассмотрения мутаций, выявленных в промоторной области и первом экзоне, не обнаружено их негативного влияния на функцию CYP76AD6.

У образца к-3881 с белой окраской мякоти корнеплода в положении 205 пн от сайта начала транскрипции ATG детектирована делеция аденина, являющаяся причиной сдвига рамки считывания и появлению ряда несинонимичных замен в конце первого экзона (Supplementary Materials, Suppl. 8)⁸. У образцов к-4017, к-3881 и к-3151 в первом экзоне гена *BvDODA1* обнаружена несинонимичная замена цитозина на аденин, приводящая к замене у его продукта остатка треонина на аспарагин (Thr10Asn). Благодаря анализу аминокислотной последовательности, кодируемой первым экзоном гена *BvDODA1*, у образца с белой окраской мякоти, в базе данных Pfam было определено, что функциональный домен LigB (Pfam: PF02900), кодирующий каталитическую субъединицу В диоксигеназы, усечен с 66 до 52 аминокислотных остатков в сравнении с другими образцами (рис. 4).

В промоторной области гена *BvDODA1*, включающей 945 пн до сайта старта транскрипции, идентифицированы единичные однонуклеотидные замены, не выделяющие генотип образца с белой окраской мякоти корнеплода от остальных. Поскольку транскрипционный фактор *BvMYB1* связывается непосредственно с промоторным районом гена *BvDODA1*, отсутствие «уникальных» инделей в этой области может указывать на наличие сайта узнавания транскрипционного фактора. Вместе с этим данные о последовательностях двух других экзонов отсутствуют, и лишь косвенно можно заключить о вероятной утрате функциональности гена *BvDODA1* вследствие мутаций в первом экзоне, приводящих к отсутствию пептидов в мякоти корнеплода.

⁷ Приложение 7 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 7. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

⁸ Приложение 8 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 8. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

Регуляторный ген семейства *R2R3-Myb*, *BvMYB1* является позитивным регулятором биосинтеза беталаинов, активируя транскрипцию *CYP76AD1* и *BvDODA1* посредством связывания непосредственно с их промоторной последовательностью (Hatlestad et al., 2015).

Нуклеотидные последовательности ресеквенированных аллелей гена *BvMYB1* у образцов исследуемой выборки не отличаются от референсной, за исключением образца с пятнисто-красной окраской мякоти, где обнаружено несколько несинонимичных замен (Supplementary Materials, Suppl. 9)⁹. Среди них идентифицированы замены, приводящие к заменам в белке: лизина на глутаминовую кислоту (Lys25Glu), тирозина на лейцин (Tyr95Leu), треонина на изолейцин (Thr96Ile), валина на лейцин (Val102Leu), изолейцина на тирозин (Ile103Tyr), триптофана на аргинин (Trp104Arg), а также вставки из аминокислотных остатков: тирозина (Tyr-97), аланина (Ala-98), изолейцина (Ile-99), аргинина (Arg-100), лейцина (Leu-101) (рис. 5).

Повторы R2 и R3 специфического ДНК-связывающего домена R2R3-Myb имеют очень сходную структуру с мотивом «спираль – поворот – спираль», включая три «α-спирали» и два «поворота» между ними, хотя идентичность их последовательностей в tandemных повторах составляет всего 31%, при этом третьи спирали в обоих повторах напрямую распознают специфическую последовательность оснований – РуAACG/TG (Oda et al., 1997). Мотивы «спираль 1» и «спираль 2» домена R2 необходимы для специфического связывания с последовательностью ДНК, в то время как третья спираль важна для его распознавания (Saikumar et al., 1990).

Для моделирования 3D-структуры белков использовали шаблон 6kks, размещенный в репозитории SWISS-MODEL (SMTL ID: 6kks). Выявленные аминокислотные замены меняют пространственную организацию белка у образца к-1967 в области фрагмента «поворот» между первой и второй «спиралями» в консервативном мотиве домена R3, что, вероятно, может повлиять на эффективность распознавания и связывания с целевой последовательностью ДНК (см. рис. 5).

BvMYB1 исключается из списка потенциальных генов-мишеней для нокаута с целью увеличения накопления бетацианинов, поскольку кодируемый им транскрипционный фактор усиливает транскрипцию генов *CYP76AD1* и *BvDODA1*, связываясь с промоторным районом этих структурных генов. Участие генов *CYP76AD1* и *BvDODA1* в процессе биосинтеза пигментов красного оттенка также необходимо, поскольку они кодируют ферменты, осуществляющие превращение ДОФА в цикло-ДОФА и беталамовую кислоту – предшественников красных бетацианинов (Hatlestad et al., 2012; Brockington et al., 2015). В связи с этим в качестве генов-мишеней для нокаута могут рассматриваться *CYP76AD5.1*, *CYP76AD5.2*, *CYP76AD5.3* и *CYP76AD6*.

Обсуждение

Пионерские работы по выявлению в геноме сахарной свеклы локусов, ассоциированных с признаком окраски корнеплода, листьев и гипокотыля, датируются первой половиной прошлого века. Путем генетического анализа выделены два локуса R (red) и Y (yellow) (Kajanus, 1917;

⁹ Приложение 9 представлено в онлайн-формате. Электронная версия статьи: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151> / Electronic Supplementary Materials, Suppl. 9. The online version of this article: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2024-1-139-151>.

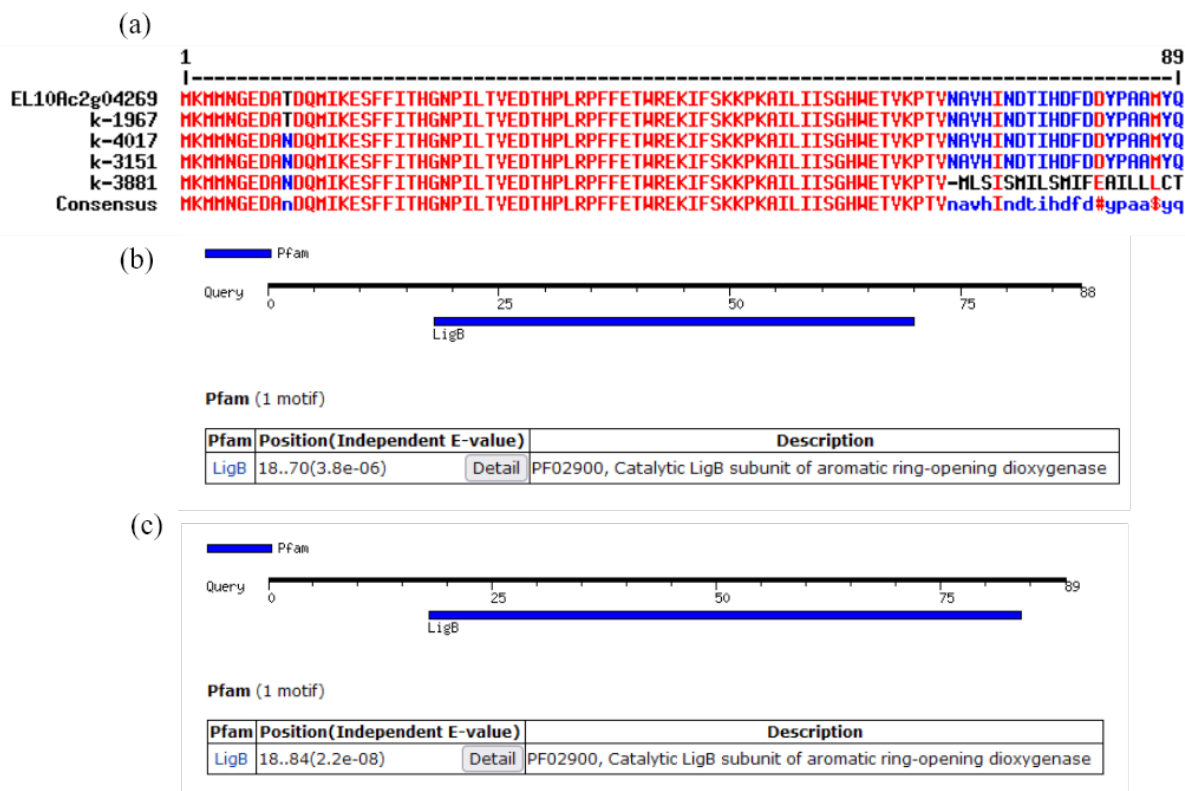


Рис. 4. Анализ аминокислотной последовательности, кодируемой первым экзоном гена *BvDODA1*:

(a) – множественное выравнивание транслированных аминокислотных последовательностей, кодируемых первым экзоном гена *BvDODA1*, выполненное с помощью программы MultAlin; (b, c) – функциональный домен LigB (Pfam: PF02900) у (b) образца к-3881 с белой окраской мякоти корнеплода; (c) образцов к-4017, к-3151, к-1967

Fig. 4. Analysis of the amino acid sequence encoded by the first exon of the *BvDODA1* gene:

(a) multiple alignment of the translated amino acid sequences performed using the MultAlin software; (b) the functional domain of the LigB family (Pfam: PF02900) encoded by the first exon of the *BvDODA1* gene in accession k-3881 with white color of the root flesh; (c) in accessions k-4017, k-3151, and k-1967

Keller, 1936). Позднее было показано, что гены в двух сцепленных локусах *R* и *Y* ответственны за накопление беталаинов у свеклы столовой и определяют признак окраски корнеплода (красный, желтый или белый). В этих локусах выявлены и картированы гены *CYP76AD1* и *BvMYB1* соответственно (Hatlestad et al., 2012; Hatlestad et al., 2015). Наличие или отсутствие пигментации мякоти корнеплода (красная или белая окраска) определяется аллельным состоянием генов в *Y*-локусе. Фенотип свеклы столовой с красной окраской мякоти проявляется в присутствии доминантных аллелей генов как в локусе *R*, так и в локусе *Y*. В случае желтой окраски имеются идентичные рецессивные аллели *r* в соответствующих хромосомных локусах, тогда как генотип свеклы с белой окраской мякоти соответствует *R*-уу или *rr*уу в сочетании с красной окраской гипокотилеа либо желто-зеленой соответственно. Выявлен ген «пятнистости» *bl*, различные аллельные состояния которого ассоциируются с равномерностью распределения пигмента в корнеплоде – рецессивные гомозиготные по этому гену формы имеют характерные кольца белого цвета вследствие нарушения процесса биосинтеза беталаинов (Watson, Goldman 1997; Goldman, Austin 2000). В рамках исследуемой выборки данный фенотип наблюдается у образцов 'Сердолик' и 'Кубанская Борщевая' (см. табл. 1).

Ряд исследователей выделяют именно *CYP76AD1* как основной ген-кандидат, ответственный за формирование признака красной окраски корнеплода (Hatlestad

et al., 2012; Polturak et al., 2015; Sunnadeniya et al., 2016). Присутствие *CYP76AD1* приводило к окрашиванию цветков табака в красный цвет, тогда как вследствие накопления транскриптов только одного *CYP76AD6* фенотип характеризовался желтой окраской. Совместное влияние продуктов данных генов проявлялось в окрашивании цветков табака в желто-красный цвет (Polturak et al., 2017). В дополнение к этому при коэкспрессии *CYP76AD6* и *BvDODA1* в клетках дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* культуральная среда окрашивалась в желтый цвет, *CYP76AD1*, *CYP76AD6* и *BvDODA1* – в красный, а *CYP76AD1* и *BvDODA1* – в более темный, красно-фиолетовый (Sunnadeniya et al., 2016).

У образца с желтой окраской мякоти корнеплода к-4017 была детектирована нонсенс-мутация в гене *CYP76AD1*. Учитывая результаты проведенных ранее исследований, мы предполагаем, что проявление подобного фенотипа связано сутратой функции *CYP76AD1* и участием только двух белковых продуктов генов *CYP76AD6* и *BvDODA1* в процессе биосинтеза беталаиновых пигментов. Таким образом, в генотипе образцов к-3151, к-1967 и к-3881 присутствует доминантная аллель *R*, в то время как у образца к-4017 наблюдается гомозиготное рецессивное состояние *rr* (см. табл. 1).

У образца свеклы столовой с белой окраской мякоти корнеплода и красным гипокотилем, с учетом рассмотренных промоторных последовательностей и области первого экзона, мутаций, влияющих на подавление функции

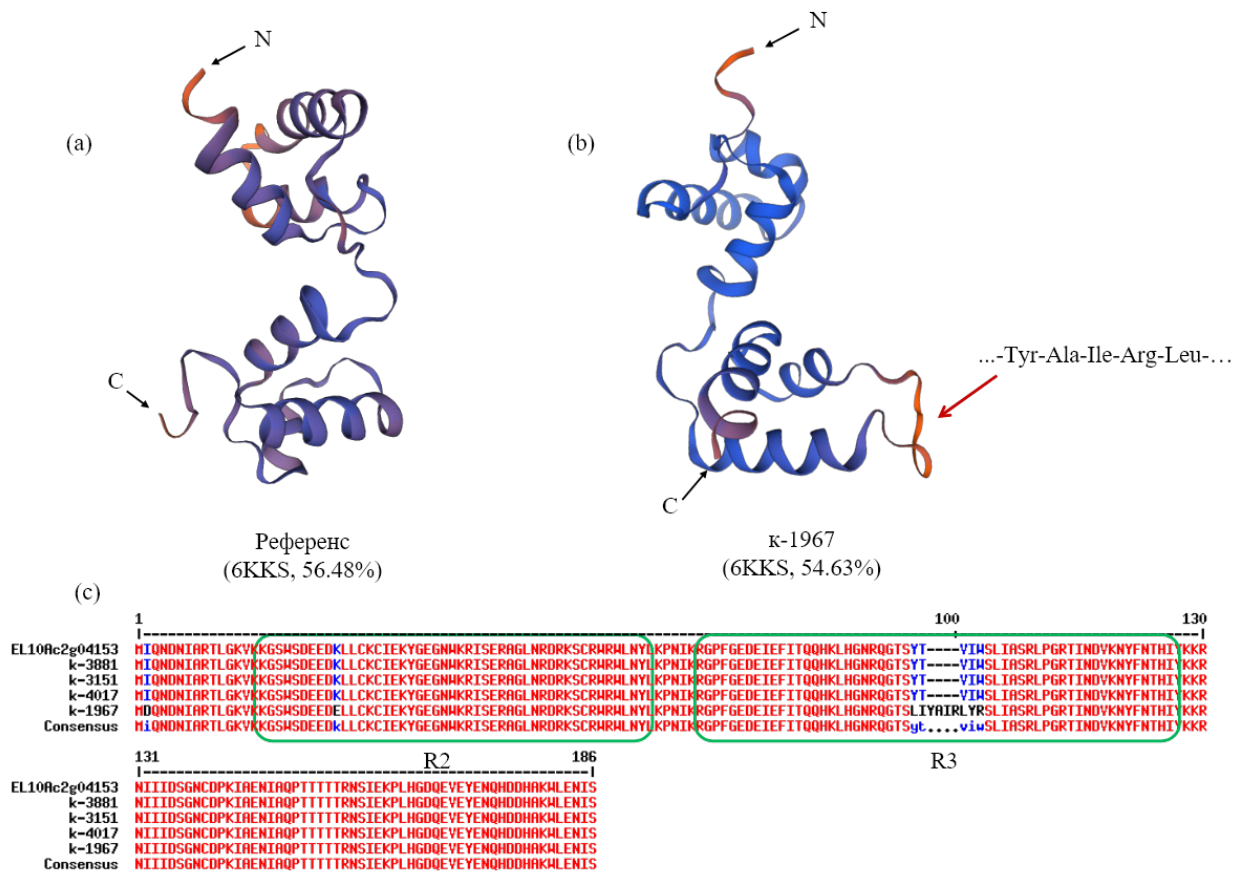


Рис. 5. Белки семейства R2R3-MYB: (а, б) предсказанные 3D-структуры структуры белков семейства R2R3-MYB, соответствующие (а) референсу и (б) образцу к-1967 с красно-пятнистой окраской мякоти корнеплода (в скобках указан процент идентичности аминокислотных последовательностей между модельным белком шаблона 6KKS и исследуемым); (с) множественное выравнивание транслированных аминокислотных последовательностей *BvMYB1* (Phytozome: EL10Ac2g04153), выполненное с помощью программы MultAlin. Рамкой зеленого цвета выделены консервативные функциональные домены R2 и R3

Fig. 5. Proteins of the R2R3-MYB family: (a, b) predicted 3D structures of the R2R3-MYB family proteins corresponding to (a) the reference and (b) accession k-1967 with spotted red color of the root flesh (parenthesized is the identity percentage between the model 6KKS and the studied sequences); (c) multiple alignment of the translated amino acid sequences of *BvMYB1* (Phytozome: EL10Ac2g04153) performed using the MultAlin software. The green frame highlights the conservative functional R2 and R3 domains

генов семейства цитохром P450 *CYP76AD1* и *CYP76AD6*, не выявлено. Однако в последовательности первого экзона гена *BvDODA1* обнаружен ряд миссенс-мутаций, вследствие которых кодируемый функциональный домен LigB укорачивается. Ранее сообщалось, что при коэкспрессии генов свеклы *CYP76AD1* и *CYP76AD6*, последовательности которых были ресеквенированы и клонированы в вектор для сверхэкспрессии под контроль индуцируемых галактозой промоторов с дальнейшей его трансформацией в клетки *Saccharomyces cerevisiae*, без вовлечения гена диоксигеназы *BvDODA1*, культуральная среда с клетками дрожжей оставалась бесцветной (Polturak et al., 2015). В связи с этим мы предполагаем, что неокрашенный фенотип у к-3881 наблюдается вследствие нарушения функции *BvDODA1*.

Интерес представляют и другие гены семейства цитохром P450, поскольку путем вариации активности генов α-клады (*CYP76AD1*) и β-клады (*CYP76AD5*, *CYP76AD6*) возможно контролировать проявление желтого или красного оттенка растительных тканей (Polturak et al.,

2017). Деление генов семейства цитохром P450 на α- и β-кладу сопряжено с расхождением функций генов в процессе биосинтеза беталаиновых пигментов: продукты генов α-клады участвуют в двух последовательных превращениях тирозина до цикло-ДОФА, тогда как β-клады – только в гидроксировании тирозина (Sunnadeniya et al., 2016).

При одновременной экспрессии *CYP76AD5*, а именно *CYP76AD5.2* и *BvDODA1*, ткани проростков арабидопсиса окрашивались в желтый цвет благодаря накоплению бетаксантинов, тогда как красных бетацианинов обнаружено не было (Sunnadeniya et al., 2016). Таким образом, *CYP76AD5.2*, а также найденные гомологичные копии *CYP76AD5.1* и *CYP76AD5.3* стоит рассматривать как гены-мишени для редактирования с целью уменьшения накопления бетаксантинов.

Благодаря широкому генетическому разнообразию образцов свеклы столовой, представленных в коллекции ВИР, имеется уникальная возможность вести отбор наиболее перспективных для селекции форм. К настоящему

моменту сформирован набор образцов свеклы столовой с повышенным содержанием бетанина, которая представляет наибольший интерес в качестве объекта для геномного редактирования (Sokolova, Solovieva, 2019; Sokolova, 2022). Согласно проведенному ранее биохимическому анализу, в корнеплоде свеклы столовой, несмотря на преобладающее содержание красных бетацианинов, присутствуют и бетаксантины (Sokolova et al., 2022). К примеру, рассматриваемый в данной работе образец сорта 'Бордо Односемянная' (к-3151, Россия) с темно-бордовой окраской мякоти включен в эту группу и, аналогично другим образцам с подобными характеристиками, у него зафиксированы желтые бетаксантины. Мутаций, негативно влияющих на функции ключевых генов биосинтеза беталаиновых пигментов, в генотипе образца к-3151 обнаружено не было. Как выяснилось в результате сравнения полученных аллельных различий с имеющимися литературными данными, за накопление желтых бетаксантинов ответственны гены семейства цитохром P450 β -клады, *CYP76AD5* и *CYP76AD6* (Polturak et al., 2015; Polturak et al., 2017; Sunnadeniya et al., 2016). Поскольку продукт гена *CYP76AD1* участвует в двух последовательных этапах превращения тирозина в цикло-ДОФА, тогда как *CYP76AD5* и *CYP76AD6* кодируют ферменты, осуществляющие только гидроксирование тирозина, нокаут генов *CYP76AD5.1*, *CYP76AD5.2*, *CYP76AD5.3* либо *CYP76AD6*, вероятно, не повлияет на процесс превращения метаболитов в общей схеме биосинтеза красных бетацианинов, однако может уменьшить накопление желтых бетаксантинов в мякоти корнеплода свеклы столовой (Grützner et al., 2021). В свою очередь потеря функции гена *CYP76AD1* повлечет обрыв цепи превращений по пути циклизации L-ДОФА, что приведет к полному отсутствию красных бетацианинов и позволит получить формы свеклы столовой с желтой окраской мякоти корнеплода.

Заключение

В данном исследовании проведен скрининг аллельных различий по ключевым генам биосинтеза беталаинов у форм свеклы столовой с контрастной окраской мякоти корнеплода. Он позволил не только уточнить роль ключевых генов в процессе биосинтеза беталаиновых пигментов, но и выбрать наиболее подходящие гены-мишени для геномного редактирования. Впервые выявлена нонсенс-мутация в гене *CYP76AD1* у образца с желтой окраской мякоти корнеплода, а также ряд миссенс-мутаций в гене *BvDODA1*, вероятно, приводящих к неокрашенному фенотипу. С целью получения форм с более темной окраской мякоти корнеплода методами геномного редактирования мы предлагаем рассматривать гены *CYP76AD6*, *CYP76AD5.2* (а также обнаруженные нами в ходе анализа *in silico* высокоомологичные копии *CYP76AD5.1* и *CYP76AD5.3*) как потенциальную мишень/мишени для нокаута у образцов с красной или темно-бордовой окраской мякоти корнеплода. Результаты данного исследования также могут быть полезны в маркер-ориентированной селекции при отборе генотипов с заданными характеристиками. Созданные сорта в перспективе будут иметь важное стратегическое значение для успешной реализации программы импортозамещения, а также являться основой для формирования надежной отечественной сырьевой базы в пищевой, фармацевтической и косметической отраслях промышленности.

References / Литература

- Bastos E.L., Schliemann W. Betalains as antioxidants. In: H.M. Ekiert, K.G. Ramawat, J. Arora (eds). *Plant Antioxidants and Health. Reference Series in Phytochemistry*. Cham: Springer; 2022. p.51-93. DOI: 10.1007/978-3-030-78160-6_9
- Brockington S.F., Yang Y., Gandia-Herrero F., Covshoff S., Hibberd J.M., Sage R.F. et al. Lineage-specific gene radiations underlie the evolution of novel betalain pigmentation in Caryophyllales. *New Phytologist*. 2015;207(4):1170-1180. DOI: 10.1111/nph.13441
- GenomeNet. MOTIF Search: [website]. Available from: <https://www.genome.jp/tools/motif/> [accessed Oct. 19, 2023].
- Goldman I.L., Austin D. Linkage among the *R*, *Y* and *BI* loci in table beet. *Theoretical and Applied Genetics*. 2000;100(3-4):337-343. DOI: 10.1007/s001220050044
- Gopalan M., Jadhav A.S. Protective effect beetroot *Beta vulgaris* extract against H₂O₂ Induced Oxidative stress in U87MG glioma cells. *South Asian Journal of Experimental Biology*. 2021;11(3):266-274. DOI: 10.38150/sajeb.11(3).p266-274
- Grützner R., Schubert R., Horn C., Yang C., Vogt T., Marillonnet S. Engineering betalain biosynthesis in tomato for high level betanin production in fruits. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:682443. DOI: 10.3389/fpls.2021.682443
- Hatlestad G.J., Akhavan N.A., Sunnadeniya R.M., Elam L., Cargile S., Hembd A. et al. The beet *Y* locus encodes an anthocyanin MYB-like protein that activates the betalain red pigment pathway. *Nature Genetics*. 2015;47(1):92-96. DOI: 10.1038/ng.3163
- Hatlestad G.J., Sunnadeniya R.M., Akhavan N.A., Gonzalez A., Goldman I.L., McGrath J.M. et al. The beet *R* locus encodes a new cytochrome P450 required for red betalain production. *Nature Genetics*. 2012;44(7):816-820. DOI: 10.1038/ng.2297
- Integrated DNA Technologies: [website]. Available from: <https://eu.idtdna.com/pages/tools/oligoanalyzer?returnurl=%2Fcalc%2Falyzer> [accessed Oct. 19, 2023].
- Kajanus B. Über die Farbenavriation der Beta-Rüben. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung*. 1917;5(4): 357-372. [in German]
- Keller W. Inheritance of some major color types in beets. *Journal of Agricultural Research*. 1936;52(1):27-35.
- Khan M.I., Giridhar P. Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*. 2015;117:267-295. DOI: 10.1016/j.phytochem.2015.06.008
- MEGA Software. Molecular Evolutionary Genetics Analysis: [website]. Available from: <https://www.megasoftware.net/> [accessed Oct. 19, 2023].
- MultAlin. Multiple sequence alignment with hierarchical clustering: [website]. Available from: <http://multalin.toulouse.inra.fr/multalin/> [accessed Oct. 19, 2023].
- NCBI. National Center for Biotechnology Information: [website]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov> [accessed Oct. 19, 2023].
- NCBI. National Center for Biotechnology Information. Open Reading Frame Finder: [website]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/orffinder/> [accessed Oct. 19, 2023].
- Ninfali P., Antonini E., Frati A., Scarpa E.S. C-glycosyl flavonoids from *Beta vulgaris* Cicla and betalains from *Beta vulgaris* rubra: antioxidant, anticancer and antiinflammatory activities – A review. *Phytotherapy Research*. 2017;31(6):871-884. DOI: 10.1002/ptr.5819
- Oda M., Furukawa K., Ogata K., Sarai A., Ishii S., Nishimura Y. et al. Identification of indispensable resi-

- dues for specific DNA-binding in the imperfect tandem repeats of c-Myb R2R3. *Protein Engineering, Design and Selection*. 1997;10(12):1407-1414. DOI: 10.1093/protein/10.12.1407
- Pfam. The Protein Family Database: [website]. Available from: <http://pfam.xfam.org/> [accessed Oct. 19, 2023].
- Phytozome 13. The Plant Genomics Resource: [website]. Available from: https://phytozome-next.jgi.doe.gov/info/Bvulgaris_EL10_1_0 [accessed Oct. 19, 2023].
- Polturak G., Breitel D., Grossman N., Sarrion-Perdigones A., Weithorn E., Pliner M. et al. Elucidation of the first committed step in betalain biosynthesis enables the heterologous engineering of betalain pigments in plants. *New Phytologist*. 2015;210(1):269-283. DOI: 10.1111/nph.13796
- Polturak G., Grossman N., Vela-Corcia D., Dong Y., Nudel A., Pliner M. et al. Engineered gray mold resistance, antioxidant capacity, and pigmentation in betalain-producing crops and ornamentals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017;114(34):9062-9067. DOI: 10.1073/pnas.1707176114
- Saikumar P., Murali R., Reddy E.P. Role of tryptophan repeats and flanking amino acids in Myb-DNA interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1990;87(21):8452-8456. DOI: 10.1073/pnas.87.21.8452
- SnapGene. SnapGene Viewer: [website]. Available from: <https://www.snapgene.com/snapgene-viewer> [accessed Oct. 19, 2023].
- Sokolova D.V. Genetic diversity of the table beet (*Beta L.*) collection at VIR as a potential source for breeding (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(4):239-50. [in Russian] (Соколова Д.В. Генетическое разнообразие коллекции столовой свеклы ВИР (*Beta L.*) как потенциал для селекции (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(4):239-250). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-239-250
- Sokolova D.V., Shvachko N.A., Mikhailova A.S., Popov V.S. Betalain content and morphological characteristics of table beet accessions: their interplay with abiotic factors. *Agronomy*. 2022;12(5):1033. DOI: 10.3390/agronomy12051033
- Sokolova D.V., Solovieva A.E. Promising initial material for breeding of beet varieties with a high content of betanin. *Agrarian Russia*. 2019;(8):26-32. [in Russian] (Соколова Д.В., Соловьева А.Е. Перспективный исходный материал для селекции сортов свеклы с высоким содержанием бетанина. *Аграрная Россия*. 2019;(8):26-32). DOI: 10.30906/1999-5636-2019-8-26-32
- Stintzing F.C., Carle R. Betalains – emerging prospects for food scientists. *Trends in Food Science and Technology*. 2007;18(10):514-525. DOI: 10.1016/j.tifs.2007.04.012
- Strack D., Vogt T., Schliemann W. Recent advances in betalain research. *Phytochemistry*. 2003;62(3):247-269. DOI: 10.1016/S0031-9422(02)00564-2
- Sunnadeniya R., Bean A., Brown M., Akhavan N., Hatlestad G., Gonzalez A. et al. Tyrosine hydroxylation in betalain pigment biosynthesis is performed by cytochrome P450 enzymes in beets (*Beta vulgaris*). *PLoS One*. 2016;11(2):e0149417. DOI: 10.1371/journal.pone.0149417
- SWISS-MODEL Interactive Workspace: [website]. Available from: <https://swissmodel.expasy.org/interactive> [accessed Oct. 19, 2023].
- SWISS-MODEL Template Library (SMTL): [website]. Available from: <https://swissmodel.expasy.org/templates/6kks.1> [accessed Oct. 19, 2023].
- Tesoriere L., Allegra M., Butera D., Livrea M.A. Absorption, excretion, and distribution of dietary antioxidant betalains in LDLs: potential health effects of betalains in humans. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2004;80(4):941-945. DOI: 10.1093/ajcn/80.4.941
- Unipro UGENE. Unipro UGENE 49.1: [сайт]. URL: <https://ugene.net/ru/> [дата обращения: 19.10.2023].
- UniProt. Align: [website]. Available from: <https://www.uniprot.org/align> [accessed Oct. 19, 2023].
- UVA FASTA Server. Local DNA alignments (lalign): [website]. Available from: https://fasta.bioch.virginia.edu/fasta_www2/fasta_www.cgi?rm=lalign&pgm=lal [accessed Oct. 19, 2023].
- Wang B., Luo Q., Li Y., Yin L., Zhou N., Li X. et al. Structural insights into target DNA recognition by R2R3-MYB transcription factors. *Nucleic Acids Research*. 2019;48(1):460-471. DOI: 10.1093/nar/gkz1081
- Waterhouse A., Bertoni M., Bienert S., Studer G., Tauriello G., Gumienny R. et al. SWISS-MODEL: homology modelling of protein structures and complexes. *Nucleic Acids Research*. 2018;46(1):296-303. DOI: 10.1093/nar/gky427
- Watson J.F., Goldman I.L. Inheritance of a gene conditioning blotchy root color in table beet (*Beta vulgaris L.*). *Journal of Heredity*. 1997; 88(6):540-543. DOI: 10.1093/oxfordjournals.jhered.a023154
- Yudina R.S., Gordeeva E.I., Shoeva O.Yu., Tikhonova M.A., Khlestkina E.K. Anthocyanins as functional food components. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(2):178-189. [in Russian] (Юдина Р.С., Гордеева Е.И., Шоева О.Ю., Тихонова М.А., Хлесткина Е.К. Антоцианы как компоненты функционального питания. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(2):178-189). DOI: 10.18699/VJ21.022

Информация об авторах

Александра Сергеевна Михайлова, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, a.mikhailova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4565-1539>

Диана Викторовна Соколова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, dianasokol@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9967-7454>

Наталья Альбертовна Швачко, 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, n.shvachko@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1958-5008>

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

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, профессор РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, руководитель направления «Биология и биотехнология растений», Научно-технологический университет «Сириус», Центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, director@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8470-8254>

Information about the authors

Aleksandra S. Mikhailova, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.mikhailova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4565-1539>

Diana V. Sokolova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, dianasokol@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9967-7454>

Natalia A. Shvachko, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.shvachko@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1958-5008>

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

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, Plant Biology and Biotechnology Research Manager, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiyskiy Ave., Sirius Settlement, Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, director@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8470-8254>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 20.10.2023; одобрена после рецензирования 29.12.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 20.10.2023; approved after reviewing on 29.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 575.73:633.11
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-152-160



Состав высокомолекулярных субъединиц глютеина и качество клейковины у линий пшеницы с чужеродным генетическим материалом

О. А. Орловская¹, С. И. Вакула², Л. В. Хотылева¹, А. В. Кильчевский¹

¹ Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

² Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

Автор, ответственный за переписку: Ольга Александровна Орловская, O.Orlovskaya@igc.by

Актуальность. Высокомолекулярные субъединицы глютеина (ВМСГ) вносят наибольший вклад в формирование хлебопекарных свойств мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). У сородичей пшеницы полиморфизм запасных белков глютеинов значительно больше, чем у культивируемых сортов. Цель работы – идентификация состава высокомолекулярных субъединиц глютеина и оценка качества клейковины у линий мягкой пшеницы с интрогрессиями чужеродного генетического материала.

Материалы и методы. Исследовали родительские сорта яровой мягкой пшеницы, образцы тетраплоидных и гексаплоидных видов рода *Triticum* L., а также 19 интрогрессивных линий, полученных с их участием. Разделение глютеинов проводили посредством электрофореза в полиакриламидном геле с додецилсульфатом натрия и идентифицировали ВМСГ по номенклатурной системе P. I. Raunе. Качество клейковины определяли в соответствии с ГОСТ 13586.1-68 (вегетационные периоды 2017–2019, 2021–2022 гг.). Статистическую обработку выполняли в программных пакетах Statistica 10.0 и MS Excel.

Результаты и заключение. У изученных образцов *T. dicoccoides* (Körn. ex Aschers. et Graebn.) Schweinf., *T. spelta* L. и *T. kiharae* Dorof. et Migusch. выявлены нехарактерные для сортов *T. aestivum* ВМСГ, которые представляют интерес для расширения генофонда пшеницы. У 10 из 19 интрогрессивных линий обнаружены ВМСГ родственных видов. В среднем за пятилетний период наблюдений по качеству клейковины сородичи пшеницы значимо превосходят сорта мягкой пшеницы, а интрогрессивные линии существенно не отличаются от родительских генотипов. Линии с высокими реологическими свойствами клейковины, как правило, имеют в составе глютеинов высокомолекулярные субъединицы родственных видов.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., сородичи пшеницы, интрогрессивные линии мягкой пшеницы, SDS-PAGE, локусы *Glu-1*, качество зерна

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта 2.1.2 Государственной программы научных исследований «Биотехнологии-2» (Институт генетики и цитологии НАН Беларуси).

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

Для цитирования: Орловская О.А., Вакула С.И., Хотылева Л.В., Кильчевский А.В. Состав высокомолекулярных субъединиц глютеина и качество клейковины у линий пшеницы с чужеродным генетическим материалом. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):152-160. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-152-160

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-152-160

Composition of high-molecular-weight glutenin subunits and gluten quality in wheat lines with alien genetic material

Olga A. Orlovskaya¹, Svetlana I. Vakula², Lubov V. Khotyleva¹, Alexander V. Kilchevsky¹

¹ Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

² Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

Corresponding author: Olga A. Orlovskaya, O.Orlovskaya@igc.by

Background. High-molecular-weight glutenin subunits (HMW-GSs) make the greatest contribution to the formation of baking properties in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). Glutenin polymorphism of bread wheat relatives is significantly richer than in cultivated varieties. The objective of this work was to identify the HMW-GS composition and assess the gluten quality of bread wheat lines with introgressions of alien genetic material.

Materials and methods. We studied the parental varieties of spring bread wheat, accessions of the tetraploid and hexaploid *Triticum* L. species, and 19 introgressive lines produced with their participation. Glutenins were separated using sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis and HMW-GSs were identified using the Payne nomenclature system. Gluten quality was determined in accordance with GOST 13586.1-68 (the 2017–2019 and 2021–2022 growing seasons). Data processing was performed using the Statistica 10.0 and MS Excel software packages.

Results and conclusion. HMW-GSs uncharacteristic of *T. aestivum* cultivars were identified in the studied accessions of *T. dicoccoides* (Körn. ex Aschers. et Graebn.) Schweinf., *T. spelta* L., and *T. kiharae* Dorof. et Migusch. These HMW-GSs are of interest for enriching the wheat gene pool. HMW-GSs of related species were found in 10 out of 19 introgressive lines. A five-year observation period revealed that wheat relatives on average significantly exceeded common wheat cultivars in gluten quality, and introgressive lines did not differ significantly from the parental genotypes. Lines with high rheological properties of gluten had, as a rule, HMW-GSs of related species in their composition.

Keywords: *Triticum aestivum* L., wheat relatives, introgressive bread wheat lines, SDS-PAGE, *Glu-1* loci, grain quality

Acknowledgements: the work was performed within the framework of Project 2.1.2 of the State Program of Scientific Research “Biotechnologies-2” (Institute of Genetics and Cytology of the NAS of Belarus). The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Orlovskaya O.A., Vakula S.I., Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V. Composition of high-molecular-weight glutenin subunits and gluten quality in wheat lines with alien genetic material. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):152-160. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-152-160

Введение

Одним из приоритетных направлений селекции мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) является повышение хлебопекарных свойств зерна. Известно, что существенное влияние на качество хлеба оказывают высокомолекулярные субъединицы запасных белков глютеинов (ВМСГ), которые кодируются локусами *Glu-1* (*Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-D1*), расположенными на длинных плечах хромосом первой гомеологичной группы (Ribeiro et al., 2013). У сортов в локусах *Glu-B1* и *Glu-D1* экспрессируются, как правило, два гена (х- и у-типа), а в *Glu-A1* – только ген, кодирующий субъединицу 1Ах (Yu et al., 2019). *Glu-A1* является наименее полиморфным среди локусов *Glu-1*, и только три аллеля данного локуса – *Glu-A1c*, *Glu-A1a*, *Glu-A1b* – часто встречаются у сортов пшеницы. Больше всего аллелей выявлено в локусе *Glu-B1*; среди них наиболее распространенными являются *Glu-B1a*, *Glu-B1b*, *Glu-B1c*, *Glu-B1d*, *Glu-B1e*, *Glu-B1f*, *Glu-B1h*, *Glu-B1i*. Р. I. Payne предложена классификация, согласно которой для субъединицы или сочетания субъединиц высокомолекулярных глютеинов установлен балл качества (от 1 до 4) (Payne et al., 1987). Считается, что аллельный состав локуса *Glu-D1* играет основную роль в формировании упругости теста, при этом комбинация субъединиц 1Dх5+1Dу10 оказывает более положительный эффект (4 балла), чем 1Dх2+1Dу12 (2 балла) (Hernández-Estrada et al., 2017). У сородичей пшеницы полиморфизм глютеина значительно больше, чем у культивируемых сортов (Xu et al., 2009; Niu et al., 2011). В литературе есть данные о наличии новых аллелей ВМСГ у *T. dicoccum* Schrank ex Schuebl. (Pflüger et al., 2001), *T. dicoccoides* (Körn. ex Asch. et Graebn.) Schweinf. (Jin et al., 2012; Margiotta et al., 2014), *T. timopheevii* Zhuk. (Obukhova et al., 2009), *T. spelta* L. (An et al., 2005) и некоторых других видов рода *Triticum* L. (Wang et al., 2013; Zhou et al., 2016). Например, субъединица 1Ау, которая отсутствует у мягкой пшеницы, часто встречается у диплоидных видов *T. monosocum* L., *T. urartu* Thum. ex Gandil. (Li et al., 2016), а также у некоторых образцов тетраплоидных видов *T. timopheevii*, *T. dicoccoides* (Xu et al., 2009; Hu et al., 2012). Однако вклад новых аллелей ВМСГ родственных видов в качество зерна мягкой пшеницы изучен недостаточно (Zhang et al., 2016; Roy et al., 2021).

С целью обогащения и улучшения генофонда мягкой пшеницы в скрещивания с сортами *T. aestivum* мы привлекли образцы видов рода *Triticum* (*T. dicoccoides*, *T. dicocum*, *T. durum* Desf., *T. spelta*, *T. kiharae* Dorof. et Migusch.). Установлена хромосомная локализация чужеродного генетического материала у интрогрессивных линий пшеницы по данным С-бэндинга и результатам генотипирования с помощью маркеров SSR (Orlovskaya et al., 2016; Orlovskaya et al., 2020a). Цель данного исследования состояла в идентификации состава высокомолекулярных субъединиц глютеина и оценке качества клейковины у линий мягкой пшеницы с интрогрессиями чужеродного генетического материала.

Материалы и методы

Изучали 19 интрогрессивных линий, полученных нами от скрещивания сортов яровой мягкой пшеницы ('Рассвет', 'Саратовская 29', 'Фестивальная', 'Белорусская 80') с образцами тетраплоидных *T. dicoccoides*, *T. dicocum* к-5199, *T. dicocum* к-45926, *T. durum* и гексаплоидных *T. spelta* к-1731, *T. kiharae* видов рода *Triticum*. Об-

разцы видов пшеницы получены из коллекции ВИР (в тех случаях, когда информация о родословных линиях не сохранилась, номера по каталогу ВИР не указаны). Ранее проведенные нами исследования выявили у данных образцов сородичей пшеницы новые аллели в локусах *Glu-1* (Orlovskaya et al., 2019; Orlovskaya et al., 2020b), в связи с чем их целесообразно использовать для обогащения генофонда мягкой пшеницы. Растения выращивали на экспериментальных полях Института генетики и цитологии НАН Беларуси в 2017–2019, 2021–2022 гг. (г. Минск) на дерново-подзолистой супесчаной почве. Данные о среднесуточных температурах и количестве выпавших осадков (https://rp5.by/Weather_in_the_world) использованы для расчета суммы активных температур (САТ) и гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) (Mamontova, Khromov, 1974). Для оценки качества клейковины использовали показатель ИДК (индекс деформации клейковины), который определяли по ГОСТ 13586.1-68 (ГОСТ 13586.1-68..., 2009) в Центральной республиканской лаборатории по определению качества новых сортов растений Государственной инспекции по испытанию и охране сортов растений (г. Минск, Беларусь). Согласно значениям ИДК выделяют сильную клейковину (45–77 усл. ед., I группа качества), удовлетворительно слабую (78–102 усл. ед., II группа качества) и неудовлетворительно слабую (более 102 усл. ед., III группа качества).

Проведена идентификация состава ВМСГ интрогрессивных линий в сравнении с родительскими формами. Выделение глютеинов пшеницы осуществляли по методике N. K. Singh et al. (1991). Разделение глютеинов проводили посредством электрофореза в полиакриламидном геле с додецилсульфатом натрия (SDS-PAGE) (Laemmli, 1970) в вертикальной электрофоретической камере Maxigel (Biometra-Biomedizinische) и идентифицировали по номенклатурной системе Р. I. Payne (Payne, Lawrence, 1983). В качестве стандарта выступал сорт мягкой пшеницы 'Новосибирская 67', имеющий следующий состав субъединиц: 1Ах1, 1Вх7+1Ву8, Dх2+Dу12.

Статистическую обработку данных проводили в программных пакетах Statistica 10.0 и MS Excel. Оценку различий качества клейковины (показатель ИДК) между группами (сорта, образцы видов *Triticum*, интрогрессивные линии) проводили с помощью дисперсионного анализа и критерия Тьюки.

Результаты

Анализ состава высокомолекулярных субъединиц глютеина показал, что все изученные сорта мягкой пшеницы имеют субъединицы 1 или 2* (кодируются аллелями *Glu-A1a* и *Glu-A1b* соответственно), благоприятно влияющие на хлебопекарные качества (оцениваются в максимальные для данного локуса 3 балла) (табл. 1).

У сорта 'Саратовская 29' обнаружен аллель *Glu-B1b*, который вносит больший положительный вклад в качество хлеба (3 балла), чем *Glu-B1c* (2 бала), идентифицированный у остальных сортов. В локусе *Glu-D1* у родительских сортов выявлен аллель *Glu-D1d*, кроме сорта 'Саратовская 29' (*Glu-D1a*).

Для большинства изученных сородичей пшеницы не удалось точно оценить хлебопекарный потенциал, так как в данных генотипах выявлены новые аллели высокомолекулярных субъединиц глютеина, для которых не установлен балл качества по шкале Р. I. Payne (Payne et al., 1987). Так, у образцов *T. dicoccoides* из 4 ВМСГ не встреча-

Таблица 1. Аллельный состав локусов *Glu-1* и показатель качества клейковины (среднее за 5 лет) у родительских форм интрогрессивных линий пшеницы**Table 1.** Allelic composition of *Glu-1* loci and the gluten quality parameter (average over 5 years) in the parental forms of introgressive wheat lines

Генотип	ИДК, усл. ед.	Глютеин-кодирующие локусы <i>Glu-1</i> (ВМСГ/аллель)			Балл качества
		<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>	
<i>Triticum durum</i>	Не определен	null / c	7+8 / b	–	4
<i>T. dicoccum</i> к-45926	75,6 ± 1,8	null / c	7+8 / b	–	4
<i>T. dicoccoides</i>	79,5 ± 1,2	<i>Td</i>	Vx7+ByTd	–	Не определен
<i>T. dicoccoides</i> к-5199	79,4 ± 1,4	<i>Td</i>	Vx7+ByTd	–	Не определен
<i>T. spelta</i> к-1731	82,4 ± 1,9	1 / a	6.1+22.1 / be	2+12 / a	Не определен
<i>T. kiharae</i>	77,7 ± 1,3	<i>Kh</i>	<i>Kh</i>	<i>Kh</i>	Не определен
‘Рассвет’	82,1 ± 1,2	2 / b	7+9 / c	5+10 / d	9
‘Саратовская 29’	83,8 ± 1,3	2 / b	7+8 / b	2+12 / a	8
‘Фестивальная’	83,0 ± 1,1	2 / b	7+9 / c	5+10 / d	9
Белорусская 80’	81,3 ± 1,9	1 / a	7+9 / c	5+10 / d	9

Примечание: «–» – отсутствие аллеля в локусе; *Td* – аллели *Triticum dicoccoides*; *Kh* – аллели *T. kiharae*

Note: “–” – absence of the allele in the locus; *Td* – *Triticum dicoccoides* alleles; *Kh* – *T. kiharae* alleles

ются у мягкой пшеницы 3 субъединицы (1AxTd, 1AyTd и ByTd), у образца *T. spelta* к-1731 – 2 субъединицы (1Vx6.1 и 1Vy22.1) из 5, а у *T. kiharae* все обнаруженные нами ВМСГ нехарактерны для культивируемых сортов (см. табл. 1).

Дисперсионный анализ и тест множественных сравнений Тьюки показал, что сородичи пшеницы (78,9 усл. ед.) значимо превосходят сорта мягкой пшеницы (82,6 усл. ед.) по качеству клейковины (среднее за 5 лет). В среднем за весь период наблюдений в группе интрогрессивных линий ИДК составил 81,8 усл. ед., что ближе к значениям сортов. При этом в 2017 и 2018 г. выявлено по 7 интрогрессивных линий, которые достоверно превышают исходный сорт по данному показателю, в 2019 г. таких генотипов было 10, а в 2021 и 2022 г. – по 6. В среднем за весь период наблюдений наилучшие реологические свойства клейковины среди интрогрессивных линий отмечены для линий 20-1 (78,5 усл. ед. ИДК), 2-7 (79,5 усл. ед. ИДК), 13-3 (79,8 усл. ед. ИДК), 1-3 (80,1 усл. ед. ИДК), 7 (80,6 усл. ед. ИДК), 226-7 (80,8 усл. ед. ИДК), 34-1 (81,1 усл. ед. ИДК), 25-2 (81,5 усл. ед. ИДК) (табл. 2).

Данные линии по качеству клейковины превосходят родительские сорта пшеницы, а в отдельные годы их ИДК составлял менее 77 усл. ед., что соответствует сильной клейковине. Следует отметить, что интрогрессивные линии, превышающие родительские сорта по качеству клейковины, как правило, имеют в своем составе ВМСГ родственных видов (см. табл. 2). Например, линия 13-3 *T. dicoccoides* × ‘Фестивальная’ унаследовала субъединицы 1Ax и 1Ay от дикой полбы, линия 2-7 *T. dicoccum* к-45926 × ‘Фестивальная’ – 1Vx и 1Vy от культурной полбы. От *T. kiharae* выявлены субъединицы 1Ax, 1Ay, 1Dx, 1Du (линия 34-1 *T. kiharae* × “Фестивальная”) и 1Gu, 1Dx и 1Du (линия 25-2 *T. kiharae* × ‘Саратовская 29’).

Двухфакторный дисперсионный анализ показал достоверный вклад в формирование качества клейковины

пшеницы не только генотипа, но также условий года выращивания и их взаимодействия (табл. 3).

Анализ погодных условий с мая по август в период проведения исследований показал, что наиболее существенные различия по температурному режиму и количеству осадков наблюдались в мае и июле. Так, наиболее засушливым май был в 2017 г. (выпало всего 43% осадков от нормы), в то время как в 2018 и 2019 г. количество осадков существенно от нормы не отличалось, а в 2021 и 2022 г. наблюдались обильные осадки. Наиболее неблагоприятный температурный режим мая отмечен в 2021 и 2022 г. – среднемесячная температура была ниже нормы (на 1,9 и 2,6°C соответственно). Июль 2021 г. характеризовался значительным недостатком влаги, в то время как в остальные годы в данном месяце увлажнение было выше оптимальных значений. Гидротермический коэффициент (ГТК, показатель естественного обеспечения территории влагой) в июле 2021 г. составил всего 0,6, что характеризует данный период как очень засушливый. ГТК июля 2017, 2018, 2019 и 2022 г. был на уровне 2,8; 2,8; 2,4 и 1,6 соответственно. Подавляющее большинство генотипов имели самое высокое качество клейковины в 2017 и 2019 г., а самое низкое – в 2021 и 2022 г. (рисунок).

Обсуждение

У родительских сортов во всех трех локусах *Glu-1* выявлены аллели, которые распространены у многих культивируемых сортов *T. aestivum* (см. табл. 1). Согласно литературным данным, для сорта ‘Саратовская 29’ характерен аллель *Glu-B1c*, однако в нашем исследовании у сорта ‘Саратовская 29’ обнаружен аллель *Glu-B1b*. Внутрисортной полиморфизм данного генотипа показан в работах других авторов (Obukhova et al., 2009). Локус *Glu-D1* подавляющего большинства изученных нами сортов представлен благоприятным аллелем *Glu-D1d*. Суще-

Таблица 2. Аллельный состав локусов *Glu-1* и показатель качества клейковины (среднее за 5 лет) у интрогрессивных линий пшеницы**Table 2.** Allelic composition of *Glu-1* loci and the gluten quality parameter (average over 5 years) in introgressive wheat lines

Генотип	Линия	ИДК, усл. ед.	Глютеин-кодирующие локусы <i>Glu-1</i> (ВМСГ/аллель)			Балл качества
			<i>Glu-A1</i>	<i>Glu-B1</i>	<i>Glu-D1</i>	
<i>Triticum dicoccum</i> к-45926 × 'Фестивальная'	1-3	80,1 ± 1,8	1 / a	7+9 / c	5+10 / d	9
"	2-7	79,5 ± 1,5	1 / a	7+8 / b	5+10 / d	10
<i>T. dicoccoides</i> × 'Фестивальная'	11-1	83,8 ± 1,3	<i>Td</i>	Vx7+VyTd	-	
"	13-3	79,8 ± 1,3	<i>Td</i>	7+9 / c	-	Не определен
"	15-7-1	83,6 ± 1,6	1 / a	7+9 / c	5+10 / d	9
"	15-7-2	83,9 ± 1,7	1 / a	7+9 / c	5+10 / d	9
"	16-5	81,9 ± 1,7	2 / b	7+8 / b	2+12 / a	7
'Рассвет' × <i>T. dicoccoides</i> к-5199	29	81,2 ± 1,8	2 / b	7+9 / c	5+10 / d	9
'Саратовская 29' × <i>T. dicoccoides</i>	8	82,5 ± 1,7	2 / b	7+8 / b	2+12 / a	7
<i>T. durum</i> × 'Белорусская 80'	221-1	83,3 ± 1,3	null / c	7+9 / c	5+10 / d	7
"	226-7	80,8 ± 1,5	1 / a	7+8 / b	5+10 / d	10
<i>T. spelta</i> к-1731 × 'Саратовская 29'	7	80,6 ± 0,5	1 / a	6.1+22.1/be	2+12 / a	Не определен
<i>T. spelta</i> к-1731 × 'Рассвет'	1-8	81,1 ± 1,1	2 / b	13+16 / f	5+10 / d	10
<i>T. kiharae</i> × 'Саратовская 29'	19	82,6 ± 2,0	2 / b	7+9 / c	Dx5+DyKh	Не определен
"	20-1	78,5 ± 1,2	2 / b	7+8 / b	5+10 / d	10
"	25-2	81,5 ± 1,1	1 / a	Vx7+GyKh	<i>Kh</i>	Не определен
<i>T. kiharae</i> × 'Фестивальная'	28	84,6 ± 2,1	2 / b	7+8 / b	5+10 / d	10
"	34-1	81,1 ± 1,3	<i>Kh</i>	7+9 / c	<i>Kh</i>	Не определен
"	34-2	84,1 ± 1,8	<i>Kh</i>	7+9 / c	<i>Kh</i>	Не определен

Примечание: «-» – отсутствие аллеля в локусе; *Td* – аллели *Triticum dicoccoides*; *Kh* – аллели *T. kiharae*

Note: "-" – absence of the allele in the locus; *Td* – *Triticum dicoccoides* alleles; *Kh* – *T. kiharae* alleles

Таблица 3. Двухфакторный дисперсионный анализ признака «качество клейковины» интрогрессивных линий пшеницы и родительских форм в условиях пяти полевых сезонов**Table 3.** Two-way analysis of variance for the gluten quality character in introgressive wheat lines and their parental forms under the conditions of five field seasons

Фактор	df	SS	MS	F
Генотип	27	1225	45*	62
Условия среды	4	4322	1080*	1465
Генотип × условия среды	108	1407	13*	18
Ошибка	139	103	1	

Примечание: df – число степеней свободы; SS – суммы квадратов; MS – средние квадраты; F – критерий Фишера; * – достоверно при P < 0,01

Note: df – number of degrees of freedom; SS – sum of squares; MS – mean squares; F – Fisher's test; * – statistically significant at P < 0.01

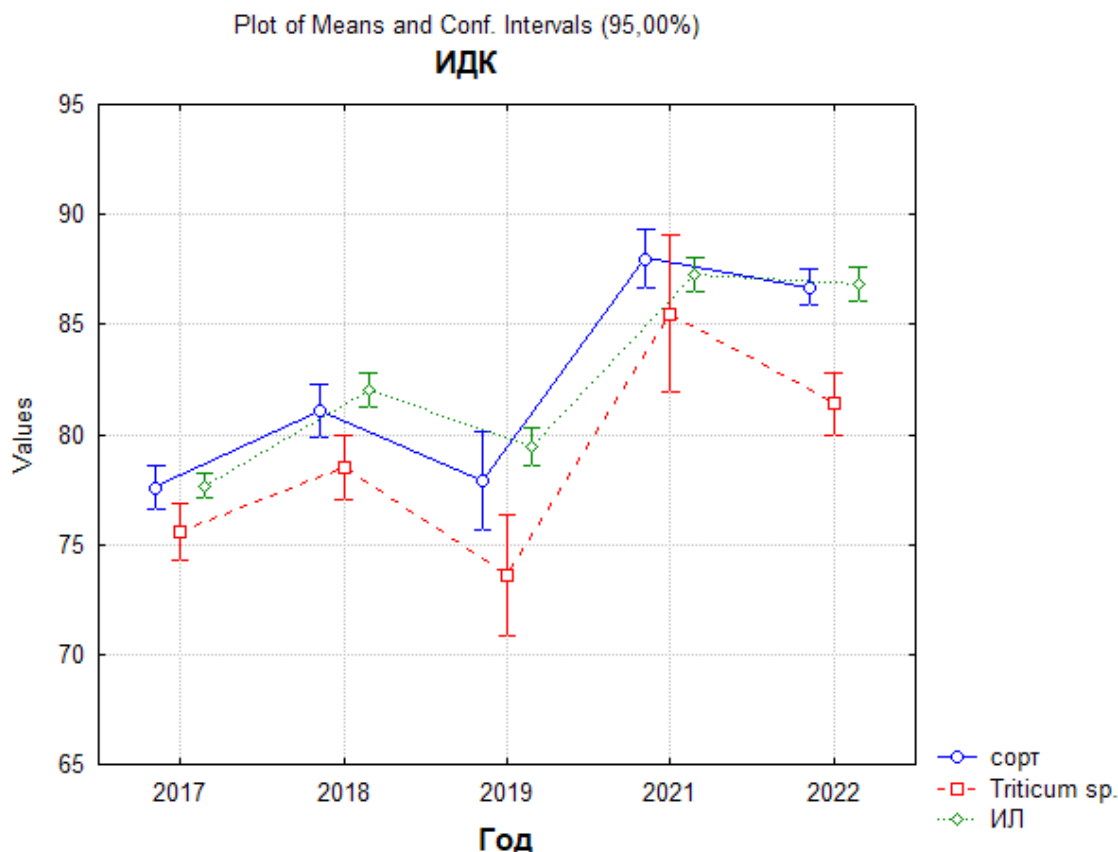


Рисунок. Диаграммы размаха показателя ИДК трех групп генотипов пшеницы (сорта, образцы видов *Triticum*, интрогрессивные линии) в пятилетний период исследования (ИЛ – интрогрессивные линии; о – среднее; I – размах)

Figure. Box plot showing variation ranges of the gluten deformation index in three groups of wheat genotypes (cultivars, accessions of *Triticum* species, and introgression lines) (ИЛ – introgression lines; о – mean; I – range)

ствуует предположение, что улучшение хлебопекарных свойств обусловлено присутствием дополнительных цистеиновых остатков в повторяющемся домене субъединицы Dх5 (Gale, 2004). Таким образом, согласно классификации Р. I. Payne, сорта 'Рассвет', 'Фестивальная', 'Белорусская 80' обладают высоким (итоговая оценка 9 баллов), а сорт 'Саратовская 29' – средним (итоговая оценка 8 баллов) потенциалом по хлебопекарным качествам зерна. Прогнозная оценка по данной шкале в целом согласуется с показателями ИДК: 'Саратовская 29' имела самый высокий ИДК среди изученных сортов (см. табл. 1), а в соответствии с ГОСТ 13586.1-68 более высокий ИДК означает пониженное качество клейковины.

Согласно литературным данным, обнаруженные нами у *T. dicoccum* к-45926 субъединицы null/7+8 встречаются с большой частотой среди образцов культурной полбы. Так, при изучении 91 генотипа различного происхождения данная комбинация ВМСГ идентифицирована у 35,1% образцов (Xu et al., 2009).

Большой интерес для расширения генофонда пшеницы представляют образцы дикой полбы, несущие новые аллели в локусах *Glu-1*. Ранее нами определены нуклеотидные последовательности генов *1AxTd* и *1ByTd* (коды доступа в базе данных GenBank MN475136 и MG897125 соответственно), которые были транслированы в гипотетическую последовательность аминокислот (Orlovskaya et al., 2020b). Изучение первичной и вторичной структуры белка данных ВМСГ позволило прогнозировать высокий вклад в хлебопекарные свойства субъеди-

ницы *1AxTd* и средний вклад – субъединицы *1ByTd* (Orlovskaya et al., 2020b). Особое значение придается новым субъединицам *1Ax+1Ay*, так как у пшениц самый низкий полиморфизм отмечен в локусе *Glu-A1*. Ген, кодирующий субъединицу *1Ay*, обнаружен только у образцов диплоидных и тетраплоидных пшениц, но не экспрессируется у сортов *T. aestivum* (Hu et al., 2012). Субъединицы у-типа содержат больше цистеиновых остатков, чем субъединицы х-типа, что увеличивает их значимость для улучшения качества муки из-за возможности формировать больше внутри- и межмолекулярных дисульфидных связей (Peng et al., 2015). Есть сведения о положительном эффекте субъединицы *1Ay* на такие хлебопекарные качества, как водопоглощительная способность муки, растяжимость теста и объем хлеба (Roy et al., 2021). Исследованные нами генотипы дикой полбы имеют преимущество над изученными сортами по качеству клейковины (см. табл. 1). В литературе также встречаются данные о высоких хлебопекарных качествах *T. dicoccoides*. Например, при изучении D. Zhang с соавторами 27 генотипов дикой полбы выявлены значительные отличия между ними по ряду реологических свойств теста, и несмотря на отсутствие D-генома отдельные образцы обладают высоким качеством клейковины (Zhang et al., 2016).

В одной из своих работ мы провели молекулярный анализ субъединиц *1Vx6.1* и *1Vy22.1*, обнаруженных у образца *T. spelta* к-1731 (Orlovskaya et al., 2019). Известно, что эти субъединицы высокомолекулярных глютеинов часто встречаются у европейской спельты (An et al.,

2005). Сравнение аминокислотной последовательности и вторичной структуры белка ВМСГ 1Вх6.1 и 1Ву22.1 с субъединицами 1Вх и 1Ву с высоким вкладом в качество не выявили предпосылок для формирования высоких хлебопекарных свойств субъединицами спельты (Orlovskaya et al., 2019). Качество клейковины изученного образца спельты уступало остальным образцам сородичей пшеницы, но было на уровне родительских сортов (см. табл. 1). В работе других ученых также установлены невысокие хлебопекарные качества зерна спельты (Morgun et al., 2016). При этом зерно этого вида пшеницы имеет ценные питательные свойства (высокое содержание белка, незаменимых аминокислот, витаминов, микроэлементов), в связи с чем используется для производства круп и кондитерских изделий.

Согласно показателю ИДК *T. kiharae* характеризуется высоким качеством клейковины. Установлено, что данный генотип экспрессирует больше высокомолекулярных субъединиц глютенина по сравнению с изученными сортами мягкой пшеницы; кроме того, все субъединицы *T. kiharae* отличаются от субъединиц сортов *T. aestivum* по подвижности в SDS-PAGE. Представляют интерес выявленные новые 1Dx и 1Du субъединицы, так как аллельный состав локуса *Glu-D1* у современных сортов мягкой пшеницы очень ограничен (Gao et al., 2020). Считается, что аллели локуса *Glu-D1* оказывают наибольший вклад в формирование хлебопекарных свойств, в связи с чем предпринимаются попытки найти новые источники для увеличения разнообразия аллелей в локусе *Glu-D1*. Так, китайскими учеными у ландрас идентифицированы новые аллели данного локуса, контролируемые синтез субъединиц 1Du12.6 и 1Du12.7, которые имеют схожую вторичную структуру с субъединицей 1Du10 и являются ценными источниками для улучшения качества клейковины пшеницы (Peng et al., 2015). Более 80 комбинаций аллелей в локусе *Glu-D1* обнаружено у образцов *Aegilops tauschii* Coss. (Rasheed et al., 2012).

Результаты электрофоретического анализа показали наличие ВМСГ родственных видов у 10 из 19 интрогрессивных линий (см. табл. 2), при этом большинство из них превышает родительский сорт по качеству клейковины (линии 13-3, 2-7, 226-7, 7, 34-1, 25-2). Необходимо отметить, что состав высокомолекулярных субъединиц глютенина не объясняет всех различий в оценке качества зерна. Например, линия 11-1 *Triticum dicoccoides* × 'Фестивальная' имеет спектр ВМСГ такой же, как у *T. dicoccoides*, но ИДК данного генотипа (83,5 усл. ед.) выше, чем у дикой полбы (80,5 усл. ед.). Линии 34-1 и 34-2 *T. kiharae* × 'Фестивальная' обладают идентичным составом ВМСГ, но ИДК линии 34-1 (81,88 усл. ед.) ниже, чем у родительского сорта (83,37 усл. ед.), а ИДК линии 34-2 (85,0 усл. ед.) – выше. Данный факт обусловлен тем, что на хлебопекарные свойства зерна пшеницы, наряду с высокомолекулярными субъединицами, также оказывают влияние и низкомолекулярные субъединицы глютенина (Rasheed et al., 2014). Кроме того, качество клейковины зависит не только от генотипа, но и от условий окружающей среды. Например, в годы с оптимальной обеспеченностью влагой и теплом в летние месяцы (2017 и 2019 г.) все сородичи пшеницы, за исключением спельты, формировали клейковину I группы качества, в то время как в годы с неравномерным выпадением осадков в течение вегетационного периода (2021 и 2022 г.) – клейковину только II группы качества. О роли среды в формировании качества муки говорится в работах многих ученых (Zhang et al., 2016; Vancini et al., 2019). Встречаются также дан-

ные о разном влиянии аллелей *Glu-1* на качество клейковины в зависимости от условий среды. Так, согласно классификации P.I. Payne, *Glu-A1a* и *Glu-A1b* оказывают схожий эффект (3 балла). Однако на основе изучения 272 генотипов пшеницы в условиях Бразилии установлено, что аллель *Glu-A1a* вносит больший положительный вклад в хлебопекарное качество, чем *Glu-A1b* (Vancini et al., 2019). При оценке качества хлеба у 180 линий в США, напротив, предпочтительней был аллель *Glu-A1b* (Zheng et al., 2010). Таким образом, при селекции пшеницы необходимо учитывать не только роль генотипа на формирование качества зерна, но и влияние среды.

Заключение

У изученных образцов *T. dicoccoides*, *T. spelta* и *T. kiharae* выявлены нехарактерные для сортов *T. aestivum* ВМСГ. Особый интерес представляют новые субъединицы 1Ax+1Ay, имеющиеся у дикой полбы и синтетической пшеницы *T. kiharae*, так как у современных сортов в локусе *Glu-A1* отмечен очень низкий полиморфизм, а ген, кодирующий субъединицу 1Ay, не экспрессируется вовсе. У 10 из 19 интрогрессивных линий обнаружены ВМСГ родственных видов.

Оценка различий показателя ИДК (среднее за 5 лет) между группами (сорта, образцы видов рода *Triticum* и интрогрессивные линии) показала, что сородичи пшеницы (78,9 усл. ед.) значимо превосходят сорта мягкой пшеницы (82,6 усл. ед.) по качеству клейковины. Самыми высокими реологическими свойствами клейковины характеризовались образцы *T. dicoccum* к-45926 и *T. kiharae*. В среднем за весь период наблюдений в группе интрогрессивных линий ИДК составил 81,8 усл. ед., что ближе к значениям сортов. Наилучшие реологические свойства клейковины среди интрогрессивных линий отмечены для линий 20-1 и 25-2 (*T. kiharae* × 'Саратовская 29'), 2-7 и 1-3 (*T. dicoccum* к-45926 × 'Фестивальная'), 13-3 (*T. dicoccoides* × 'Фестивальная'), 7 (*T. spelta* к-1731 × 'Саратовская 29'), 226-7 (*T. durum* × 'Белорусская 80'), 34-1 (*T. kiharae* × 'Фестивальная'). Следует отметить, что данные интрогрессивные линии превышают родительские сорта по качеству клейковины и, как правило, имеют в своем составе ВМСГ родственных видов.

Установлено статистически значимое влияние генотипа, условий года и их взаимодействия на изменчивость качества клейковины ($P < 0,01$). Подавляющее большинство изученных генотипов пшеницы имели лучшие упруго-вязкие свойства клейковины в годы с оптимальной обеспеченностью влагой и теплом в летние месяцы (2017 и 2019 г.), а самые низкие – в годы с неравномерным выпадением осадков в течение вегетационного периода (2021 и 2022 г.).

Полученные данные показали перспективность использования сородичей пшеницы для улучшения хлебопекарного потенциала сортов *T. aestivum*.

References / Литература

- An X., Li Q., Yan Y., Xiao Y., Xsam S.L.K., Zeller F.J. Genetic diversity of European spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L. em. Thell.) revealed by glutenin subunit variations at the *Glu-1* and *Gli-3* loci. *Euphytica*. 2005;146(3):193-201. DOI: 10.1007/s10681-005-9002-6
- Gale K.R. Diagnostic DNA markers for quality traits in wheat. *Journal of Cereal Science*. 2004;41(2):181-192. DOI: 10.1016/j.jcs.2004.09.002

- 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
- GOST 13586.1-68. Interstate standard. Grain. Methods for determination of quantity and quality of gluten in wheat. Moscow: Standartinform; 2009. [in Russian] (ГОСТ 13586.1-68. Межгосударственный стандарт. Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице. Москва: Стандартинформ; 2009). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200024345> [дата обращения: 06.09.2023].
- Hernández-Estrada Z.J., Rayas-Duarte P., Cárdenas J.D.D.F. Creep recovery of wet gluten and high-molecular-weight glutenin subunit composition: Relationship with viscoelasticity of dough and breadmaking quality of hard red winter wheat. *Cereal Chemistry*. 2017;94(2):223-229. DOI: 10.1094/CHEM-03-16-0049-R
- Hu X.G., Wu B.H., Bi Z.G., Liu D.C., Zhang L.Q., Yan Z.H. et al. Allelic variation and distribution of HMW glutenin subunit 1Ay in *Triticum* species. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2012;59(4):491-497. DOI: 10.1007/s10722-011-9698-1
- Jin M., Xie Z.Z., Ge P., Li J., Jiang S.S., Subburaj S. et al. Identification and molecular characterization of HMW glutenin subunit 1By16* in wild emmer. *Journal of Applied Genetics*. 2012;53(3):249-258. DOI: 10.1007/s13353-012-0101-5
- Laemmli U.K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4. *Nature*. 1970;227(5259):680-685. DOI: 10.1038/227680a0
- Li H.Y., Li Z.L., Zeng X.X., Zhao L.B., Chen G., Kou C.L. et al. Molecular characterization of different *Triticum monococcum* ssp. *monococcum* *Glu-A1^m*x alleles. *Cereal Research Communications*. 2016;44(3):444-452. DOI: 10.1556/0806.44.2016.006
- Mamontova L.I., Khromov S.P. Meteorological dictionary (Meteorologicheskii slovar). Leningrad: Gidrometeoizdat; 1974. [in Russian] (Мамонтова Л.И., Хромов С.П. Метеорологический словарь. Ленинград: Гидрометеиздат; 1974).
- Margiotta B., Colaprico G., Urbano M. Polymorphism of high Mr glutenin subunits in wild emmer *Triticum turgidum* subsp. *dicocoides*: chromatographic, electrophoretic separations and PCR analysis of their encoding genes. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2014;61(2):331-343. DOI: 10.1007/s10722-013-0037-6
- Morgun V.V., Sichkar S.M., Pochinok V.M., Ninieva A.K., Chungunkova T.V. Characterization of spelt collection samples (*Triticum spelta* L.) by elements of plant productivity structure and baking quality. *Plant Physiology and Genetics*. 2016;48(2):112-119. DOI: 10.15407/frg2016.02.112
- Niu Z.X., Klindworth D.L., Wang R.C., Jauhar P.P., Larkin P., Xu S.S. Characterization of HMW glutenin subunits in *Thinopyrum intermedium*, *Th. bessarabicum*, *Lophopyrum elongatum*, *Aegilop smarkgrafii*, and their addition lines in wheat. *Crop Science*. 2011;51(2):667-677. DOI: 10.2135/cropsci2010.04.0235
- Obukhova L.V., Budashkina E.B., Shumny V.K. A search for high-molecular-weight subunits of glutenin from *Triticum timopheevi* Zhuk. in the lines of common wheat (*Triticum aestivum* L. × *Triticum timopheevi* Zhuk.). *Russian Journal of Genetics*. 2009;45(9):1139-1142. DOI: 10.1134/S1022795409090166
- Orlovskaya O., Dubovets N., Solovey L., Leonova I. Molecular cytological analysis of alien introgressions in common wheat lines derived from the cross of *Triticum aestivum* with *T. kiharae*. *BMC Plant Biology*. 2020a;20 (Suppl 1):201. DOI: 10.1186/s12870-020-02407-2
- Orlovskaya O.A., Leonova I.N., Adonina I.G., Salina E.A., Khotyleva L.V., Shumny V.K. Molecular cytogenetic analysis of triticale and wheat lines with introgressions of the genetic material of *Triticeae* tribe species. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*. 2016;6(5):527-536. DOI: 10.1134/S2079059716050087
- Orlovskaya O.A., Yatsevich K., Vakula S., Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V. Characterization of high molecular weight glutenin subunits in wild emmer wheat (*Triticum dicocoides*). *Cytology and Genetics*. 2020b;54(3):199-205. DOI: 10.3103/S009545272003010X
- Orlovskaya O.A., Yatsevich K.K., Vakula S.I., Khotyleva L.V., Kilchevsky A.V. Molecular characterization of high-molecular weight glutenin subunits 1Bx6.1 and 1By22.1 from *Triticum spelta* K1731 accession. *Factors in Experimental Evolution of Organisms*. 2019;25:147-153. [in Russian] (Орловская О.А., Яцевич К.К., Вакула С.И., Хотылева Л.В., Кильчевский А.В. Молекулярная характеристика высокомолекулярных субъединиц глютеина 1Bx6.1 и 1By22.1 образца *Triticum spelta* K1731. Факторы экспериментальной эволюции организмов. 2019;25:147-153). DOI: 10.7124/FEE0.v25.1156
- Payne P.I., Lawrence G.J. Catalogue of alleles for the complex gene loci, *Glu-A1*, *Glu-B1*, and *Glu-D1* which code for high-molecular-weight subunits of glutenin in hexaploid wheat. *Cereal Research Communications*. 1983;11:29-35.
- Payne P.I., Nightingale M.A., Krattiger A.F., Holt L.M. The relationship between HMW glutenin subunit composition and bread-making quality of British-grown wheat varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1987;40(1):51-65. DOI: 10.1002/jsfa.2740400108
- Peng Y., Yu K., Zhang Y., Islam S., Sun D., Ma W. Two novel y-type high molecular weight glutenin genes in Chinese wheat landraces of the Yangtze-River region. *PloS One*. 2015;10(11):e0142348. DOI: 10.1371/journal.pone.0142348
- Pflüger L.A., Martin L.M., Alvarez J.B. Variation in the HMW and LMW glutenin subunits from Spanish accessions of emmer wheat (*Triticum turgidum* ssp. *dicocum* Schrank). *Theoretical and Applied Genetics*. 2001;102(5):767-772. DOI: 10.1007/s001220051708
- Rasheed A., Safdar T., Gul-Kazi A., Mahmood T., Akram Z., Mujeeb-Kazi A. Characterization of HMW-GS and evaluation of their diversity in morphologically elite synthetic hexaploid wheats. *Breeding Science*. 2012;62(4):365-370. DOI: 10.1270/jsbbs.62.365
- Rasheed A., Xia X., Yan Y., Appels R., Mahmood T., He Z. Wheat seed storage proteins: Advances in molecular genetics, diversity and breeding applications. *Journal of Cereal Science*. 2014;60(1):11-24. DOI: 10.1016/j.jcs.2014.01.020
- Reliable prognosis rp5.by: [website]. Available from: https://rp5.by/Weather_in_the_world [accessed Aug. 17, 2023].
- Ribeiro M., Nunes-Miranda J.D., Branlard G., Carillo J.M., Rodriguez-Quijano M., Igrejas G. One hundred years of grain omics: identifying the gluteins that feed the world. *Journal of Proteome Research*. 2013;12(11):4702-4716. DOI: 10.1021/pr400663t
- Roy N., Islam S., Al-habbar Z., Yu Z., Liu H., Lafiandra D. et al. Contribution to breadmaking performance of two different HMW glutenin 1Ay alleles expressed in hexaploid wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2021;69(1):36-44. DOI: 10.1021/acs.jafc.0c03880
- Singh N.K., Shepherd K.W., Cornish G.B. A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin. *Jour-*

- nal of Cereal Science*. 1991;14(3):203-208. DOI: 10.1016/S0733-5210(09)80039-8
- Vancini C., Torres G.A.M., de Miranda M.Z., Consoli L., Bonow S., Grando M.F. Impact of high-molecular-weight glutenin alleles on wheat technological quality. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2019;54:e00639. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00639
- Wang S., Yu Z., Cao M., Shen X., Li N., Li X. et al. Molecular mechanisms of HMW glutenin subunits from 1S(1) genome of *Aegilops longissima* positively affecting wheat bread-making quality. *PLoS One*. 2013;8(4):e58947. DOI: 10.1371/journal.pone.0058947
- Xu L.L., Li W., Wei Y.M., Zheng Y.L. Genetic diversity of HMW glutenin subunits in diploid, tetraploid and hexaploid *Triticum* species. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2009;56:377-391. DOI: 10.1007/s10722-008-9373-3
- Yu Z., Peng Y., Islam M.S., She M., Lafiandra D. et al. Molecular characterization and phylogenetic analysis of active y-type high molecular weight glutenin subunit genes at *Glu-A1* locus in wheat. *Journal of Cereal Science*. 2019;86:9-14. DOI: 10.1016/j.jcs.2019.01.003
- Zhang D., Yuan Y., Su Y., Li S. Analysis of dough rheological property and gluten quality characteristics in wild emmer wheat (*Triticum dicoccoides* (Korn. ex Asch. et Graebn.) Schweinf. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2016;63(4):675-683. DOI: 10.1007/S10722-015-0275-x
- Zheng S., Byrne P.F., Haley S.D., Shan X., Reid S.D. Glutenin allelic variation and 1AL.1RS effects on dough mixing properties of wheat grown in irrigated and rainfed environments. *Euphytica*. 2010;176(3):357-369. DOI: 10.1007/s10681-010-0215-y
- Zhou J.P., Cheng Y., Zang L.L., Yang E.N., Liu C., Zheng X.L. et al. Characterization of a new wheat-*Aegilops biuncialis* 1 M^b (1B) substitution line with good quality-associated HMW glutenin subunit. *Cereal Research Communications*. 2016;44(2):198-205. DOI: 10.1556/0806.43.2015.048

Информация об авторах

Ольга Александровна Орловская, кандидат биологических наук, заместитель заведующего лабораторией, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, O.Orlovskaya@igc.by, <https://orcid.org/0000-0002-1187-1317>

Светлана Ивановна Вакула, кандидат биологических наук, старший преподаватель, Белорусский государственный технологический университет, 220006 Беларусь, Минск, ул. Свердлова, 13а, svettera@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2242-7107>

Любовь Владимировна Хотылева, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, lvkhotyleva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0295-5022>

Александр Владимирович Кильчевский, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Институт генетики и цитологии Национальной академии наук Беларуси, 220072 Беларусь, Минск, ул. Академическая, 27, Kilchev@presidium.bas-net.by, <https://orcid.org/0000-0002-0175-9786>

Information about the authors

Olga A. Orlovskaya, Cand. Sci. (Biology), Deputy Head of a Laboratory, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27 Akademicheskaya St., Minsk 220072, Belarus, O.Orlovskaya@igc.by, <https://orcid.org/0000-0002-1187-1317>

Svetlana I. Vakula, Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer, Belarusian State Technological University, 13a Sverdlova St., Minsk 220006, Belarus, svettera@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2242-7107>

Lubov V. Khotyleva, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27 Akademicheskaya St., Minsk 220072, Belarus, lvkhotyleva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0295-5022>

Alexander V. Kilchevsky, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, Institute of Genetics and Cytology of the National Academy of Sciences of Belarus, 27 Akademicheskaya St., Minsk 220072, Belarus, Kilchev@presidium.bas-net.by, <https://orcid.org/0000-0002-0175-9786>

Вклад авторов: Орловская О. А. – 50%; Вакула С. И. – 30%; Хотылева Л. В. – 10%; Кильчевский А. В. – 10%.

Contribution of the authors: Orlovskaya O. A. – 50%; Vakula S. I. – 30%; Khotyleva L. V. – 10%; Kilchevsky A. V. – 10%.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 03.11.2023; одобрена после рецензирования 15.01.2024; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 03.11.2023; approved after reviewing on 15.01.2024; accepted for publication on 04.03.2024.

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

Научная статья

УДК 633.171

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-161-171



Эффективность ISSR-маркеров для выявления variability генома образцов проса посевного (*Panicum miliaceum* L.)

Д. Х. Архестова^{1,2}, А. А. Яхутлова², А. Д. Хаудов^{1,2}, Л. Х. Сокурова², Т. В. Кулемина³

¹ Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Нальчик, Россия

² Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства, Нальчик, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Владимировна Кулемина, kkku@ya.ru

Актуальность. Просо посевное – одна из основных зерновых культур с широким ареалом возделывания. За последнее десятилетие наблюдается значительный рост потребления проса и продуктов его переработки. Как следствие, становится актуальной селекция сортов с высокими потребительскими свойствами, что требует знания генетического разнообразия образцов для выявления доноров хозяйственно ценных признаков и подбора родительских форм с помощью ISSR-маркеров.

Материалы и методы. Проанализировали 21 образец *Panicum miliaceum* L. коллекции ВИР из разных мест происхождения с использованием восьми ISSR-праймеров. Выделили ДНК каждого образца СТАВ-методом, провели ISSR-анализ в термоциклере BioRad T100 Thermal Cycler. Статистическую обработку выполнили в программе DARwin (версия 6.0.21).

Результаты и заключение. С помощью восьми праймеров было проамплифицировано 116 фрагментов, 62 (53,4%) из них оказались полиморфными. Для оценки эффективности анализируемых праймеров и выявления полиморфизма проса рассчитали основные показатели их информативности, которые оценивали расчетом четырех маркерных параметров. Для большинства ISSR-праймеров были получены средние значения PIC (0,27–0,36); EMR – 1,38–14,5; MI – 0,12–4,87. Четыре ISSR-праймера обладали высокими значениями Rp (3,52–6,76) и были наиболее информативными для генотипирования. Отобранные ISSR-маркеры использовали для оценки генетической изменчивости образцов и их идентификации. Значения генетических расстояний (GD) составили 0,05–0,21. Было показано, что четыре ISSR-маркера с наилучшими значениями информативности обеспечивают достаточный полиморфизм для оценки генетического разнообразия анализируемых генотипов *P. miliaceum* и могут быть рекомендованы для выявления variability генома образцов проса.

Ключевые слова: информативность праймеров, амплификация, генетическое разнообразие, генотипирование

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану Кабардино-Балкарского научного центра РАН по теме НИР № FMEW-2022-0014 «Молекулярно-генетические технологии и традиционная селекция для получения новых сортов и линий с хозяйственно-значимыми характеристиками культурных растений и животных» и 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».

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

Для цитирования: Архестова Д.Х., Яхутлова А.А., Хаудов А.Д., Сокурова Л.Х., Кулемина Т.В. Эффективность ISSR-маркеров для выявления variability генома образцов проса посевного (*Panicum miliaceum* L.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):161-171. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-161-171

IDENTIFICATION OF CULTIVATED PLANT GENETIC DIVERSITY AND CROP WILD RELATIVES FOR SOLVING FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-161-171

Effectiveness of ISSR markers for detecting genomic variability in *Panicum miliaceum* L. accessions

Dzhenet Kh. Arkhestova^{1,2}, Alena A. Yakhutlova², Aliy-bek D. Khaudov^{1,2}, Larisa Kh. Sokurova², Tatiana V. Kulemina³

¹ Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russia

² Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, Nalchik, Russia

³ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Tatyana V. Kulemina, kkku@ya.ru

Background. Millet is one of the main cereal crops with a wide area of cultivation. Over the past decade, there has been a significant increase in the consumption of millet and its processed products. As a result, the breeding of cultivars with high consumer properties is becoming relevant, requiring knowledge of the genetic diversity of germplasm accessions to identify donors of valuable agronomic traits and select parental forms using ISSR markers.

Materials and methods. The analysis with 8 ISSR primers included 21 accessions of *Panicum miliaceum* L. of various origin from the VIR collection. The DNA of each accession was isolated by the CTAB method, and ISSR analysis was performed in a BioRad T100 Thermal Cycler. Statistical processing was made in the DARwin program (version 6.0.21).

Results and conclusion. Eight primers were used to amplify 116 fragments, 62 (53.4%) of which turned out to be polymorphic. To assess the effectiveness of the analyzed primers and identify the polymorphism of millet, basic indicators of their informativeness were calculated and assessed by quantifying four marker parameters. Average PIC (0.27–0.36), EMR (1.38–14.5) and MI (0.12–4.87) values were obtained for most ISSR primers. Four ISSR primers had high Rp values (3.52–6.76) and were the most informative for genotyping. The selected ISSR markers were used to assess the genetic variability of the accessions and identify them. The values of genetic distances (GD) were 0.05–0.21. It was shown that four ISSR markers with the best informativeness values provided sufficient polymorphism to assess the genetic diversity of the analyzed *P. miliaceum* genotypes and could be recommended for identification of the variability in the genome of millet accessions.

Keywords: primer informativeness, amplification, genetic diversity, genotyping

Acknowledgements: the work was performed within the framework of the state task according to the thematic plan of the Kabardin-Balkar Scientific Center of the RAS, Research Topic No. FMEW-2022-0014 “Molecular genetic technologies and traditional breeding for obtaining new cultivars and lines with economically significant characteristics of cultivated plants and animals”, and the state task according to the thematic plan 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”.

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

For citation: Arkhestova D.Kh., Yakhutlova A.A., Khaudov A.D., Sokurova L.Kh., Kulemina T.V. Effectiveness of ISSR markers for detecting genomic variability in *Panicum miliaceum* L. accessions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):161-171. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-161-171

Введение

Просо посевное (*Panicum miliaceum* L.) считается одним из первых domesticiрованных злаков. Центром его происхождения и культивирования является Северный Китай, откуда культура позднее распространилась в Индию, Восточную Азию и Восточную Европу (Hunt et al., 2008; Lu et al., 2009).

Просо является шестой по значимости зерновой культурой (Awika et al., 2011), и его мировое производство составляет более 30 млн т (FAO Statistical Yearbook..., 2022). Популярность проса определяется пищевой, кормовой и зернофуражной ценностью, высокими агрономическими качествами. Просо уникально благодаря богатому составу питательных веществ. По содержанию общего белка зерно проса (до 15%) превосходит кукурузу (10%), сорго (10%) и пшеницу (12,5%), а по показателям энергетической ценности и усвояемости сопоставимо с ними (Kulemina et al., 2010; Saha et al., 2016). Также в сравнении с другими злаками просо содержит большее количество липидов (2,9%) (Sridhar et al., 1994). Кроме того, эндосперм зерна проса не содержит глютен, что делает его диетическим безглютеновым продуктом. Просо также является важным источником микроэлементов, витаминов, незаменимых аминокислот и антиоксидантов (Kalinova et al., 2023). Богатое полезными веществами зерно проса оказывает и лечебное воздействие на организм, снижает уровень холестерина, предотвращает развитие сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, уменьшает риск развития сахарного диабета 2-го типа, улучшает работу печени (Nabiyaremye et al., 2017; Das et al., 2019).

P. miliaceum также имеет много преимущественных агрономических качеств, так как относится к зерновым культурам с крайне низким требованием к воде и питательным веществам; при этом растения высокоадаптивны к различным климатическим условиям, устойчивы к фитопатогенам и обладают высокой урожайностью (Rajasekaran et al., 2020; Narciso, Nyström, 2023).

За последнее десятилетие интерес к этой культуре, а также к продуктам ее переработки значительно вырос, что привело к более активной селекции новых сортов проса посевного с улучшенными хозяйственно ценными признаками.

Селекция новых сортов, в том числе и проса посевного, требует оценки и подбора родительских форм и, в свою очередь, базируется на знании генетического разнообразия. Именно данные о генетической составляющей помогают разрабатывать селекционные программы и создавать сорта с определенными характеристиками. Источником генетического разнообразия являются в первую очередь коллекции генбанков, в которых в настоящее время представлено более 20 тысяч образцов *P. miliaceum*.

Генетическое разнообразие вида обычно оценивают по общим морфологическим признакам. Однако на них оказывают влияние внешняя среда, стадии развития растения и т. п., а также требуется несколько повторений их оценки в течение ряда лет для установления генетической составляющей признака. В связи с этим морфологическая характеристика образцов считается менее надежной для анализа генетического разнообразия вида растений, чем использование молекулярных маркеров (Agarwal et al., 2008). По сравнению с традиционными методами фенотипирования молекулярные маркеры имеют многочисленные преимущества, поскольку их легко

идентифицировать и они стабильны в различных тканях растений (Zhang et al., 2016).

На сегодняшний день для оценки генетического разнообразия видов сельскохозяйственных растений используют достаточно большое количество различных систем молекулярного маркирования – как мультилокусных, так и монолокусных, включая генотипирование путем секвенирования (GBS), амплификацию ДНК со случайными праймерами (RAPD), анализ полиморфизма длин амплифицированных фрагментов (AFLP), варибельности длин простых микросателлитных повторов (SSR), полиморфизма длин межмикросателлитных последовательностей (ISSR) и ряд других методов (Elshire et al., 2011; Cui et al., 2017; Souza et al., 2017; Liu et al., 2018).

ISSR-маркирование (Inter Simple Sequence Repeat) представляет собой метод, основанный на ПЦР, который включает амплификацию участка ДНК, находящегося между двумя идентичными микросателлитными повторами, и позволяет выявлять варибельность длин межмикросателлитных последовательностей у анализируемых образцов. Использование ISSR-маркеров стало надежным инструментом для анализа генетического разнообразия растений (Souza et al., 2017). Метод ISSR, в отличие от SSR-анализа, выявляет варибельность не одного конкретного локуса, а является мультилокусным, охватывая весь геном. В качестве праймеров используются 16–25-нуклеотидные последовательности ди-, три- и тетра-нуклеотидных повторов (Reddy et al., 2002). ISSR-маркеры широко применяют при анализе биоресурсных коллекций, поскольку метод не требует информации о последовательности ДНК, может обнаруживать вариации в нескольких локусах одновременно, специфичен к микросателлитным последовательностям, маркеры имеют доминантный тип наследования, результаты высоковоспроизводимы и надежны для генотипирования, особенно для образцов одного или близкородственных видов (Cui et al., 2017). Немаловажную роль в популярности ISSR-маркеров для оценки варибельности большого количества образцов играет малая цена анализа и отсутствие необходимости в дорогостоящих ферментах или оборудовании.

Несмотря на всю возрастающую значимость проса посевного как сельскохозяйственной культуры, работ по определению геномной варибельности крайне мало, и исследовано лишь малое количество образцов, охватывающее ограниченные зоны произрастания (M'Rib, Hilu, 1994; Colosi, Schaal, 1997; Karam et al., 2004; Trivedi et al., 2015; Ghimire et al., 2019). Коллекция *P. miliaceum* ВИР включает более 9 тыс. образцов, представляющих весь культурный ареал, однако генотипирование образцов коллекции ранее не проводили.

Целью данной работы стал подбор ISSR-праймеров, пригодных для выявления полиморфизма образцов *P. miliaceum* и оценки их дальнейшего использования для генотипирования коллекции проса посевного, представленного в ВИР, а также определение генетической варибельности у 21 образца проса из коллекции ВИР, используемых в селекционных программах ИСХ КБНЦ РАН.

Материалы и методы

Растительный материал и экстракция ДНК

Для анализа был отобран 21 образец *P. miliaceum* коллекции ВИР. Эти образцы используются в селекционном процессе при создании сортов и гибридов проса посевного в Институте сельского хозяйства Кабардино-Балкар-

ского научного центра РАН (ИСХ КБНЦ РАН) (табл. 1). Тотальную ДНК выделяли из смеси 5–12 свежесобранных листьев 10-дневных проростков каждого образца СТАВ-методом с модификациями (Filyushin et al., 2023).

ISSR-анализ

ПЦР проводили в реакционной смеси объемом 15 мкл, содержащей ~100 нг геномной ДНК, 1х ПЦР-буфер, 2,5 мМ MgCl₂, 0,2 мМ dNTP, 0,1 ед. Taq-полимеразы («Диа-

лат ЛТД», Россия), 1,0 мкМ ISSR-праймера (табл. 2). Реакцию проводили в термоциклере BioRad T100 Thermal Cycler. Условия реакции: первичная денатурация матрицы при 94°C для 5 мин, 35 циклов денатурации при 94°C в течение 1 мин, отжиг ISSR-праймера при температуре 42–61°C (см. табл. 2), характерной для каждого праймера, в течение 1 мин и элонгации при 72°C в течение 1 мин; заключительный этап элонгации при 72°C в течение 7 мин.

Таблица 1. Анализируемые образцы проса посевного

Table 1. The analyzed millet accessions

Номер образца	№ по каталогу ВИР	Место происхождения	Номер образца	№ по каталогу ВИР	Место происхождения
1	10215	Самарская обл.	12	10311	Орловская обл.
2	10483	Самарская обл.	13	507	Китай
3	10344	Саратовская обл.	14	2881	Китай
4	10211	Саратовская обл.	15	919	Приморский край
5	10343	Саратовская обл.	16	986	Приморский край
6	10374	Орловская обл.	17	3590	Приморский край
7	10326	Орловская обл.	18	3180	Республика Тува
8	10377	Орловская обл.	19	10458	Беларусь
9	10378	Орловская обл.	20	10475	Таджикистан
10	10196	Орловская обл.	21	10476	Таджикистан
11	10323	Орловская обл.			

Таблица 2. ISSR-праймеры, используемые для маркирования образцов проса

Table 2. ISSR primers used to analyze millet accessions

Праймер	Последовательность праймера / повтор	Температура отжига праймера, °C	Количество амплифицированных фрагментов	Количество полиморфных фрагментов	Процент полиморфных фрагментов локусов
M1	(AC) ₈ CG	56	11	5	45,5
M2	(AC) ₈ CG	56	21	14	66,7
M7	(CAG) ₅	52	–	–	–
M10	(CA) ₆ RG	42	16	6	37,5
M11	(CA) ₆ R	45	18	9	50
M13	(AGC) ₄ Y	42	–	–	–
M14	(AG) ₈ YT	46	–	–	–
UBC809	(AG) ₇ A	44	–	–	–
UBC827	(AC) ₈ G	51	10	5	50
UBC841	(GA) ₈ YC	53	12	8	66,7
UBC844	(CT) ₈ RC	53	20	12	60
ISSR2	(GAG) ₆ C	61	–	–	–
ISSR11	(GA) ₈ C	56	8	3	37,5
ISSR14	(TC) ₈ AG	51	–	–	–
ISSR15	TG(TACA) ₄	46	–	–	–

Продукты амплификации разделяли электрофорезом в 3-процентном агарозном геле (High resolution agarose, Sigma, США) в 1x TBE-буфере с окрашиванием бромистым этидием. Фрагменты визуализировали на УФ-транслюминаторе и документировали с использованием системы документации гелей в системе BioRad Gel Doc XR+ Imaging System (BioRad, США). Длины амплифицированных ISSR-фрагментов оценивали с использованием 1 kb и 100 bp ДНК-маркера (Fermentas, Литва).

Статистический анализ

Поскольку ISSR-праймеры используются для амплификации доминантных маркеров, для составления матрицы амплифицированные фрагменты оценивали по наличию (1) или отсутствию (0). С использованием полученной матрицы рассчитывали генетические расстояния (GD) (коэффициент Нея) в программе DARwin (версия 6.0.21). Кластерный анализ методом UPGMA (невзвешенный парно-групповой метод со средними арифметическими) и анализ основных координат PCoA также был проведен в программе DARwin вер. 6.0.21. Значение PIC (индекс информационного полиморфизма), ожидаемая гетерозиготность (H), коэффициент эффективного мультиплексирования (EMR), разрешающая способность (Rp) и дискриминационная способность (D), были рассчитаны в программе iMEC (<https://irscope.shinyapps.io/iMEC/>) (Amiryousef et al., 2018). Значение PIC вычисляли с использованием формулы (Botstein et al., 1980):

Разрешающую способность Rp каждого праймера рассчитывали по формуле (Prevost, Wilkinson, 1999):

$$R = \sum I_i$$

где I_i представляет собой информативность полос и определяется как $I_i = 1 - (2 \times [0,5 - p_i])$, где p_i – доля особей, содержащих i-ю полосу.

Дискриминационная способность D оценена по C. Tessier et al. (1999) как:

$$D = 1 - C,$$

где C – вероятность ошибки, которую в свою очередь определяли по формуле $C = \sum c_i = \sum p_i \times N_{p_i} - 1 / N - 1$, где N – количество индивидуумов, C равно сумме всех c_i для всех полос, амплифицированных праймером.

Чтобы охарактеризовать способность каждого праймера обнаруживать полиморфные локусы генотипов, также был рассчитан индекс маркера (MI) для каждого праймера как произведение PIC и E (Varshney et al., 2007).

Результаты и обсуждение

Сравнение эффективности использования ISSR-праймеров для анализа генетического полиморфизма образцов проса

Для характеристики геномной вариабельности 21 образца *P. miliaceum* на основе литературных данных были взяты пятнадцать ISSR-праймеров (см. табл. 2, рис. 1). Для семи праймеров (M7, M13, M14, ISSR2, ISSR14, ISSR15, UBC809) не были получены четкие воспроизводимые продукты амплификации (см. табл. 2).

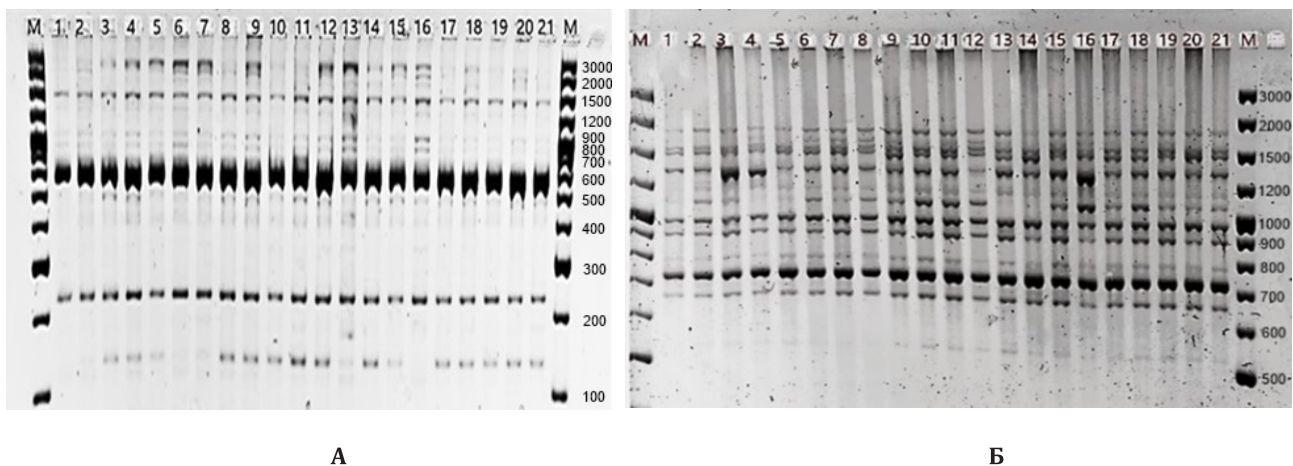


Рис. 1. Электрофореграммы продуктов амплификации ДНК 21 образца *Panicum miliaceum* L. (3-процентный агарозный гель) с использованием ISSR-праймеров M2 (А) и M11 (Б). М-маркер 1 kb ДНК (Fermentas, Литва)

Fig. 1. DNA amplification results for 21 *Panicum miliaceum* L. accessions (3% agarose gel) using the M2 (A) and M11 (Б) ISSR primers. M-marker 1 kb DNA (Fermentas, Lithuania)

$$PIC = 1 - \sum p_i^2 - \sum \sum p_i^2 p_j^2,$$

где p_i и p_j – частоты i-го и j-го аллелей.

Ожидаемая гетерозиготность рассчитана по формуле:

$$H = 1 - \sum p_i^2,$$

где p_i – частота i-го аллеля, а суммирование производится по всем имеющимся аллелям.

EMR рассчитывали по формуле (Powell et al., 1996):

$$E = n \times \beta,$$

где n – среднее число амплифицированных фрагментов определенного системного маркера (мультиплексный коэффициент), β оценивается по количеству полиморфных (n_p) и неполморфных локусов (n_{np}): $\beta = n_p / (n_p + n_{np})$.

Всего с использованием восьми ISSR-праймеров было амплифицировано 116 фрагментов ДНК генома проса посевого. Размер ампликонов составил от 150 до 3000 пн (см. рис. 1). Количество амплифицированных фрагментов для каждого праймера варьировало в диапазоне от 8 до 21, в среднем 14,5 фрагментов на праймер (см. табл. 2). Наибольшее количество фрагментов было получено с использованием праймеров M2 (21) и UBC844 (20), при этом количество полиморфных также было высоким: 14 и 12 соответственно. При меньшем количестве ампликонов (12) праймер UBC841 показал более высокий уровень выявляемого полиморфизма – 8 вариабельных фрагментов (66,7%). Среднее количество числа полиморфных фрагментов в пересчете на праймер составило

7,75. Использование отобранных ISSR-праймеров позволило генотипировать каждый из анализируемых образцов *P. miliaceum*.

Среднее значение выявляемого с использованием восьми ISSR-праймеров полиморфизма составило 53,4%, при этом наибольшие значения были показаны для праймеров UBC841 и M2 (по 66,7% каждый), а для праймеров M10 и ISSR11 – самые низкие (по 37,5% каждый). Праймер ISSR11 амплифицировал наименьшее число фрагментов (8), всего три из которых оказались полиморфными.

Ранее для ISSR-анализа 16 дикорастущих образцов проса посевного из центральных районов Гималаев были использованы восемь микросателлитных праймеров (Trivedi et al., 2015). Эти праймеры отличались от взятых для маркирования в данной работе, однако также представляли собой ди- и тринуклеотидные повторы. А. К. Trivedi с соавторами при использовании этих праймеров амплифицировали 54 ISSR-фрагмента; среднее значение составило всего 6,75 фрагмента на праймер, а среднее значение полиморфных фрагментов – только 3,75 (Trivedi et al., 2015). Доля выявленных полиморфных фрагментов в изученной А. К. Trivedi с соавторами выборке образцов составила 55,6%, что близко к полученному в нашей работе показателю. Также полученные нами значения полиморфизма для ISSR-маркеров были значительно выше, чем при генотипировании образцов родственных видов итальянского проса (чумиза) и пальчатого проса (дагусса) (Ajithkumar et al., 2013), что может объясняться более удачным выбором праймеров или же спецификой анализируемых видов/образцов.

Существует ряд показателей, которые позволяют оценивать меру информационного полиморфизма праймеров и сопутствующие ей величины (Chesnokov, Artemyeva, 2015). Для оценки эффективности использования анализируемых ISSR-праймеров и выявления генетического полиморфизма образцов проса посевного было выбрано несколько параметров (Chesnokov, Artemyeva, 2015; Serrote et al., 2020). При характеристике праймеров значение PIC считается одним из основных показателей, отражающих дискриминационную возможность праймера, и зависит от общего числа аллелей и частот их распределения в анализируемой выборке. Показатели EMR и MI были выбраны Ю. В. Чесноковым

и А. М. Артемьевой для определения эффективности и общей утилитарности выбранной маркерной системы для оценки геномной вариабельности исследуемой выборки образцов проса посевного (Chesnokov, Artemyeva, 2015).

Для оценки возможности использования выбранных ISSR-праймеров для генотипирования образцов *P. miliaceum* были рассчитаны основные параметры информативности (табл. 3). Значения PIC были рассчитаны для характеристики способности каждого из ISSR-праймеров выявлять полиморфизм во всех анализируемых образцах проса. Диапазон значений PIC при использовании восьми праймеров составил 0,077–0,361 со средним значением 0,246 (см. табл. 3). При использовании двух праймеров UBC844 и M2 были выявлены наиболее высокие значения PIC (0,361 и 0,337). При использовании праймера M10 значения PIC были минимальными (0,077). Среднее значение PIC (0,246) анализируемых в данной работе маркеров выше, чем маркеров, полученных при использовании восьми ISSR-праймеров для анализа гималайских образцов, для которых разброс значений PIC составил 0,097–0,306 со средним значением 0,18 (Trivedi et al., 2015). Они несколько ниже средних значений PIC (0,33), показанных для 25 SSR-маркеров, используемых для генотипирования 50 образцов *P. miliaceum* (Cho et al., 2010), но при этом среднее число выявляемых аллелей на праймер в случае SSR составило 4,4, в то время как для ISSR-маркеров – практически в два раза больше (8,7 фрагментов на праймер). Известно, что значение PIC > 0,5 показывает, что используемые праймеры обладают достаточно высокой дискриминационной способностью для анализа генетической вариабельности. Однако для выявления вариабельности образцов проса посевного значения PIC не превышали 0,361 (см. табл. 3). Средние значения PIC, выявленные при использовании ISSR-праймеров, примененных для оценки вариабельности образцов проса как в данном исследовании, так при анализе гималайских образцов (Trivedi et al., 2015), могут, по всей видимости, свидетельствовать о низком уровне полиморфизма генома *P. miliaceum*. Для этих же праймеров, характеризующихся контрастными значениями PIC, были определены наиболее высокие (UBC844 и M2) и низкие (M10, M11) показатели MI и EMR (см. табл. 3).

Таблица 3. Характеристика ISSR-праймеров, используемых для генотипирования образцов *Panicum miliaceum* L.

Table 3. Characteristics of the ISSR primers used for genotyping *Panicum miliaceum* L. accessions

Праймер	H	PIC	EMR	MI	D	Rp
M1	0,206	0,185	9,714	2,005	0,221	2,571
M2	0,428	0,337	14,476	4,872	0,525	6,762
M10	0,080	0,077	1,533	0,118	0,082	1,333
M11	0,357	0,293	1,381	0,405	0,412	4,381
ISSR11	0,182	0,165	7,190	1,189	0,193	0,952
ISSR827	0,320	0,269	8,000	2,560	0,361	2,476
UBC841	0,332	0,277	9,476	2,625	0,377	3,524
UBC844	0,473	0,361	12,333	4,453	0,620	6,762
Среднее	0,297	0,246	8,013	2,278	0,349	3,595

Для оценки способности ISSR-праймера определять различия между большим числом генотипов был использован показатель разрешающей способности (Rp). В нашем исследовании значения Rp варьировали от 0,952 (ISSR11) до 6,762 (M2 и UBC844), в среднем – 3,595. Rp положительно коррелировал с общим количеством амплифицированных фрагментов генома проса. Три ISSR-праймера (M2, UBC844 и M11) имели достаточно высокие значения Rp (6,762, 6,762 и 4,381 соответственно) и поэтому являются наиболее информативными из использованных праймеров для генотипирования образцов проса посевного. Показатели дискриминационной способности D были максимальными для этих же трех праймеров (см. табл. 3).

Таким образом, с использованием лишь четырех праймеров M2, M11, UBC841, UBC844 все анализируемые генотипы проса могут быть идентифицированы; следовательно, данные ISSR-праймеры могут быть рекомендованы для анализа геномной вариабельности образцов *P. miliaceum* коллекций генбанков и селекционных образцов.

Определение генетического разнообразия выборки образцов проса посевного

С использованием коэффициента Нея были получены попарные оценки генетического расстояния (GD) у 21 образца *P. miliaceum* (табл. 4). Значения GD варьировали от 0,05 до 0,21. В целом для анализируемой выборки проса посевного средние генетические расстояния составили 0,11. Полученные показатели в целом были ниже значений, детектированных для 16 гималайских образцов проса (GD 0,11–0,38; среднее GD 0,18) (Trivedi et al., 2015). Это можно объяснить тем, что гималайские

образцы были отобраны из центра разнообразия вида. В то же время AFLP-анализ девяти североамериканских образцов *P. miliaceum* выявил гораздо более низкий уровень вариабельности (GD 0,02–0,04) (Karam et al., 2004), чем в наших исследованиях. Это еще раз доказывает необходимость проведения более широкомасштабных исследований биоразнообразия данной культуры.

Согласно данным таблицы 4, максимальное генетическое расстояние наблюдалось между образцами к-986 (Приморский край) и к-10196 (Орловская обл.) (0,211). Высокие значения GD были также показаны для образцов к-986 (Приморский край) и к-10343 (Саратовская обл.) (GD 0,182); к-10476 (Таджикистан) и к-10215 (Самарская обл.) (GD 0,174); к-10476 (Таджикистан) и к-507 (Китай) (GD 0,174); к-10476 (Таджикистан) и к-919 (Приморский край) (GD 0,172). Минимальные различия были показаны для образцов к-10475 (Таджикистан) и к-10458 (Беларусь) (GD 0,053), а также между образцами к-10458 (Беларусь) и к-10377 (Орловская обл.) (GD 0,057); к-10378 (Орловская обл.) и к-10196 (Орловская обл.) (GD 0,06); к-10475 (Таджикистан) и к-10377 (Орловская обл.) (GD 0,063).

На дендрограмме (рис. 2) базальная ветвь была образована образцом 16 (к-986, Приморский край). Отдельные ветви формировали также образцы 21 (к-10476, Таджикистан) и 14 (к-2881, Китай) вместе с 17 (к-3590, Приморский край). Дистальное положение данных образцов на дендрограмме соответствует расположению на плоскости графика PCoA (анализ основных координат) (рис. 3). Остальные образцы проса на дендрограмме кластеризовались в две группы: первая включала образцы 7 (к-10326), 8 (к-10377), 9 (к-10378), 10 (к-10196),

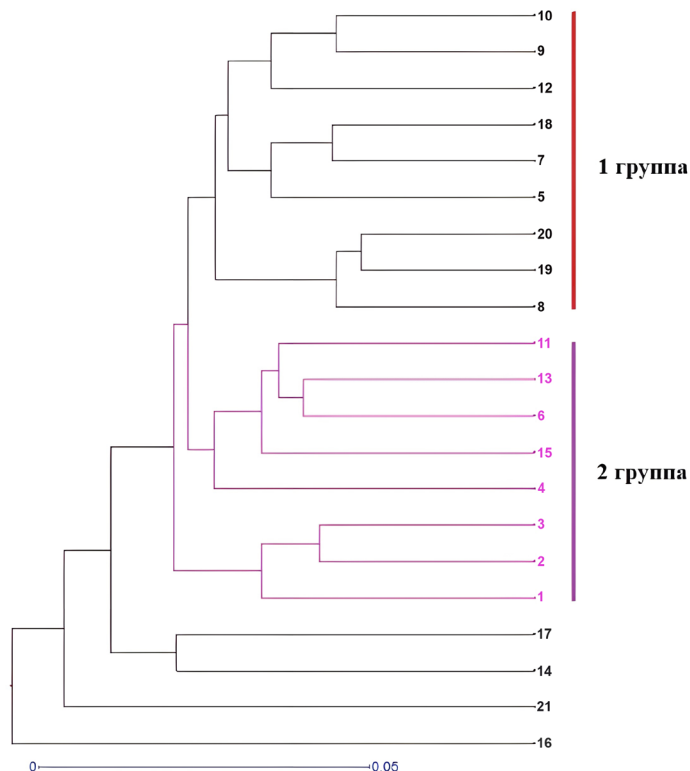


Рис. 2. Генетические отношения между 21 образцом проса посевного. UPGMA-дендрограмма, созданная на основе ISSR-данных

Fig. 2. UPGMA dendrogram generated on the basis of GD data formed by using 8 ISSR markers, showing the relationships among the studied millet accessions

Таблица 4. Матрица попарных генетических расстояний Нея у образцов *Panicum miliaceum* L.
Table 4. Pairwise matrix of Nei's genetic distance in *Panicum miliaceum* L. accessions

Образцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
2	0,072																				
3	0,094	0,065																			
4	0,129	0,111	0,069																		
5	0,116	0,098	0,109	0,111																	
6	0,096	0,099	0,099	0,082	0,089																
7	0,112	0,127	0,127	0,118	0,083	0,106															
8	0,079	0,094	0,105	0,118	0,116	0,085	0,101														
9	0,116	0,120	0,109	0,122	0,087	0,068	0,072	0,072													
10	0,122	0,126	0,093	0,128	0,093	0,095	0,133	0,111	0,060												
11	0,115	0,075	0,129	0,120	0,097	0,078	0,093	0,082	0,065	0,114											
12	0,106	0,110	0,099	0,112	0,088	0,101	0,095	0,073	0,066	0,094	0,098										
13	0,126	0,078	0,119	0,091	0,109	0,070	0,126	0,116	0,109	0,125	0,077	0,120									
14	0,168	0,136	0,159	0,149	0,102	0,148	0,133	0,133	0,136	0,154	0,112	0,138	0,124								
15	0,133	0,104	0,126	0,096	0,093	0,074	0,067	0,100	0,082	0,132	0,081	0,116	0,094	0,154							
16	0,157	0,149	0,160	0,129	0,182	0,149	0,169	0,146	0,171	0,211	0,137	0,151	0,126	0,168	0,167						
17	0,135	0,103	0,126	0,140	0,092	0,138	0,111	0,099	0,115	0,133	0,091	0,128	0,137	0,108	0,110	0,135					
18	0,128	0,121	0,110	0,112	0,077	0,111	0,061	0,095	0,077	0,105	0,087	0,100	0,110	0,103	0,094	0,151	0,105				
19	0,103	0,107	0,130	0,143	0,119	0,109	0,080	0,057	0,085	0,136	0,073	0,086	0,140	0,148	0,102	0,161	0,102	0,086			
20	0,109	0,112	0,112	0,148	0,101	0,103	0,097	0,063	0,079	0,119	0,089	0,091	0,134	0,141	0,130	0,154	0,107	0,068	0,053		
21	0,174	0,166	0,154	0,167	0,120	0,165	0,128	0,128	0,120	0,126	0,130	0,098	0,174	0,150	0,172	0,186	0,139	0,098	0,119	0,089	

Factorial analysis: (Axes 1 / 2)

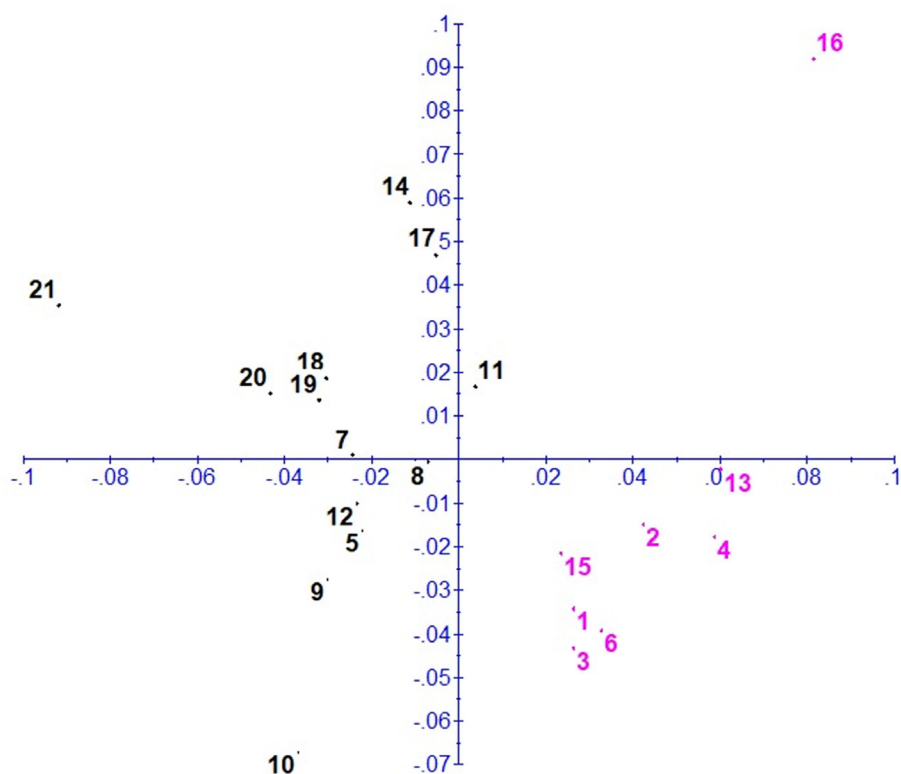


Рис. 3. График анализа основных координат (PCoA) по данным ISSR-анализа 21 образца *Panicum miliaceum* L., сгенерированная программой DARwin

Fig. 3. Graph of the Principal Coordinate Analysis (PCoA) according to the ISSR analysis of 21 *Panicum miliaceum* L. accessions, generated by the DARwin software

12 (к-10311) из Орловской области, 5 (к-10343, Саратовская обл.), 18 (к-3180, Тува), 20 (к-10475, Таджикистан), 19 (к-10458, Беларусь); вторая – 3 (к-10344) и 4 (к-10211) из Саратовской обл., 1 (к-10215) и 2 (к-10483) из Самарской обл., 6 (к-10374, Орловская обл.) и 13 (к-507, Китай), 11 (к-10323, Орловская обл.), 15 (к-919, Приморский край).

График PCoA (см. рис. 3) также выявил достаточный полиморфизм образцов 21 и 16 и формирование двух дисперсных групп. При этом образец 16, формирующий отдельную ветвь на дендрограмме, расположен дальше остальных, в то время как три других образца (21, 17 и 14) локализируются ближе к образцам 1 группы (см. рис. 2, 3).

В целом кластеризация анализируемых образцов *P. miliaceum* и на дендрограмме, и на графике PCoA не выявила группировки по районам происхождения. Ранее при анализе геномной варибельности также показано отсутствие кластеризации (за исключением двух образцов) у 16 образцов проса посевного, собранных на различных высотах в Гималаях (Trivedi et al., 2015). Аналогично ISSR- и RAPD-маркирование 15 образцов проса из Кореи тоже не выявило группировки образцов из одного места произрастания, несмотря на их достаточно близкую локализацию, в отличие от образцов данного исследования (Ghimire et al., 2019). Однако в работе В. К. Ghimire et al. (2019) была показана группировка образцов со сходными признаками, такими как количество и ориентация листьев, время цветения, диаметр стебля.

Выводы

Таким образом, использование метода ISSR-маркирования с отобранными праймерами позволило генотипировать 21 образец *P. miliaceum*. Праймеры M2, M11, UBC841, UBC844 могут быть рекомендованы для определения характеристик варибельности генома образцов, представленных в коллекциях генбанков. Генетическое разнообразие образцов проса, оцениваемое в настоящем исследовании, в сочетании с агрономическими и морфологическими характеристиками может быть использовано в селекционных программах для подбора родительских форм при селекции новых сортов.

References / Литература

- Agarwal M., Shrivastava N., Padh H. Advances in molecular marker techniques and their replications in plant sciences. *Plant Cell Reports*. 2008;27(4):617-631. DOI: 10.1007/s00299-008-0507-z
- Ajithkumar I.P., Panneerselvam R. Analysis of intra specific variation in *Setaria italica* (L.) P. Beauv landraces using RAPD and ISSR markers. *International Journal of Research in Biochemistry and Biophysics*. 2013;3(2):15-20.
- Amiryousefi A., Hyvönen J., Poczai P. iMEC: Online marker efficiency calculator. *Applications in Plant Sciences*. 2018;6(6):e01159. DOI: 10.1002/aps3.1159
- Awika J.M. Major cereal grains production and use around the world. In: J.M. Awika, V. Piironen, S. Bean (eds). *Advances in*

- Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion*. Washington DC: American Chemical Society; 2011. p.1-13. DOI: 10.1021/bk-2011-1089.ch001
- Botstein D., White R.L., Skolnick M., Davis R.W. Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms. *American Journal of Human Genetics*. 1980;32(3):314-331.
- Chesnokov Yu.V., Artemyeva A.M. Evaluation of the measure of polymorphism information of genetic diversity. *Agricultural Biology*. 2015;50(5):571-578. DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.571eng
- Cho Y.I., Chung J.W., Lee G.A., Ma K.H., Dixit A., Gwag J.G. et al. Development and characterization of twenty-five new polymorphic microsatellite markers in proso millet (*Panicum miliaceum* L.). *Genes and Genomics*. 2010;32(3):267-273. DOI: 10.1007/s13258-010-0007-8
- Colosi J.C., Schaal B.A. Wild proso millet (*Panicum miliaceum*) is genetically variable and distinct from crop varieties of proso millet. *Weed Science*. 1997;45(4):509-518. DOI: 10.1017/s0043174500088743
- Cui C., Li Y., Liu Y., Li X., Luo S., Zhang Z. et al. Determination of genetic diversity among *Saccharina* germplasm using ISSR and RAPD markers. *Comptes Rendus Biologies*. 2017;340(2):76-86. DOI: 10.1016/j.crvi.2016.11.005
- Das S., Khound R., Santra M., Santra D.K. Beyond bird seed: proso millet for human health and environment. *Agriculture*. 2019;9(3):64. DOI: 10.3390/agriculture9030064
- Elshire R.J.; Glaubitz J.C.; Sun Q.; Poland J.A.; Kawamoto K.; Buckler E.S. et al. A robust, simple genotyping-by-sequencing (GBS) approach for high diversity species. *PLoS One*. 2011;6(5):e19379. DOI: 10.1371/journal.pone.0019379
- FAO Statistical Yearbook. World Food and Agriculture 2022. Rome: FAO; 2022. Available from: <https://www.fao.org/3/cc221en/online/cc221en.html> [accessed Apr. 12, 2023].
- Filyushin M.A., Shchennikova A.V., Kochieva E.Z. Antocyanidin-3-O-glucosyltransferase genes in pepper (*Capsicum* spp.) and their role in anthocyanine biosynthesis. *Russian Journal of Genetics*. 2023;59(5):517-529. [in Russian] (Филушин М.А., Щенникова А.В., Кочиева Е.З. Характеристика генов антоцианидин-3-О-глюкозилтрансфераз перца (*Capsicum* spp.) и их роль в биосинтезе антоцианов. *Генетика*. 2023;59(5):517-529). DOI: 10.31857/S0016675823050041
- Ghimire B.K., Yu C.Y., Kim S.H., Chung I.M. Diversity in accessions of *Panicum miliaceum* L. based on agro-morphological, antioxidative, and genetic traits. *Molecules*. 2019;24(6):1012. DOI: 10.3390/molecules24061012
- Habiyaremye C., Matanguihan J.B., D'Alpoim Guedes J., Ganjyal G.M., Whiteman M.R., Kidwell K.K. et al. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) and its potential for cultivation in the Pacific Northwest, U.S.: a review. *Frontiers in Plant Science*. 2017;7:1961. DOI: 10.3389/fpls.2016.01961
- Hunt H.V., Linden M.V., Liu X., Motuzaite-Matuzeviciute G., Colledge S., Jones M.K. Millets across Eurasia: chronology and context of early records of the genera *Panicum* and *Setaria* from archaeological sites in the Old World. *Vegetation History and Archaeobotany*. 2008;17 Suppl 1):5-18. DOI: 10.1007/s00334-008-0187-1
- Kalinova J.P., Tříska J., Horejší K. Comparison of the main constituents in two varieties of proso millet using GC-MS. *Foods*. 2023;12(12):2294. DOI: 10.3390/foods12122294
- Karam D., Westra P., Nissen S.J., Ward S.M.; Figueiredo J.E.F. Genetic diversity among proso millet (*Panicum miliaceum*) biotypes assessed by AFLP technique. *Planta Daninha*. 2004;22(2):167-174. DOI: 10.1590/S0100-83582004000200001
- Kulemina T.V., Khoreva V.I., Shelenga T.V., Kurtseva A.F., Sidorenko V.S. The grain quality of milletlike cultures in conditions of the south Nonblack Earth Zone of Russia. *Agrarian Russia*. 2010;(1):19-23. [in Russian] (Кулемина Т.В., Хорева В.И., Шеленга Т.В., Курцева А.Ф., Сидоренко В.С. Биохимические показатели качества зерна просовидных культур в условиях юга Нечерноземной зоны РФ. *Аграрная Россия*. 2010;(1):19-23). DOI: 10.30906/1999-5636-2010-1-19-23
- 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
- Lu H., Zhang J., Liu K.B., Wu N., Li Y., Zhou K. et al. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009;106(18):7367-72. DOI: 10.1073/pnas.0900158106
- M'Ribu H.K., Hilu K.W. Detection of interspecific and intraspecific variation in *Panicum* millets through random amplified polymorphic DNA. *Theoretical and Applied Genetics*. 1994;88(3-4):412-416. DOI: 10.1007/BF00223653
- Narciso J.O., Nyström L. The genetic diversity and nutritional quality of proso millet (*Panicum miliaceum*) and its Philippine ecotype, the ancient grain "kabog millet": a review. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;11(2):100499. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100499
- Powell W., Morgante M., Andre C., Hanafey M., Vogel J., Tingey S. et al. The comparison of RFLP, RAPD, AFLP and SSR (microsatellite) markers for germplasm analysis. *Molecular Breeding*. 1996;2(3):225-238. DOI: 10.1007/BF00564200
- Prevost A., Wilkinson M.J. A new system of comparing PCR primers applied to ISSR fingerprinting of potato cultivars. *Theoretical and Applied Genetics*. 1999;98(1):107-112. DOI: 10.1007/s001220051046
- Rajasekaran R., Francis N. Genetic and genomic resources for improving proso millet (*Panicum miliaceum* L.): a potential crop for food and nutritional security. *The Nucleus*. 2020;64(1):21-32. DOI: 10.1007/s13237-020-00331-2
- Reddy M.P., Sarla N., Siddiq E.A. Inter simple sequence repeat (ISSR) polymorphism and its application in plant breeding. *Euphytica*. 2002;128(1):9-17. DOI: 10.1023/A:1020691618797
- Saha D., Gowda V.C., Arya L., Verma M., Bansal K.C. Genetic and genomic resources of small millets. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2016;35(1):56-79. DOI: 10.1080/07352689.2016.1147907
- Serrote C.M.L., Reiniger L.R.S., Silva K.B., dos Santos Rabaioli S.M., Stefanel C.M. Determining the polymorphism information content of a molecular marker. *Gene*. 2020;726(1):144175. DOI: 10.1016/j.gene.2019.144175
- Souza C.P.F., Ferreira C., de Souza E.H., Neto A.R.S., Marconcini J.M., da Silva Ledo C.A. et al. Genetic diversity and ISSR marker association with the quality of pineapple fiber for use in industry. *Industrial Crops and Products*. 2017;104:263-268. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.04.059
- Sridhar R., Lakshminarayana G. Contents of total and lipid classes and composition of fatty acids in small millets: fox-tail (*Setaria italica*), proso (*Panicum miliaceum*), and finger (*Eleusine coracana*). *Cereal Chemistry*. 1994;71(4):355-359.
- Tessier C., David J.L., Tis P., Boursiquot J.M., Charrier A. Optimization of the choice of molecular markers for varietal identification in *Vitis vinifera* L. *Theoretical and Applied Genetics*. 1999;98(1):171-177. DOI: 10.1007/s001220051054

- Trivedi A.K., Arya L., Verma M., Verma S.K., Tyagi R.K., Heman-taranjan A. Genetic variability in proso millet (*Panicum miliaceum*) germplasm of Central Himalayan Region based on morpho-physiological traits and molecular markers. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2015;37(2):23. DOI: 10.1007/s11738-014-1770-y
- Varshney R.K., Chabane K., Hendre P.S., Aggarwal R.K., Graner A. Comparative assessment of EST-SSR, EST-SNP and AFLP markers for evaluation of genetic diversity and conservation of genetic resources using wild, cultivated and elite barleys. *Plant Science*. 2007;173(6):638-649. DOI: 10.1016/j.plantsci.2007.08.010
- Zhang Y., Yan H., Jiang X., Wang X., Huang L., Xu B. et al. Genetic variation, population structure and linkage disequilibrium in switchgrass with ISSR, SCoT and EST-SSR markers. *Hereditas*. 2016;153(1):4. DOI: 10.1186/s41065-016-0007-z

Информация об авторах

Дженет Хазреталиевна Архестова, младший научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, 360002 Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, khavpacheva.dzhenet@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1239-3641>

Алена Аслановна Яхутлова, младший научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, alena.khakunova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4104-4349>

Алий-Бек Данильбекович Хаудов, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, 360002 Россия, Нальчик, ул. Балкарова, 2, научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, aliy-beck@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5187-3229>

Лариса Хасеновна Сокурова, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Институт сельского хозяйства – филиал КБНЦ РАН, 360004 Россия, Нальчик, ул. Кирова, 224, kbniish2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2352-8057>

Татьяна Владимировна Кулемина, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, kkk@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5069-7390>

Information about the authors

Dzhenet Kh. Arkhestova, Associate Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2 Balkarova St., Nalchik 360002, Russia, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, khavpacheva.dzhenet@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1239-3641>

Alena A. Yakhutlova, Associate Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, alena.khakunova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-4104-4349>

Aliy-beck D. Khaudov, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2 Balkarova St., Nalchik 360002, Russia, Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, aliy-beck@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5187-3229>

Larisa Kh. Sokurova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Agriculture, branch of the KBSC RAS, 224 Kirova St., Nalchik 360004, Russia, kbniish2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2352-8057>

Tatiana V. Kulemina, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kkk@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5069-7390>

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 07.09.2023; одобрена после рецензирования 01.12.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 07.09.2023; approved after reviewing on 01.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 631.21:632:526
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-172-183



Устойчивость листьев и клубней диких видов картофеля к *Phytophthora infestans* и взаимосвязь этих признаков

Н. М. Зотеева, Е. А. Пороховинова, Д. А. Фатеев, Н. А. Чалая

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

Автор, ответственный за переписку: Надежда Мубаровна Зотеева, nzoteyeva@gmail.com

Актуальность. *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary – широко известный злостный патоген, поражающий целый ряд выращиваемых в настоящее время сортов картофеля. Меры защиты, включая селекционный процесс, усложняет то, что устойчивость листьев к *P. infestans* часто не связана с устойчивостью клубней, что приводит к необходимости выделения индивидуальных растений с устойчивостью листьев и/или клубней для привлечения в гибридизацию. В связи с этим исследование, посвященное выявлению таких источников устойчивости, является весьма актуальным. Целью работы был анализ связи признаков устойчивости листьев и клубней у диких видов картофеля, а также поиск видов, у которых встречаемость образцов с устойчивостью обоих органов достаточно высока.

Материалы и методы. Методами искусственного заражения оценили устойчивость листьев и клубней 97 образцов 36 видов картофеля. Для статистического анализа взаимосвязи устойчивости листьев и клубней с учетом данных, полученных для каждого индивидуального растения, использовали критерий парных сравнений Вилкоксона (Wilcoxon matched-pairs test) и коэффициент корреляции Спирмана.

Результаты. В изученной выборке образцов определены виды картофеля с высокой частотой растений, у которых устойчивы к болезни листья, и клубни, а также виды, для которых характерно преобладание растений с устойчивостью либо листьев, либо клубней. Статистический анализ не показал 100-процентной корреляции между устойчивостью листьев и клубней ни у одного из изученных видов. У части из них выявлена значимая положительная либо отрицательная корреляция двух признаков. Данные оценки образцов/видов могут облегчить поиск источников устойчивости листьев и/или клубней для улучшения восприимчивых к фитофторозу сортов.

Ключевые слова: виды *Solanum*, фитофтороз, устойчивость, листья, клубни, встречаемость фенотипов

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по теме № 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». Оценка устойчивости к фитофторозу части образцов картофеля в период с 1998 по 2000 г. проведена при поддержке проекта по защите от фитофтороза СЕЕМ (Cornell-Eastern Europe-Mexico). Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Зотеева Н.М., Пороховинова Е.А., Фатеев Д.А., Чалая Н.А. Устойчивость листьев и клубней диких видов картофеля к *Phytophthora infestans* и взаимосвязь этих признаков. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):172-183. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-172-183

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-172-183

Leaf and tuber resistance to *Phytophthora infestans* and relationship between these traits in wild potato species

Nadezhda M. Zoteyeva, Elizaveta A. Porokhvinova, Dmitrii A. Fateev, Nadezhda A. Chalaya

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

Corresponding author: Nadezhda M. Zoteyeva, nzoteyeva@gmail.com

Background. *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary is a well-known serious pathogen that affects a wide range of currently grown potato cultivars. Control of the disease, including the breeding process, is complicated by the fact that leaf resistance to *P. infestans* is often unrelated to tuber resistance, resulting in the need to identify individual plants with leaf and/or tuber resistance to be used in breeding programs. In view of this, research efforts to identify such sources are quite relevant. The objective was to assess the occurrence of plants with resistance in both organs among different wild species and analyze the relationship between leaf and tuber resistance within them.

Material and methods. Assessment of leaf and tuber resistance in 97 accessions belonging to 36 species was carried out under artificial inoculation. Using the data obtained on each individual plant, the connection between leaf and tuber resistance was analyzed by means of the Wilcoxon matched-pairs test and Spearman's rank-order correlations.

Results. The species with more frequent occurrence of plants combining leaf and tuber resistance and the species with the predominance of leaf or tuber resistance were identified. The statistical analysis did not show complete (100%) correlations between leaf and tuber resistance in any of studied species. In some cases, a significant positive or negative correlation between these characters was found. The assessment results for the studied species/accessions can facilitate the search for leaf and/or tuber resistance sources capable of improving potato cultivars susceptible to late blight.

Keywords: *Solanum* spp., late blight, resistance, leaves, tubers, occurrence of phenotypes

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 assessment of a part of the potato accessions carried out in 1998–2000 was funded by the CEEM (Cornell-Eastern Europe-Mexico) Project on Late Blight Control.

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

For citation: Zoteyeva N.M., Porokhvinova E.A., Fateev D.A., Chalaya N.A. Leaf and tuber resistance to *Phytophthora infestans* and relationship between these traits in wild potato species. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):172-183. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-172-183

Введение

Phytophthora infestans (Mont.) de Bary – широко известный злостный патоген, способный поражать как ботву, так и клубни картофеля, наносящий большой экономический ущерб (Haverkort et al., 2009). Со времени эпидемии фитофтороза, вызвавшей голод в Ирландии в 1845–1847 гг. (Ristaino, 2002), немалые усилия селекционеров были направлены на выведение устойчивых к болезни сортов. К настоящему времени количество устойчивых сортов все еще недостаточно велико. Рекомбинация генов, связанная с половым процессом воспроизводства *P. infestans*, способствует широкому разнообразию расового состава популяций патогена (Cooke et al., 2011; Elansky et al., 2017; Runno-Paurson et al., 2022).

Меры защиты, включая селекционный процесс, усложняет то, что устойчивость листьев к *P. infestans* часто не связана с устойчивостью клубней (Kirk et al., 2001), хотя и сообщалось о корреляции устойчивости клубней и листьев (Stewart et al., 1994; Park et al., 2005; Bradshaw et al., 2006). Как правило, устойчивость к фитофторозу листьев и клубней обусловлена одним и тем же геном *Rpi* (Park et al., 2005; Bradshaw et al., 2006). В то же время показано, что транскрипты клубней и листьев резко различаются – большинство дифференциально экспрессирующихся генов не являются общими для листьев и клубней (Gao, Bradee, 2016).

Среди видов картофеля ведется постоянный поиск новых источников устойчивости (Karki et al., 2021). Прежде чем приступить к работе по интрогрессии аллелей устойчивости в чувствительный к болезни материал, необходимо оценить по возможности большее число видов и образцов различного происхождения. Это позволит выявить новые источники как потенциально ожидаемых, так и еще не идентифицированных аллелей устойчивости. Список идентифицированных аллелей постоянно пополняется (Jones et al., 2009; Verzaux et al., 2011, 2012; Sliwka et al., 2012; Tiwari et al., 2014). Весомым аргументом в пользу включения диких видов в селекционные программы является высокая устойчивость к фитофторозу, часто обусловленная наличием в одном генотипе нескольких генов *Rpi* (Zoteyeva et al., 2017), а также устойчивостью к другим вредным организмам (Chalaya et al., 2012; Zoteyeva et al., 2012, 2020; Radchenko, 2017). Выявленный широкий внутривидовой и внутривидовой полиморфизм по устойчивости к фитофторозу у большинства видов (Zoteyeva, 2019) приводит к необходимости выделения индивидуальных устойчивых растений для привлечения их в гибридизацию. Для осуществления целенаправленного селекционного процесса необходимо иметь данные по устойчивости листьев и клубней видов *Solanum L.*, полученных в фитопатологических опытах.

Цель исследований – изучение устойчивости к фитофторозу образцов разных клубненосных видов *Solanum*. На основе этих данных было необходимо выявить виды, среди которых наиболее часто встречаются растения с устойчивостью листьев и клубней, а также проследить связь этих признаков.

Материал и методы

Растительный материал.

Использованный в работе материал представлен образцами диких видов картофеля из коллекции ВИР (табл. 1). Анализировали устойчивость листьев и клуб-

ней 97 образцов 36 видов картофеля, относящихся к восьми таксономическим сериям согласно классификации Д. Хокса (Hawkes, 1990). Среди них – образцы 7 видов, которые поддерживаются в горшечной культуре (клоновая репродукция), 32 вида были представлены популяциями семянцев, а у образцов 9 видов оценивали и клубневую репродукцию, и семена.

Работу проводили на научно-производственной базе «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (ППЛ ВИР) в 1996–1997 гг., 2016 г. и 2021–2022 гг. В период с 1998 по 2000 г. работу осуществляли в отделении Института селекции и акклиматизации растений в Млохове (IHAR-Mlochow), Польша. Исследования в IHAR-Mlochow имели своей целью дать общую характеристику образцов по устойчивости к фитофторозу. В данной работе проведен статистический анализ связи устойчивости листьев и клубней с использованием данных, полученных для каждого индивидуального растения.

Инфекционный материал.

Использованы следующие изоляты *P. infestans*: смесь двух изолятов с генами вирулентности 1.2.3.4.6.7.8.10.11. и 1.3.4.5.7.8.10.11., выделенных из местной (ППЛ ВИР) популяции патогена в 1996–1998 гг.; изолят MP324 (1.2.3.4.5.7.8.10.11.) из коллекции IHAR-Mlochow в опытах с 1998 по 2000 г.; широко применяемый изолят 88069 (Bubolz et al., 2022), полученный от R. Vetukuri из SLU (Swedish University of Agricultural Sciences) – им оценены две популяции образцов *S. berthaultii* и *S. spegazzinii* в 2016 г.; высокоагрессивный изолят NZ-3-20, выделенный из местной (ППЛ ВИР) популяции *P. infestans* в опытах 2021 и 2022 г.

Оценка устойчивости образцов при искусственном заражении.

Устойчивость оценивали в двух независимых опытах при инокулировании отделенных долей листьев согласно методике, описанной Х. Зажицкой (Zarzycka, 2001). Устойчивость клубней оценивали, используя метод Зотеевой и Зимнох-Гузовской (Zoteyeva, Zimnoch-Guzowska, 2004). Развитие симптомов болезни на листьях и клубнях оценивали с помощью шкалы от 1 до 9 баллов, где балл 9 – отсутствие симптомов болезни, балл 1 – от 95 до 100% площади поражения мякоти клубня. Исходя из среднего балла оценки, устойчивыми считали растения, поражение которых составляло от 9 до 6 баллов, восприимчивыми – от 5 до 1.

Опыты проводили в присутствии устойчивых и чувствительных контролей: при **заражении листьев** – сорта 'Зарево', 'Aluette', 'Meduza' (устойчивые), 'Приекульский Ранний', 'Петербургский', 'Irys', 'Desirée' и 'Red Scarlet' (неустойчивые); при **заражении клубней** – сорта 'Невский', 'Гауя', 'Meduza', 'Aluette' (устойчивые); 'Freika', 'Sante', 'Irys', 'Sokół', 'Desirée' и 'Dorisa' (неустойчивые).

Математическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica 7.0 (StatSoft..., 2013). Использовали как балловую, так и бинарную оценку. При бинарной оценке все растения с баллом поражения от 9 до 6 считали устойчивыми, а все растения с баллом поражения от 5 до 1 – восприимчивыми.

Для сравнения устойчивости листьев и клубней картофеля к фитофторозу использовали критерий парных сравнений Вилкоксона (Wilcoxon matched-pairs test). Этот тест представляет собой непараметрическую альтернативу t-критерия для зависимых выборок. Для изучения корреляции устойчивости листьев и клубней использовали коэффициент корреляции Спирмана (Nasledov, 2012).

Таблица 1. Растительный материал, использованный в работе
Table 1. Plant material used in the experiments

Вид (аббревиатура вида) / Species (abbreviation)	Изучено / Studied number of		Вид (аббревиатура вида) / Species (abbreviation)	Изучено / Studied number of	
	образцов / accessions	растений / plants		образцов / accessions	растений / plants
Южноамериканские виды / South American species			Серия <i>Yungazensa</i> Corr.		
Серия <i>Acaulia</i> Juz.			<i>S. angustisectum</i> Hassl. (ang)	1	18
<i>S. acaule</i> Bitt. (acl)	2	32	<i>S. chacoense</i> Bitt. (chc)	2	13
Серия <i>Tuberosa</i> (Rydb.) Hawk.			<i>S. dolichostigma</i> Juz. et Buk. (syn. chc)	1	6
<i>S. ambosinum</i> Ochoa (amb)	1	24	<i>S. garsiae</i> Juz. et Buk. (syn. chc)	1	6
<i>S. × arrac-papa</i> Juz. ex Rybin. (arp)	1	30	<i>S. parodii</i> Juz. et Buk. (syn. chc)	1	13
<i>S. berthaultii</i> Hawkes (ber)	2	106	Центральноамериканские виды / Central American species		
<i>S. hoopesii</i> Hawkes et Okada (hps)	1	8	Серия <i>Bulbocastana</i> (Rydb.) Hawk.		
<i>S. kurtzianum</i> Bitt. et Wittm. (ktz)	5	68	<i>S. bulbocastanum</i> Dun. (blb)	1	8
<i>S. leptophyes</i> Bitt. (lph)	1	30	Серия <i>Demissa</i> Lindl.		
<i>S. microdontum</i> Bitt. (mcd)	1	24	<i>S. demissum</i> Lindl. (dms)	3	42
<i>S. molinae</i> Juz. (mln)	1	8	Серия <i>Longipedicellata</i> Buk.		
<i>S. multidissectum</i> Hawkes (mds)	1	30	<i>S. polytrichon</i> Rydb. (plt)	10	200
<i>S. okadae</i> Hawkes et Hjerting (okd)	1	8	<i>S. stoloniferum</i> Schlechtd. (sto)	2	34
<i>S. parvicorollatum</i> Lechn. (prv)	1	8	<i>S. neoantipoviczii</i> Buk. (nan, syn. sto)	1	40
<i>S. × ruiz-ceballosii</i> Card. (rzc)	2	82	<i>S. papita</i> Rydb. (pta)	4	71
<i>S. simplicifolium</i> Bitt. (sim)	2	44	Серия <i>Pinnatisecta</i> (Rydb.) Hawk.		
<i>S. sparsipilum</i> Bitt. (spl)	2	39	<i>S. brachistotrichum</i> (Bitt.) Rydb. (bst)	1	12
<i>S. spegazinii</i> Bitt. (spg)	8	244	<i>S. cardiophyllum</i> Lindl. (cdp)	14	219
<i>S. × sucrense</i> Hawkes (scr)	1	16	<i>S. pinnatisectum</i> Dun. (pnt)	9	286
<i>S. verrucosum</i> Schlechtd. (ver)	7	91	<i>S. × sambucinum</i> Rydb. (sam)	1	8
<i>S. virgultorum</i> (Bitter) Card. et Hawkes (vrg)	1	24	<i>S. stenophyllidium</i> Bitt. (stp)	3	24
			Серия <i>Polyadenia</i> Buk. ex Corr.		
			<i>S. polyadenium</i> Greenm. (pld)	1	6

Результаты

В опытах разных лет непрерывно репродуцируемые клубнями образцы, которые изучали в несколько сроков (табл. 2), были сходны по уровню устойчивости. Различия отмечены только для образцов, которые в процессе их поддержания не сформировали клубни и были восстановлены пересевом семян. Вследствие гетерогенности по устойчивости, характерной для большинства видов, отобранные для поддержания сеянцы могли иметь другой уровень устойчивости.

Наибольшая встречаемость образцов с устойчивостью листьев и клубней отмечена у центральноамериканских видов *S. cardiophyllum* и *S. pinnatisectum*, принадлежащих к серии *Pinnatisecta*. В то же время выявлены образцы *S. cardiophyllum* с чувствительными к болезни листьями и клубнями. В пределах этой серии устойчивостью листьев и клубней характеризовались растения *S. × sambucinum*, чувствительностью – *S. stenophyllidium*. Устойчивые листья и клубни имеет образец *S. bulbocastanum*. Образцы южноамериканских видов *S. okadae* и *S. hoopesii* с высокой устойчивостью листьев проявляли чув-

Таблица 2. Устойчивость листьев и клубней к фитофторозу образцов диких видов картофеля, поддерживаемых клонами**Table 2. Leaf and tuber resistance to late blight in wild potato species accessions maintained by clones**

Вид / Species	№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Период изучения / Period of the experiment	Устойчивость, балл / Resistance, score	Вид / Species	№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Период изучения / Period of the experiment	Устойчивость, балл / Resistance, score
			средняя (min - max) листьев / клубней/ average (min - max) leaf / tuber				средняя (min - max) листьев / клубней/ average (min - max) leaf / tuber
Южноамериканские виды / South American species							
ber	23047	B	5,4 (3,0–9,0)	spg	12208	B	5,6 (5,0–6,0)
			5,9 (3,0–9,0)				6,8 (6,0–7,0)
chc	22598	A	4,0 (3,0–5,0)	spg	12500	B	4,6 (4,0–5,0)
			6,2 (6,0–7,0)				7,0 (6,0–8,0)
hps	24578	C	6,9 (5,0–9,0)	spg	12628	A	3,8 (3,0–4,0)
			4,3 (4,0–5,0)				4,6 (4,0–5,0)
mln	25040	C	1,3 (1,0–2,0)	spg	12628	B	4,0 (3,0–5,0)
			2,0 (1,0–3,0)				5,8 (5,0–7,0)
okd	25396	C	8,7 (8,0–9,0)	spg	18420	B	5,0 (4,0–6,0)
			3,0 (2,0–4,0)				6,6 (6,0–7,0)
spg	9746	A	2,6 (2,0–3,0)	spg	20999	A	4,9 (4,0–6,0)
			5,9 (5,0–6,0)				6,9 (6,0–7,0)
spg	9746	B	2,0 (1,0–3,0)	spg	20999	B	5,0 (4,0–6,0)
			5,5 (5,0–7,0)				6,4 (6,0–7,0)
spg	12208	A	5,4 (5,0–6,0)	spg	21000	B	2,4 (1,0–3,0)
			7,2 (7,0–9,0)				5,2 (5,0–6,0)
Центральноамериканские виды / Central American species							
blb	24866-1	C	8,8 (8,0–9,0)	cdp	21302	C	4,8 (4,0–6,0)
			8,0 (7,0–8,0)				7,8 (7,0–8,0)
bst	23198	A	6,3 (6,0–7,0)	cdp	23276	A	1,3 (1,0–2,0)
			4,3 (4,0–6,0)				4,1 (4,0–5,0)
cdp	3319	C	9,0 (9,0–9,0)	cdp	24375	C	8,6 (8,0–9,0)
			9,0 (9,0–9,0)				6,9 (6,0–9,0)
cdp	10456	A	4,8 (5,0–6,0)	pnt	4455	A	6,5 (6,0–7,0)
			3,3 (2,0–4,0)				7,7 (6,0–9,0)
cdp	10456	C	4,1 (4,0–5,0)	pnt	4455	B	6,9 (6,0–7,0)
			3,1 (2,0–4,0)				8,5 (7,0–9,0)
cdp	10457	A	3,2 (3,0–4,0)	pnt	19158	A	8,6 (7,0–9,0)
			4,2 (4,0–5,0)				6,0 (5,0–7,0)
cdp	18085	A	3,0 (3,0–3,0)	pnt	21955	A	7,1 (7,0–8,0)
			6,2 (6,0–7,0)				8,3 (7,0–9,0)
cdp	18224	A	6,0 (6,0–6,0)	pnt	21955	B	7,0 (7,0–7,0)
			7,1 (7,0–8,0)				8,0 (7,0–9,0)

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

Вид / Species	№ по-каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Период изучения / Period of the experiment	Устойчивость, балл / Resistance, score	Вид / Species	№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Период изучения / Period of the experiment	Устойчивость, балл / Resistance, score
			средняя (min - max) листьев / клубней/ average (min - max) leaf / tuber				средняя (min - max) листьев / клубней/ average (min - max) leaf / tuber
Центральноамериканские виды / Central American species							
cdp	19061	A	1,2 (1,0–2,0) 3,2 (3,0–4,0)	pnt	23570	A	7,0 (7,0–7,0) 8,3 (7,0–9,0)
cdp	21300	A	4,0 (3,0–5,0) 4,6 (4,0–5,0)	pnt	24949	C	8,6 (7,0–9,0) 6,0 (5,0–7,0)
cdp	21302	A	5,8 (5,0–7,0) 7,0 (7,0–7,0)	pnt	24951-1	C	8,2 (7,0–9,0) 7,0 (6,0–9,0)
cdp	25359-2	C	7,8 (7,0–9,0) 9,0 (9,0–9,0)	pnt	24951-2	C	8,9 (8,0–9,0) 8,5 (8,0–9,0)
pld	24461	C	7,3 (7,0–9,0) 4,7 (4,0–5,0)	pnt	25403	C	8,6 (7,0–9,0) 5,8 (5,0–7,0)
plt	23559	B	3,0 (3,0–3,0) 2,7 (2,0–4,0)	pnt	25405	C	8,8 (9,0–8,0) 6,8 (6,0–7,0)
plt	23560	A	7,6 (7,0–9,0) 4,8 (4,0–6,0)	pnt	25407	C	9,0 (9,0–9,0) 5,5 (5,0–6,0)
plt	23560	B	8,2 (7,0–9,0) 5,2 (5,0–6,0)	sam	4216	C	9,0 (9,0–9,0) 9,0 (9,0–9,0)
plt	23561	A	6,5 (6,0–8,0) 3,3 (3,0–4,0)	sto	19200	A	7,8 (7,0–8,0) 4,2 (3,0–5,0)
plt	23561	B	7,3 (6,0–8,0) 3,0 (3,0–3,0)	sto	23660	A	7,0 (6,0–7,0) 4,3 (3,0–5,0)
plt	23558	A	4,4 (4,0–5,0) 4,8 (4,0–6,0)	stp	20105-1	C	1,9 (1,0–2,0) 2,4 (2,0–3,0)
plt	23559	A	2,8 (2,0–3,0) 2,4 (2,0–4,0)	stp	20105-2	C	1,3 (1,0–2,0) 7,0 (5,0–9,0)
stp	24962-1	C	2,6 (2,0–3,0) 5,0 (4,0–6,0)	ver	19378	A	7,6 (7,0–8,0) 3,4 (3,0–4,0)
ver	18954	A	4,4 (4,0–5,0) 5,9 (5,0–6,0)	ver	23017	A	4,0 (3,0–5,0) 5,9 (5,0–7,0)
ver	19230	A	7,6 (7,0–8,0) 2,5 (2,0–3,0)	ver	23758	A	7,3 (6,0–9,0) 4,9 (4,0–5,0)

Примечание: буквенные обозначения периодов изучения образцов клоновой репродукции:
A – 1996 и 1997 гг.; B – с 1998 по 2000 г.; C – 2021 и 2022г.

Note: periods of the experiments with clonal reproductions are designated with letters:
A (1996–1997.), B (1998–2000), and C (2021, 2022)

ствительность клубней. Преобладание растений с устойчивыми клубнями отмечено в популяциях южноамериканских видов *S. angustisectum*, *S. × arrac-papa*, *S. chacoense* и *S. kurtzianum*. В популяциях *S. berthaultii* к-23047 при использовании в опытах двух разных изолятов *P. infestans* отмечено расщепление по устойчивости на 4 группы растений – RR (с устойчивостью листьев и клубней), RS (с устойчивостью листьев, чувствительностью клубней), SR (с чувствительностью листьев и устойчивостью клубней) и SS (с чувствительностью листьев и клубней). При заражении изолятом 88069 в популяции, состоящей из 20 растений, распределение по устойчивости составило 4 RR : 3 RS : 7 SR : 6 SS. В опыте с использованием изолята MP324 распределение в популяции, состоявшей из 34 растений, было следующим: 8 RR : 10 RS : 6 SR : 10 SS. Результаты оценки с использованием разных изолятов *P. infestans* указывают на незначительные различия в распределении по устойчивости растений в популяциях высокополиморфного образца *S. berthaultii*. При этом сопряженность признаков у индивидуальных растений этого образца не достоверна (табл. 3). В целом у центральноамериканских видов отмечено преобладание образцов с устойчивостью листьев и чувствительностью клубней ($p \leq 0,05$) (рисунок).

Связь признаков (устойчивость листьев / устойчивость клубней) анализировали с использованием данных, полученных при заражении растений из популяций образцов, для чего семена распределяли в 4 группы. Таблица 3 включает данные по числу растений с одинаковым уровнем устойчивости листьев и клубней (RR, SS), с устойчивостью листьев и чувствительностью клубней (RS) и с устойчивостью клубней и чувствительностью листьев (SR).

На первом этапе с помощью критерия Вилкоксона сравнили степень поражения листьев и клубней. Для большинства видов (*S. acaule*, *S. ambosinum*, *S. angustisectum*, *S. × arrac-papa*, *S. kurtzianum*, *S. microdontum*, *S. parodii*, *S. chacoense*, *S. spegazzinii*, *S. brachistotrichum*, *S. demissum*, *S. pinnatisectum*, *S. polytrichon*, *S. stoloniferum*, *S. verrucosum*) было показано достоверное отличие степени поражения разных органов растений. У некоторых видов достоверные отличия, которые могли быть вызваны преобладанием устойчивых и/или восприимчивых растений, не выявлены: большое число как устойчивых, так и восприимчивых растений у видов *S. berthaultii*, *S. multidissectum*, *S. sparsipilum* и в серии *Tuberosa* в целом.

Преобладание восприимчивых растений отмечено у *S. chacoense*, *S. dolichostigma*, *S. garsiae*, *S. parodii*, *S. parvicorollatum*, *S. virgultorum*; преобладание растений с устойчивостью листьев и клубней – у *S. × sucrense*.

Для некоторых видов были получены неоднозначные результаты, так как только при одной из двух оценок (по 9-балловой и по бинарной шкалам) были показаны достоверные различия: у *S. simplicifolium*, *S. cardiophyllum* и *S. neoantipoviczii* была достоверна только балловая, а у *S. leptophyes*, *S. × ruiz-ceballosii* и *S. papita* – только бинарная оценка; у *S. simplicifolium* и *S. leptophyes* достоверность оценки была близка к пограничной (0,04 и 0,01 соответственно).

На втором этапе с помощью рангового критерия Спирмена оценивали корреляцию между поражением листьев и клубней.

У видов *S. × arrac-papa* и *S. stoloniferum* с достоверным отличием по критерию Вилкоксона была отмечена слабая негативная корреляция между поражением листьев и клубней как при бинарной, так и при балловой оценке

(–0,30, –0,38); у *S. verrucosum* – умеренная негативная при обеих оценках (–0,56, –0,64). У *S. papita* достоверные отличия по степени поражения были только при использовании бинарной оценки, однако отмечена слабая негативная корреляция (–0,26, –0,25) между поражением листьев и клубней при обеих оценках. Слабая, но достоверная негативная корреляция (–0,16) отмечена для серии *Longipedicellata* при бинарной оценке признаков. Таким образом, для этих видов, помимо достоверности отличий, существует тенденция к разнонаправленности, то есть чем слабее поражены листья, тем сильнее поражены клубни.

У *S. spegazzinii*, *S. demissum* и в серии *Yungazensa* выявлена умеренная (0,61) и слабая (0,31, 0,31) корреляции при балловой оценке. У *S. cardiophyllum* достоверные отличия по степени поражения были только при использовании балловой оценки: здесь показана слабая положительная корреляция между устойчивостью листьев и клубней (0,28). Таким образом, для этих видов, помимо достоверности отличий, существует тенденция к однонаправленности, то есть чем сильнее поражены листья, тем сильнее поражены и клубни. Следует отметить, что у *S. demissum* это чисто математическая зависимость, вызванная отсутствием растений с чувствительными листьями, не имеющая биологического смысла.

Для некоторых видов, где не выявлено достоверных различий по степени поражения листьев и клубней, показаны только положительные корреляции – у *S. multidissectum* она слабая (0,40) при бинарной и умеренная (0,64) при балловой оценке, у *S. parvicorollatum* – умеренная (0,67) при бинарной (из 10 растений отличия только у одного), а у *S. virgultorum* и *S. berthaultii* – средняя и умеренная при балловой (0,58 и 0,25). Таким образом, у этих видов листья и клубни поражались примерно в одинаковой степени, и для них существует тенденция к сходству степени поражения.

Обсуждение

Процесс селекции на устойчивость растений к вредным организмам включает оценку и отбор исходного материала. Дикие виды картофеля представляют собой ценный генофонд устойчивости к болезням, в том числе и к фитофторозу. Фитопатологическая оценка, проводимая в контролируемых условиях, дает представление об уровне устойчивости каждого растения к патогену. По результатам оценки всего растительного материала выявлена разная частота фенотипов с устойчивостью листьев и клубней как внутри видов, так и внутри образцов.

Ранее нами было изучено влияние генов *R1* и *R3a* от *S. demissum* на устойчивость клубней селекционных клонов картофеля к фитофторозу. Статистический анализ не выявил зависимости уровня устойчивости от наличия как гена *R1*, так и гена *R3a*, хотя было отмечено преобладание клонов с устойчивостью клубней, несущих аллель *R3a* (Zoteyeva et al., 2016). У девяти образцов южноамериканского *S. chacoense*, для которых характерно преобладание растений с устойчивыми клубнями, был обнаружен только один из семи использованных маркеров генов *Rpi* – *R3b R* (Rogozina et al., 2023).

Данные ряда исследований указывают, что на устойчивость растений картофеля к фитофторозу высокое влияние оказывают гены от *S. bulbocastanum* (Song et al., 2003; Wang et al., 2008). Среди образцов мексиканских видов из коллекции ВИР, относящихся к серии *Longipedicel-*

Таблица 3. Распределение (% растений) по устойчивости к фитофторозу листьев и клубней в популяциях диких видов картофеля, сходство реакции на заражение и коэффициенты корреляции признаков

Table 3. Distribution according to leaf and tuber resistance to late blight within the populations of wild potato species, similarities in the response to infection, and correlation coefficients of the characters

Вид / Species	Изучено растений / Studied numbers of plants		Процент популяций с устойчивыми листьями и клубнями / Percentage of populations with resistant leaves and tubers								Уровень значимости сходства поражения листьев и клубней по критерию Вилкоксона / Wilcoxon matched-pairs test <i>p</i> -levels				Ранговый коэффициент корреляции Спирмена / Spearman's rank-order correlations	
			LT		SR		SS		R/all, %		P		бинарная оценка / binary		балловая оценка / score	
			LT	RS	LT	SR	LT	SS	L	T	R/all, %	RR/all, %	бинарная оценка / binary	балловая оценка / score	бинарная оценка / binary	балловая оценка / score
Южноамериканские виды / South American species																
<i>S. acaule</i>	32	0	0	27	5	20	58	0	84	0	0,0000*	0,0000*	0,0000*	-	-0,06	
<i>S. ambosinum</i>	12	4	8	0	0	10	100	33	33	33	0,01*	0,002*	0,002*	-	-	
<i>S. angustisectum</i>	18	0	0	2	16	3	27	11	11	0	-	0,001*	0,001*	-	0,06	
<i>S. × arrac-papa</i>	30	4	4	19	3	19	77	13	13	13	0,01*	0,002*	-0,38*	-	-0,38*	
<i>S. berthaultii</i>	86	31	19	16	20	20	55	36	36	36	0,66	0,10	0,17	0,17	0,25*	
<i>S. chacoense</i>	13	0	0	3	10	10	23	0	23	0	0,11	0,35	-	-	-0,14	
<i>S. dolichostigma</i>	6	0	0	0	6	6	0	0	0	0	-	0,11	0,11	-	0,02	
<i>S. garsiae</i>	6	0	0	3	3	3	0	0	50	0	0,11	0,25	-	-	-	
<i>S. parodii</i>	13	3	0	5	5	5	23	23	62	23	0,04*	0,004*	0,43	0,43	0,30	
<i>S. kurtzianum</i>	46	5	3	17	21	21	17	11	48	11	-	0,0003*	-	-	0,09	
<i>S. leptophyes</i>	15	3	5	0	7	7	53	20	20	20	0,04*	0,13	0,47*	0,47*	0,02	
<i>S. microdontum</i>	12	2	5	0	5	5	58	17	17	17	-	0,02*	-	-	0,17	
<i>S. multidissectum</i>	30	4	2	5	19	19	20	13	30	13	0,31	0,19	0,40*	0,40*	0,64*	
<i>S. parvicorollatum</i>	10	1	0	1	8	8	10	10	20	10	-	1,00	0,67*	0,67*	0,40	
<i>S. × Ruiz-ceballosii</i>	44	27	1	16	0	16	64	61	98	61	0,001*	0,57	-0,12	-0,12	0,20	
<i>S. simplicifolium</i>	44	12	15	7	10	10	61	27	43	27	0,14	0,01*	0,03	0,03	-0,27	
<i>S. sparsipilum</i>	39	10	8	9	12	12	46	26	49	26	0,83	0,37	0,13	0,13	0,20	
<i>S. spagazzinii</i>	46	3	2	19	22	22	11	7	48	7	0,001*	0,0000*	0,09	0,09	0,61*	
<i>S. × sucrensis</i>	8	5	3	0	0	0	100	63	63	63	0,11	0,35	-	-	0,12	

Таблица 3. окончание
Table 3. DThe end

Вид / Species	Изучено растений / Studied numbers of plants		Процент популяций с устойчивыми листьями и клубнями / Percentage of populations with resistant leaves and tubers								Уровень значимости сходства поражения листьев и клубней по критерию Вилкоксона / Wilcoxon matched-pairs test p-levels				Ранговый коэффициент корреляции Спирмена / Spearman's rank-order correlations	
			LT		LT		LT		LT		бинарная оценка / binary		бинарная оценка / binary		балловая оценка / score	
			RR	RS	SR	SS	R/all, %	T	P	RR/all, %	бинарная оценка / binary	балловая оценка / score	бинарная оценка / binary	балловая оценка / score		
Южноамериканские виды / South American species																
<i>S. virgultorum</i>	24	0	4	0	0	17	0	0	0,07	0,91	-	-	0,58*			
Центральноамериканские виды / Central American species																
<i>S. brachistotrichum</i>	12	2	10	0	0	100	17	17	0,01*	0,003*	-	-	0,29			
<i>S. cardiophyllum</i>	69	65	4	0	0	100	94	94	0,07	0,0001*	-	-	0,28*			
<i>S. demissum</i>	42	15	27	0	0	100	36	36	0,000*	0,0000*	-	-	0,31*			
<i>S. neoantipoviczii</i>	20	14	15	1	0	95	75	70	0,14	0,001*	-0,13	-0,13	-0,03			
<i>S. papita</i>	71	34	10	26	1	62	85	48	0,02*	0,28	-0,26*	-0,26*	-0,25*			
<i>S. pinnatisectum</i>	168	89	13	60	6	61	89	53	0,000*	0,0000*	-0,06	-0,06	0,07			
<i>S. polytrichon</i>	57	25	22	2	8	82	47	44	0,0004*	0,0004*	0,25	0,25	0,25			
<i>S. stoloniferum</i>	92	5	62	10	15	73	16	5	0,0000*	0,01*	-0,39*	-0,39*	-0,30*			
<i>S. verrucosum</i>	91	1	47	22	21	53	25	1	0,01*	0,0000*	-0,56*	-0,56*	-0,64*			
Уровни значимости внутри таксономических серий / Pairs test p-levels within taxonomic series																
<i>Tuberosa</i>	537	112	126	131	168	44	45	21	0,79	0,40	0,03	0,03	0,08			
<i>Yungazensa</i>	56	3	0	13	40	5	29	5	0,001*	0,0000*	0,38*	0,38*	0,12			
<i>Pinnatisecta</i>	249	156	27	60	6	73	87	63	0,002*	0,0000*	-0,07	-0,07	0,04			
<i>Longipedicellata</i>	240	78	99	39	24	74	49	33	0,0000*	0,001*	-0,16*	-0,16*	0,02			

Примечание: L – листья; T – клубни; P – растение (листья и клубни); RR – устойчивость листьев и клубней; RS – устойчивость листьев и клубней; SR – восприимчивость листьев и клубней; SS – восприимчивость клубней; * – достоверность; достоверное отличие (отсутствие сходства в степени поражения листьев и клубней) по критерию Вилкоксона или достоверная ранговая корреляция Спирмена степени поражения листьев и клубней

Note: L – leaves; T – tubers; P – plants (leaves and tubers); RR – resistance of leaves and tubers; RS – resistance of leaves and tubers; SR – susceptibility of leaves, resistance of tubers; SS – susceptibility of leaves and tubers; * – significance; a significant difference (lack of similarity in the degree of damage on leaves and tubers) according to the Wilcoxon test or a significant Spearman's rank-order correlation of the degree of leaf and tuber damage

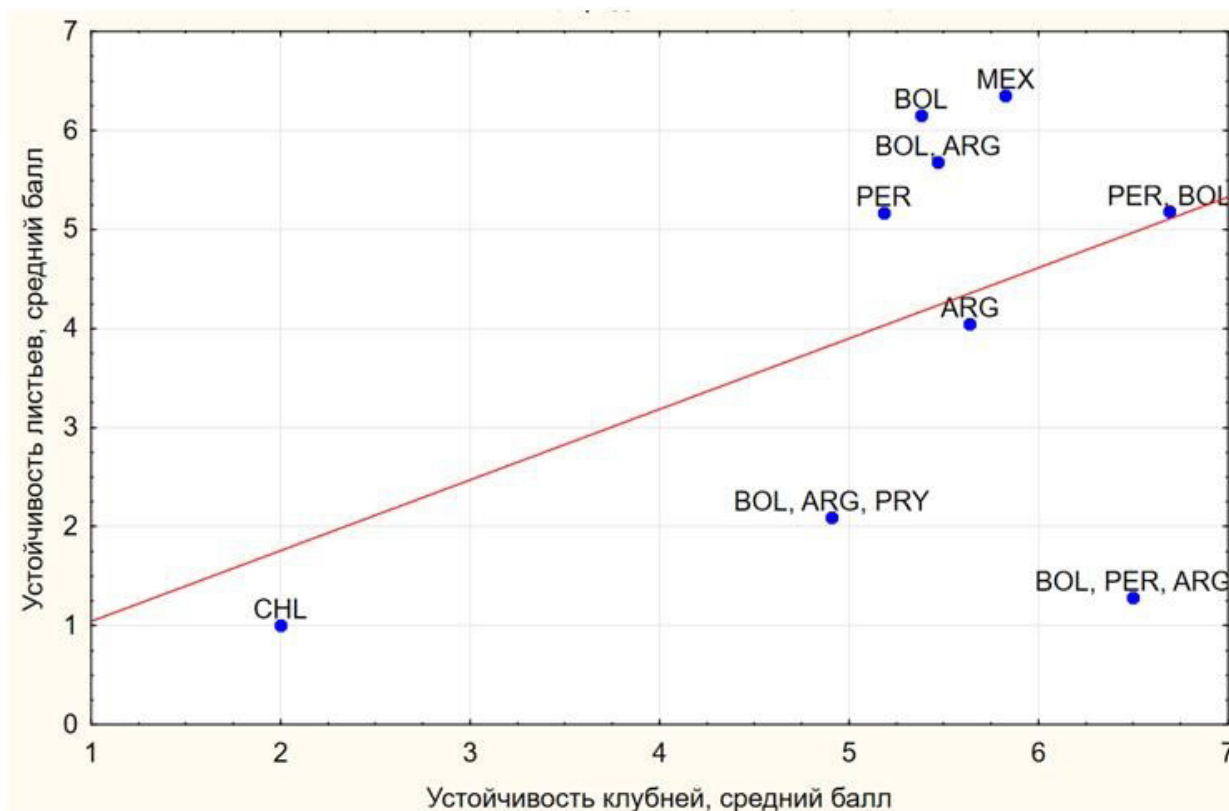


Рисунок. Распределение по устойчивости к фитофторозу листьев и клубней диких видов картофеля с ареалами (согласно J. Hawkes, 1990) в центральной и южной Америке (аббревиатуры стран мира приведены по: <https://www.iban.com/country-codes>)

Figure. Distribution according to leaf and tuber resistance to late blight among wild potato species with their areas (according to J. Hawkes, 1990) in Central and South Americas (country abbreviations are given according to: <https://www.iban.com/country-codes>)

lata, отрицательная статистически значимая корреляция между устойчивостью листьев и клубней имеет место у *S. papita* и *S. stoloniferum*, но отсутствует у *S. polytrichon*. В многолетнем полевом изучении было показано, что у *S. papita* и *S. stoloniferum* в сравнении с *S. polytrichon* была более высокая доля образцов с устойчивостью ботвы (Zoteyeva, 2019). A. Lokossou с соавторами (Lokossou et al., 2010) проанализировали аллельное разнообразие генов устойчивости к фитофторозу *Rpi-blb1*, *Rpi-blb2* и *Rpi-blb3* у большого набора клубненосных видов *Solanum*. У образцов *S. stoloniferum* и *S. papita* были выявлены маркеры генов *Rpi-blb1* и *Rpi-blb3*, а у образцов *S. polytrichon* – нет.

Заключение

В изученной выборке видов картофеля определена встречаемость растений с устойчивостью листьев и клубней к фитофторозу. Такие растения часты у мексиканских видов *S. cardiophyllum*, *S. pinnatisectum* и *S. × sambucinum*, принадлежащих к серии *Pinnatisecta*. В пределах этой серии чувствительность к фитофторозу проявляли растения *S. stenophyllidium*. Преобладание растений с устойчивостью листьев отмечено у образцов центральноамериканских (*S. demissum*, *S. papita*, *S. polytrichon*, *S. stoloniferum*, *S. verrucosum*) и южноамериканских (*S. hoopesii*, *S. okadae*, *S. × ruiz-ceballosii*, *S. simplicifolium*, *S. sparsipilum*) видов. Растения с устойчивостью клубней преобладали у видов *S. × arrac-papa*, *S. chacoense*, *S. kurtzianum* и *S. spegazzinii*.

Статистический анализ не выявил 100-процентной корреляции между устойчивостью листьев и клубней ни у одного из видов. С помощью критерия Вилкоксона значимая положительная корреляция между степенью устойчивости листьев и клубней установлена у *S. leptophyes* и *S. parodii*, а значимая отрицательная – у *S. stoloniferum* и *S. verrucosum*. Высокая положительная корреляция этих признаков выявлена у образцов *S. angustisectum*, *S. multidissectum* и *S. virgultorum*, у которых преобладали растения с чувствительностью обоих органов.

Данные по устойчивости листьев и клубней образцов диких видов картофеля могут быть полезны при поиске исходного материала для селекции фитофтороустойчивых сортов.

References / Литература

- Bradshaw J.E., Hackett C.A., Lowe R., McLean K., Stewart H.E., Tierney I. et al. Detection of a quantitative trait locus for both foliage and tuber resistance to late blight [*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary] on chromosome 4 of a dihaploid potato clone (*Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum*). *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;113(5):943-951. DOI: 10.1007/s00122-006-0353-8
- Bulbol J., Sleboda P., Lehrman A., Hansson S.O., Lagerkvist C.J., Andersson B. et al. Genetically modified (GM) late blight-resistant potato and consumer attitudes before and after a field visit. *GM Crops and Food*. 2022;13(1):290-298. DOI: 10.1080/21645698.2022.2133396

- Chalaya N.A., Biryukova V.A., Kiru S.D. New sources of resistance to potato cyst nematodes among the wild potato species from the VIR collection (Novye istochniki ustoychivosti k zolotistoy kartofelnoy nematode *G. rostochiensis* (Woll.) iz kolleksii dikorastushchikh vidov kartofelya VIR). *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2012;(26):45-50. [in Russian] (Чала́я Н.А., Бирюкова В.А., Киру С.Д. Новые источники устойчивости к золотистой картофельной нематодe *G. rostochiensis* (Woll.) из коллекции дикорастущих видов картофеля ВИР. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2012;(26):45-50).
- Cooke L.R., Schepers H.T.A.M., Hermansen A., Bain R.A., Bradshaw N.J., Ritchie F. et al. Epidemiology and integrated control of potato late blight in Europe. *Potato Research*. 2011;54(2):183-222. DOI: 10.1007/s11540-011-9187-0
- Elansky S.N., Kokaeva L.Yu., Statsyuk N.V., Dyakov Yu.T. Population structure and dynamics of *Phytophthora infestans*, a causative agent of the late blight of potato and tomato. *Zashchita karlofelya = Potato Protection*. 2017;(3):3-44. [in Russian] (Еланский С.Н., Кокаева Л.Ю., Стацюк Н.В., Дьяков Ю.Т. Структура и динамика популяций *Phytophthora infestans* – возбудителя фитофтороза картофеля и томата. *Защита картофеля*. 2017;(3):3-44).
- Gao L., Bradeen J.M. Contrasting potato foliage and tuber defense mechanisms against the late blight pathogen *Phytophthora infestans*. *PLoS One*. 2016;11(7):e0159969. DOI: 10.1371/journal.pone.0159969
- Haverkort A.J., Struik P.C., Visser R.G.F., Jacobsen E. Applied biotechnology to combat late blight in potato caused by *Phytophthora infestans*. *European Potato Journal*. 2009;52(3):249-264. DOI: 10.1007/s11540-009-9136-3
- Hawkes J.G. The potato: evolution, biodiversity and genetic resources. London: Belhaven Press; 1990.
- IBAN. COUNTRY CODES ALPHA-2 & ALPHA-3: [website]. Available from: <https://www.iban.com/country-codes> [accessed Oct. 22, 2023].
- Jones J., Foster S.J., Chu Z., Park T.H., van der Vossen E.A.G., Pel M.A., Visser R.G.F. Late blight resistance genes and methods. UK; patent number: WO/2009/013468; 2009.
- Karki H.S., Jansky S.H., Halterman D.A. Screening of wild potatoes identifies new sources of late blight resistance. *Plant Disease*. 2021;105(2):368-376. DOI: 10.1094/PDIS-06-20-1367-RE
- Kirk W.W., Felcher K.J., Douches D.S., Niemira B.A., Hamerschmidt R. Susceptibility of potato (*Solanum tuberosum* L.) foliage and tubers to the US8 genotype of *Phytophthora infestans*. *American Journal of Potato Research*. 2001;78(4):319-322. DOI: 10.1007/BF02875697
- Lokossou A.A., Rietman H., Wang M., Krenek P., van der Schoot H., Henken B. et al. Diversity, distribution, and evolution of *Solanum bulbocastanum* late blight resistance genes. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2010;23(9):1206-1216. DOI: 10.1094/MPMI-23-9-1206
- Nasledov A.D. Mathematical methods of psychological research Data analysis and interpretation (Matematicheskiye metody psikhologicheskogo issledovaniya. Analiz i interpretatsiya dannykh). St. Petersburg: Rech; 2012. [in Russian] (Наследов А.Д. Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных. Санкт-Петербург: Речь; 2012).
- Park T.H., Vleeshouwers V.G.A.A., Kim J.B., Hutten R.C.B., Visser R.G.F. Dissection of foliage and tuber late blight resistance in mapping populations of potato. *Euphytica*. 2005;143(1-2):75-83. DOI: 10.1007/s10681-005-2658-0
- Radchenko E.E. Aphid resistance in potato. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(1):74-82. [in Russian] (Радченко Е.Е. Устойчивость картофеля к тлям. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(1):74-82). DOI: 10.18699/VJ17.225
- Ristaino J.B. Tracking historic migrations of the Irish potato famine pathogen, *Phytophthora infestans*. *Microbes and Infection*. 2002;4(13):1369-1377. DOI: 10.1016/s1286-4579(02)00010-2
- Rogozina E.V., Gurina A.A., Chalaya N.A., Zoteyeva N.M., Kuznetsova M.A., Beketova M.P. et al. Diversity of late blight resistance genes in the VIR potato collection. *Plants*. 2023;12(2):273. DOI: 10.3390/plants12020273
- Runno-Paurson E., Agho C.A., Zoteyeva N., Koppel M., Hansen M., Hallikma T. et al. Highly diverse *Phytophthora infestans* populations infecting potato crops in Pskov region, North-West Russia. *Journal of Fungi*. 2022;8(5):472. DOI: 10.3390/jof8050472
- Sliwka J., Jakuczun H., Chmielarz M., Hara-Skrzypiec A., Tomczynska I., Kilian A. et al. Late blight resistance gene from *Solanum ruiz-ceballosii* is located on potato chromosome X and linked to violet flower colour. *BMC Genetics*. 2012;13:11. DOI: 10.1186/1471-2156-13-11
- Song J., Bradeen J.M., Naess S.K., Raasch J.A., Wielgus S.M., Haberlach G.T. et al. Gene *RB* cloned from *Solanum bulbocastanum* confers broad spectrum resistance to potato late blight. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2003;100(16):9128-9133. DOI: 10.1073/pnas.1533501100
- StatSoft, Inc. Electronic Statistics Textbook. Tulsa, OK: StatSoft; 2013. Available from: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> [accessed Oct. 15, 2021].
- Stewart H.E., Bradshaw J.E., Wastie R.L. Correlation between resistance to late blight in foliage and tubers in potato clones from parents of contrasting resistance. *Potato Research*. 1994;37(4):429-34. DOI: 10.1007/BF02358357
- Tiwari J.K., Chakrabarti S.K., Singh B.P., Thakur G., Kaushik S., Sharma S. et al. QTL mapping underlying resistance to late blight in a diploid potato population of *Solanum spegazzinii* × *S. chacoense*. *European Potato Journal*. 2014;57:1-11.
- Verzaux E., van Arkel G., Vleeshouwers V.G.A.A., van der Vossen E.A.G., Niks R.E., Jacobsen E. High-resolution mapping of two broad-spectrum late blight resistance genes from two wild species of the *Solanum circaeifolium* group. *Potato Research*. 2012;55(2):109-123. DOI: 10.1007/s11540-012-9213-x
- Verzaux E.C., Budding D., de Vetten N., Niks R.E., Vleeshouwers V.G.A.A., van der Vossen E.A.G. et al. High resolution mapping of a novel late blight resistance gene *Rpi-avl1*, from the wild Bolivian species *Solanum avilesii*. *American Journal of Potato Research*. 2011;88(6):511-519. DOI: 10.1007/s12230-011-9218-z
- Wang M., Allefs S., van den Berg R.G., Vleeshouwers V.G.A.A., van der Vossen E.A.G., Vosman B. Allele mining in *Solanum*: conserved homologues of *Rpi-blb1* are identified in *Solanum stoloniferum*. *Theoretical and Applied Genetics*. 2008;116(7):933-943. DOI: 10.1007/s00122-008-0725-3
- Zarzycka H. Evaluation of resistance to *Phytophthora infestans* in detached leaflet as-say. Preparation of the inoculum. In: *IHAR Monografie i Rozprawy Naukowe*. Radzików: IHAR; 2001. p.75-77.
- Zoteyeva N., Skrabule I., Mežaka I., Vilcāne D., Usele G., Rostoks N. The impact of *R1* and *R3a* genes on tuber resistance to late blight of the potato breeding clones. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural Exact*

and Applied Sciences. 2016;70(2):58-63. DOI: 10.1515/prolas-2016-0010

Zoteyeva N., Sprůde G., Klimenko N., Mezaka I. Identification of interspecific potato hybrids with combined resistance to late blight (*Phytophthora infestans*) and nematode (*Globodera rostochiensis*). *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural Exact and Applied Sciences*. 2020;74(3):188-195. DOI: 10.2478/prolas-2020-0030

Zoteyeva N.M. Late blight resistance of wild potato species under field conditions in the Northwest of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(4):159-169. [in Russian] (Зотеева Н.М. Устойчивость диких видов картофеля к фитофторозу в полевых условиях Северо-Запада РФ. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(4):159-169). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-4-159-169

Zoteyeva N.M., Antonova O.Yu., Klimenko N.S., Apalikova O.V., Carlson-Nilsson U., Karabitsina Yu.I. et al. Facilitation of introgressive hybridization of wild polyploid Mexican potato species using DNA markers of R-genes and

of different cytoplasmic types. *Agricultural Biology*. 2017;52(5):964-975. [in Russian] (Зотеева Н.М., Антонова О.Ю., Клименко Н.С., Апаликова О.В., Карлсон-Нильссон У., Карабицина Ю.И. и др. Использование молекулярных маркеров R-генов и типов цитоплазмы при интрогрессивной гибридизации диких полиплоидных мексиканских видов картофеля. *Сельскохозяйственная биология*. 2017;52(5):964-975). DOI: 10.15389/agrobiol.2017.5.964rus

Zoteyeva N.M., Chrzanowska M., Flis B., Zimnoch-Guzowska E. Resistance to pathogens of the potato accessions from the collection of N.I. Vavilov Institute of Plant Industry (VIR). *American Journal of Potato Research*. 2012;89(4):277-293. DOI: 10.1007/s12230-012-9252-5

Zoteyeva N.M., Zimnoch-Guzowska E.M. A new method for evaluation of potato tubers resistance to *Phytophthora infestans*. *Mycology and Phytopathology*. 2004;38(1):89-93. [in Russian] (Зотеева Н.М., Зимнох-Гузовска Е.М. Новый метод изучения устойчивости клубней картофеля к фитофторозу. *Микология и фитопатология*. 2004;38(1):89-93).

Информация об авторах

Надежда Мубаровна Зотеева, 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, nzoteyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2266-0467>

Елизавета Александровна Пороховинова, 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, e.porohvinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-9684>

Дмитрий Андреевич Фатеев, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, dmtfateev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1075-6704>

Надежда Александровна Чалай, кандидат сельскохозяйственных 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, n.chalaya@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8515-7941>

Information about the authors

Nadezhda M. Zoteyeva, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, nzoteyeva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2266-0467>

Elizaveta A. Porokhvinova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.porohvinova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8328-9684>

Dmitrii A. Fateev, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, dmtfateev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1075-6704>

Nadezhda A. Chalaya, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.chalaya@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8515-7941>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 17.11.2023; одобрена после рецензирования 27.12.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 17.11.2023; approved after reviewing on 27.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение

УДК 633.112.1"321":631.526.32:631.524.85

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-184-190

**Экологическая адаптивность сортов яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции****С. Н. Гапонов, Г. И. Шутарева, Н. М. Цетва, И. С. Цетва, И. В. Милованов,
Н. А. Бурмистров, Е. С. Жиганова, Н. С. Соловова***Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия***Автор, ответственный за переписку:** Галина Ивановна Шутарева, miss.shutik2010@yandex.ru

Актуальность. Распространение засухоустойчивых сортов яровой твердой пшеницы саратовской селекции с высоким качеством зерна в восточные регионы страны продиктовано изменением климата: повышением температуры воздуха, недостатком осадков в период вегетации, возникновением летних засух.

Материалы и методы. Материалом для исследований послужили семь сортов селекции Федерального аграрного научного центра (ФАНЦ) Юго-Востока (Саратов): 'Валентина', 'Ник', 'Елизаветинская', 'Николаша', 'Луч 25', 'Памяти Васильчука', 'Тамара'. Оценку сортов яровой твердой пшеницы на определение коэффициентов экологической пластичности и стабильности по урожайности за 2012–2022 гг. проводили по методике S. A. Eberhart, B. A. Russell в изложении В. А. Зыкина. Показатели качества зерна измеряли на приборах: Infratec 1241 – белок; Glutomatic – индекс глютена (IG); Spekol 10 – индекс желтизны (b%).

Результаты. Адаптивность сортов яровой твердой пшеницы саратовской селекции подтверждена коэффициентами экологической пластичности и стабильности. Согласно результатам исследования, сорта 'Ник', 'Николаша', 'Луч 25', 'Памяти Васильчука' с коэффициентами пластичности $b_i > 1$ отличает высокая отзывчивость на условия возделывания и получения высококачественного зерна.

Заключение. На основании полученных данных по продуктивности и высокому качеству зерна можно рекомендовать засухоустойчивые сорта ФАНЦ Юго-Востока для использования в различных регионах РФ.

Ключевые слова: урожайность, экологическая пластичность, климат, экологические испытания

Благодарности: работа выполнена по заданию № FNWF-2022-0003 «Создание и совершенствование системы видов и сортов (гибридов) сельскохозяйственных культур, адаптивных к абиострессорам и устойчивых к основным патогенам, сочетающих высокую потенциальную продуктивность с качеством урожая, с целью снижения экономических рисков в растениеводстве и повышения биоразнообразия в регионе». Статья подготовлена в рамках конференции, посвященной 50-летию лаборатории генетики и цитологии ФАНЦ Юго-Востока.

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

Для цитирования: Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Бурмистров Н.А., Жиганова Е.С., Соловова Н.С. Экологическая адаптивность сортов яровой твердой пшеницы (*Triticum durum* Desf.) саратовской селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):184-190. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-184-190

BRIEF REPORTS

Brief report

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-184-190

Environmental adaptability of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars developed in Saratov

Sergey N. Gaponov, Galina I. Shutareva, Natalia M. Tsetva, Ivan S. Tsetva, Ivan V. Milovanov, Nikita A. Burmistrov, Elena S. Zhiganova, Nina S. Solovova

Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, Russia

Corresponding author: Galina I. Shutareva, miss.shutik2010@yandex.ru

Background. The spreading of drought-resistant spring durum wheat cultivars with high grain quality developed by Saratov breeders to the eastern regions of Russia is dictated by climate change: higher air temperatures, precipitation deficit during the growing season, and summer droughts.

Materials and methods. The material for research included seven spring durum wheat cultivars developed at the Federal Center of Agriculture Research (FCAR) of the South-East Region in Saratov: 'Valentina', 'Nik', 'Yelizavetinskaya', 'Nikolasha', 'Luch 25', 'Pamyati Vasilchuka', and 'Tamara'. The cultivars and their yields in 2012–2022 were evaluated to calculate the coefficients of environmental plasticity and stability according to the methods by S. A. Eberhart and B. A. Russell, as interpreted by V. A. Zykin. Grain quality indicators were measured on the devices: Infratec 1241 for protein, Glutomatic for the index of gluten (IG), and Spekol 10 for the yellowness index (b%).

Results. The adaptability of spring durum wheat cultivars bred in Saratov was confirmed by the coefficients of environmental plasticity and stability. According to the results of the study, cvs. 'Nik', 'Nikolasha', 'Luch 25' and 'Pamyati Vasilchuka' with plasticity coefficients (bi) > 1 were highly responsive to the conditions of cultivation and production of high-quality grain.

Conclusion. The data obtained on grain productivity and high quality make it possible to recommend drought-resistant cultivars released by the FCAR of the South-East Region for use in various regions of Russia.

Keywords: yield, environmental plasticity, climate, environmental tests

Acknowledgements: the work was carried out under Task No. FNWF-2022-0003 "Development and improvement of the system of crop species and cultivars (hybrids) adaptable to abiotic stressors and resistant to major pathogens, combining high potential productivity with harvest quality with the purpose to reduce economic risks in crop production and enhance the regional biodiversity". The article was prepared within the framework of the conference dedicated to the 50th anniversary of the Genetics and Cytology Laboratory, FCAR of the South-East Region".

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

For citation: Gaponov S.N., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Tsetva I.S., Milovanov I.V., Burmistrov N.A., Zhiganova E.S., Solovova N.S. Environmental adaptability of spring durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars developed in Saratov. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):184-190. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-184-190

Введение

Одна из важнейших зерновых культур засушливой юго-восточной части европейской территории России – это яровая пшеница. Экстремальные природно-климатические условия региона создают естественный фон для оценки и отбора генотипов, отличающихся очень высокой засухоустойчивостью и формирующих зерно отличного качества.

Особая ценность твердой пшеницы – в ее пищевых достоинствах. Как одна из составляющих здорового питания, твердая пшеница – это прежде всего макаронные изделия, которые имеют низкий гликемический индекс. Показатель гликемического индекса (ГИ) информирует о содержании углеводов в продуктах и их влиянии на уровень сахара в крови. ГИ очень важно знать для людей с избыточным весом, страдающих многими заболеваниями (McGregor, 2015). Все макаронные изделия из твердой пшеницы имеют низкий ГИ – 40 ед. по шкале в 100 ед. у глюкозы (сахарозы). Длительное усвоение углеводов твердой пшеницы обусловлено строением крахмальных зерен и белков. На севере Африки и Ближнем Востоке из твердой пшеницы готовят булгур (bulgur), лапшу (noodles), кускус (couscous), различный плоский хлеб (однослойный, двухслойный и т. п.). В России из твердой пшеницы делают крупы, в том числе и манную, с высоким содержанием каротиноидных пигментов (провитамин А) для детского питания. Важно, что любые продукты из твердой пшеницы имеют цвет приятного желтого оттенка, который зависит от количественного содержания каротиноидных пигментов (Gaponov et al., 2022).

По этому поводу хотелось бы процитировать Лидию Герасимовну Ильину (Ilyina, 1996, p. 127): «...твердая пшеница – особая культура. Она должна выращиваться, прежде всего, за высокое качество зерна. Саратовские твердые пшеницы всегда славились как высокими макаронными свойствами, так и смесительной ценностью при хлебопечении. Примерно с 60-х годов была поставлена проблема дальнейшего улучшения качественных особенностей саратовских сортов твердой пшеницы. На базе повышения каротиноидов в настоящее время достигнуты определенные позитивные результаты».

Прогнозы климатологов о том, что глобальное потепление продолжается, в настоящее время никто не подвергает сомнению. Если с начала XX века средняя температура повышалась примерно на 0,78–0,90°C, то с 1980 г. скорость повышения температуры воздуха увеличилась (Vilfand et al., 2016; Bogdanovich et al., 2021). По многолетним прогнозам, к 2030–2039 гг. частота сильных засух будет увеличиваться, а в связи с этим будет снижаться урожайность яровой пшеницы (Pavlova, Karachenkova, 2020).

Для ученых-селекционеров это предполагает изменение в традиционных программах скрещивания, отбора и анализа полученных результатов.

Для потребителей и производителей сельскохозяйственной продукции возрастает потребность в сортах, сочетающих высокие хозяйственно ценные показатели качества с устойчивостью к биологическим и климатическим стрессорам. Исходя из этих требований, необходимо создавать сорта с достаточной экологической адаптивностью.

Цель данного исследования заключается в определении коэффициентов экологической пластичности и стабильности у засухоустойчивых сортов яровой твердой

пшеницы саратовской селекции и на основе полученных данных спрогнозировать их дальнейшее использование в различных регионах возделывания данной культуры с учетом изменений климата.

Материалы и методы

Материалом для исследований послужили семь сортов яровой твердой пшеницы из основного конкурсного испытания (ОКИ): 'Валентина', 'Ник', 'Елизаветинская', 'Николаша', 'Луч 25', 'Памяти Васильчука', 'Тамара'.

Сорт 'Валентина' с потенциальной урожайностью до 3,8 т/га и крупным зерном (масса 1000 зерен – 45–48 г) дает самый высокий выход крупки. Сорт устойчив к полеганию, обладает отличным качеством клейковины (индекс глютена – 94 ед. прибора). Сорт 'Ник' высокоурожайный, засухоустойчивый, скороспелый, слабавосприимчивый к вирусным заболеваниям, отличается высоким содержанием белка, клейковины и каротиноидных пигментов. Сорт 'Елизаветинская' высокопродуктивный, скороспелый, от всходов до колошения – в среднем 41 день. Имеет высокие параметры качества клейковины и макаронных изделий, индекс желтизны крупки – 22,7%, что делает сорт ценным и востребованным. Сорт 'Николаша' пластичный, адаптивный, имеет преимущество перед другими сортами при поздних сроках посева. Устойчив к бурой, желтой и стеблевой ржавчинам. Высокое качество клейковины используется для макаронно-крупяных изделий. Сорт 'Луч 25' скороспелый, урожайный, практически устойчив к «черному зародышу», слабо поражается вирусными инфекциями, имеет высокие параметры качества клейковины и макаронных изделий. Сорт 'Памяти Васильчука' высокопродуктивный, отвечающий всем современным параметрам качества твердой пшеницы: индекс глютена – 88 ед., индекс желтизны – 23,7%. Новый сорт 'Тамара' имеет преимущество в высоком содержании каротиноидных пигментов среди всех современных сортов. Индекс желтизны – 25,5%.

Посев проводили по чистому пару и в оптимальные сроки. Чаще всего это вторая или третья декада апреля. За последние 11 лет (2012–2022) самый поздний посев был 1 мая 2013 г., а самый ранний – 5–8 апреля 2020 г. Норма высева – 4 млн шт. семян на площадь в 1 га. Сорта высевали в 4-кратной повторности методом рандомизированного размещения делянок в опыте. Учетная площадь делянки – 8,4 м².

Уборка сортов яровой твердой пшеницы проводилась комбайнами Nege 125 и Wintersteiger в фазу восковой спелости зерна.

Анализ зерна делали на средней пробе каждого сорта после проведения очистки и сортировки полученного урожая, при влажности 12%. Содержание белка определяли на приборе Infratec 1241 (FOSS). Индекс глютена как показатель качества клейковины определяли на приборе Glutomatic (GOST ISO 21415-2-2019..., 2020).

С развитием селекции и созданием новых сортов обработка огромного количества селекционного материала на уровне питомников младшего поколения требовала использования экспресс-методов анализа качества зерна на ограниченном его количестве. Индекс желтизны (b%) – один из таких методов, предложенный D. E. Walsh (1970); он был усовершенствован для спектрофотометра Spekol 10 Николаем Сергеевичем Васильчуком (Vasilchuk, 2001). Метод позволяет отбирать ценные генотипы по степени цвета семолины на ранних этапах селекционного процесса – в F₂ и F₃ – в сочетании

с другими хозяйственно-полезными признаками (Gaponov et al., 2018).

Для количественного выражения насыщенности желтого цвета семянины (степени желтизны) образцы достаточно исследовать по двум цветовым координатам – Y и Z, длины волн которых составляют 546,1 и 435,8 нм соответственно, на спектрофотометре Spekol 10. Полученные данные подставляем в формулу и вычисляем степень желтизны (b%):

$$b\% = \frac{7*(Y-Z)}{\sqrt{Y}}$$

где Y – процент отражения при $\lambda = 546,1$ нм; Z – при $\lambda = 435,8$ нм.

При определении индекса желтизны (b%) семянины была обнаружена высокая положительная корреляция между показателем желтизны, определяемым на Spe-

монографии Николай Сергеевич Васильчук (Vasilchuk, 2001, p. 25). Достигнуть получения таких сортов можно было двумя основными путями: через скороспелость, то есть возможность сортов «уходить» от весенне-летних засух и использовать минимальные осадки в периоды кущения и налива зерна, и через устойчивость к воздействию климатических стрессоров с использованием своих морфофизиологических возможностей.

Расчет коэффициентов экологической пластичности и стабильности по признаку «урожайность» проводился на сортах яровой твердой пшеницы саратовской селекции (табл. 1). При благоприятных условиях вегетации можно рассчитывать на хороший урожай – от 2,9 т/га, как у сорта 'Елизаветинская', до 4,0 т/га, как у сорта 'Луч 25'. При минимальном урожае в острозасушливые годы можно получать небольшой, но стабильный урожай до 1,29 т/га, как у сорта 'Памяти Васильчука'.

Таблица 1. Показатели пластичности (bi) и стабильности (s_d²) сортов яровой твердой пшеницы, Саратов, 2012–2022 гг.

Table 1. Indicators of plasticity (bi) and stability (s_d²) in spring durum wheat cultivars, Saratov, 2012–2022.

Сорт	Год*	Пластичность, bi	Стабильность, (s _d ²)	Урожайность, т/га		
				min	max	среднее
'Валентина'	1998	0,93	8,54	1,08	3,27	2,02
'Ник'	2000	1,01	3,72	1,03	3,63	2,16
'Елизаветинская'	2002	0,99	3,42	0,57	2,91	2,22
'Николаша'	2009	1,08	2,55	0,75	3,89	2,18
'Луч 25'	2011	1,12	2,83	1,26	4,00	2,38
'Памяти Васильчука'	2020	1,01	7,43	1,29	3,71	2,42
'Тамара'	2022	0,94	7,38	1,01	3,32	2,38
НСР _{0.05}		0.01				0,03

Примечание: * – год внесения сорта в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений

Note: * – the year when the cultivar was included into the State Register of Protected Selection Achievements

kol 10, и количеством каротиноидных пигментов в зерне – $r = 0,73^{**} \dots 0,93^{**}$ (** значимо для уровня 0,01).

Расчет параметров экологической пластичности и стабильности оценивали по методике S. A. Eberhart, B. A. Russell в изложении В. А. Зыкина (Zykin et al., 2008). Математическую обработку данных по качеству зерна проводили по методике Б. А. Доспехова (Dospikhov, 1985).

Результаты и обсуждение

Глобальные изменения климата в Поволжье коснулись увеличения средней температуры воздуха и снижения осадков в период вегетации яровой твердой пшеницы в сторону еще большей засухливости. По данным лаборатории метеорологии нашего института, за последние 110 лет среднесезонная температура повысилась с 18,1°C до 19,8°C, а сумма осадков снизилась со 150 мм до 129 мм, или на 21 мм. Тем не менее саратовским селекционерам, «несмотря на сложность задачи, усугубляемой еще и глобальным изменением климата в сторону его большей засухливости, ... пока удавалось... наращивать урожайность твердой пшеницы путем создания более скороспелых и засухоустойчивых сортов» – писал в своей

Сорта с коэффициентом пластичности (bi) > 1, такие как 'Ник', 'Николаша', 'Луч 25', 'Памяти Васильчука', имеют высокий потенциал продуктивности, зависящий от условий возделывания, и востребованы в агропроизводстве. Это сорта интенсивного типа. Сорта 'Тамара' и 'Валентина' с пластичностью (bi) < 1 при стабильности (s_d²) 7,38–8,54 относятся к сортам, способным переносить стрессовые факторы и давать качественный урожай при благоприятных условиях вегетации. К экстенсивным сортам принадлежит сорт 'Елизаветинская', характеризующийся слабой реакцией на улучшение условий среды.

Все сорта, представленные в таблице 1, востребованы у сельхозпроизводителей яровой твердой пшеницы – и не столько за продуктивность, сколько за качество зерна. Крупные современные макаронные фабрики работают по стандартам, где требования к качеству клейковины, количеству белка и цвету муки очень высоки.

В межгосударственный стандарт (GOST ISO 21415-2-2019..., 2020) по твердой пшенице внесли показатель «индекс глютена», определяющий качество клейковины. Пшеница с IG более 80 ед. считается качественной, с прочной и эластичной клейковиной. Сорта, представ-

Таблица 2. Показатели качества зерна сортов яровой твердой пшеницы, Саратов, 2012–2022 гг.**Table 2. Grain quality indicators in spring durum wheat cultivars, Saratov, 2012–2022**

Сорта	Количество белка, %	Индекс глютена, (IG)	Индекс желтизны, b%
‘Валентина’	14,9	96	19,6
‘Ник’	14,5	79	20,4
‘Елизаветинская’	16,2	85	21,5
‘Николаша’	15,8	74	19,8
‘Луч 25’	16,2	91	19,7
‘Памяти Васильчука’	16,3	90	22,3
‘Тамара’	15,7	89	23,5
НСР _{0,05}	0,7	7	1,2

ленные в таблице 2, – с отличной и упругой клейковиной, необходимой для производства макаронной продукции качества группы «А». Индекса желтизны, как и количества каротиноидных пигментов, в требованиях ГОСТ нет, но переработчики зерна твердой пшеницы на крупных макаронных фабриках этот анализ делают. Оптикой Konica Minolta определяют индекс желтизны как в зерне, так и в крупке. Разница между показаниями Spekol 10 и Konica минимальная: на 1,5–2,0% больше индекс желтизны по измерению Konica Minolta. Из списка можно отметить несколько сортов, сочетающих в себе высокое качество клейковины, индекс желтизны и содержание белка, что делает твердую пшеницу особо ценным продуктом. Прежде всего, надо обратить внимание на новые, современные сорта яровой твердой пшеницы – ‘Памяти Васильчука’ и ‘Тамара’. Первый – с особо прочной клейковиной, подходит для быстрой сушки макаронных изделий для пасты (Gaponov et al., 2020), второй – с самым высоким индексом желтизны, что значительно прибавляет потребительской ценности продуктам (Gaponov et al., 2022) (см. табл. 2).

Заключение

Широкая адаптация сортов яровой твердой пшеницы саратовской селекции подтверждена высокими коэффициентами экологической пластичности и экологической стабильности. Как наиболее пластичные с высокой потенциальной продуктивностью можно рекомендовать несколько сортов яровой твердой пшеницы для получения высококлассного урожая, таких как ‘Ник’, ‘Николаша’, ‘Луч 25’, ‘Памяти Васильчука’.

References / Литература

Bogdanovich A.Yu, Pavlova V.N., Rankova E.Ya., Semenov S.M. Influence of changes in aridity in Russia in the XXI century on the suitability of territories for cultivation of grain crops. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021;7(1):20-35. [in Russian] (Богданович А.Ю., Павлова В.Н., Ранькова Э.Я., Семенов С.М. Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2021;7(1):20-35). DOI: 10/21513/2410-8758-2021-1-20-35

Dospikhov B.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian]

(Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат; 1985).

- Gaponov S.N., Popova V.M., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Parshikova T.M. Shchukin S.A. The variety “Saratovskaya zolotistaya” is 25. *Grain Economy of Russia*. 2018;(5):57-60. [in Russian] (Гапонов С.Н., Попова В.М., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Паршикова Т.М. Щукин С.А. 25 лет сорту Саратовская золотистая. *Зерновое хозяйство России*. 2018;(5):57-60). DOI: 10.31367/2079-8725-2018-59-5-57-60
- Gaponov S.N., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Tsetva I.S., Milovanov I.V. Improvement of the method of rheological assessment of grain quality in the spring wheat breeding. *Grain Economy of Russia*. 2020;1(67):49-53. [in Russian] (Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В. Усовершенствование метода реологической оценки качества зерна в селекции яровой твердой пшеницы. *Зерновое хозяйство России*. 2020;1(67):49-53). DOI: 10.31367/2079-8725-2020-67-1-49-53
- Gaponov S.N., Shutareva G.I., Tsetva N.M., Tsetva I.S., Milovanov I.V., Burmistrov N.A. et al. A new spring durum wheat variety ‘Tamara’ as a source of carotenoid pigments. *Grain Economy of Russia*. 2022;(3):51-56. [in Russian] (Гапонов С.Н., Шутарева Г.И., Цетва Н.М., Цетва И.С., Милованов И.В., Бурмистров Н.А. и др. Новый сорт яровой твердой пшеницы Тамара – источник каротиноидных пигментов. *Зерновое хозяйство России*. 2022;(3):51-56). DOI: 10.31367/2079-8725-2022-81-3-51-56
- GOST ISO 21415-2-2019. Interstate standard. Wheat and wheat flour. Determination of gluten content. Part 2. Determination of wet gluten and gluten index by mechanical means. Moscow: Standartinform; 2020. [in Russian] (ГОСТ ISO 21415-2-2019. Межгосударственный стандарт. Пшеница и пшеничная мука. Определение содержания клейковины. Часть 2. Определение содержания сырой клейковины и индекса клейковины (глютен-индекса) механическим способом. Москва: Стандартинформ; 2020). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200166727/titles> [дата обращения: 06.04.2023].
- Ilyina L.G. Breeding of Saratov spring wheats (Seleksiya saratovskikh yarovykh pshenits). Saratov: Saratov University; 1996. [in Russian] (Ильина Л.Г. Селекция саратовских яровых пшениц. Саратов: Саратовский университет; 1996).
- McGregor R. Training food: Get the fuel you need to achieve your goals – before, during and after exercise. London: Watkins Media Limited; 2015.

- Pavlova V.N., Karachenkova A.A. Assessment of changes in climate-based productivity of summer wheat in the main regions of its cultivation in Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2020;(4):68-87. [in Russian] (Павлова В.Н., Караченкова А.А. Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020;(4):68-87). DOI: 10.21513/2410-8758-2020-4-68-87
- Remeslo V.N. (ed.). Methods for assessing technological qualities of grain (Metody otsenki tekhnologicheskikh kachestv zerna). Moscow; 1971. [in Russian] (Методы оценки технологических качеств зерна / под ред. В.Н. Ремесло. Москва; 1971).
- Vasilchuk N.S. Spring durum wheat breeding (Seleksiya yarovoy tverdoy pshenitsy). Saratov: Novaya gazeta; 2001. [in Russian] (Васильчук Н.С. Селекция яровой твердой пшеницы. Саратов: Новая газета; 2001).
- Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. On the dynamics of agroclimatic indicators of sowing conditions, wintering and harvest formation of the main cereal crops (O dinamike agroklimaticheskikh pokazateley usloviy seva, zimovki i formirovaniya urozhaya osnovnykh zernovykh kultur). *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*. 2016;(360):45-78. [in Russian] (Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур. *Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2016;(360):45-78).
- Walsh D.E. Measurement of spaghetti color. *The Macaroni Journal*. 1970;52(4):20-22.
- Zykin V.A., Belan I.A., Yusov V.S., Korneva S.P. Methods for calculating the environmental plasticity of agricultural plants (Metodiki rascheta ekologicheskoy plastichnosti selskokhozyaystvennykh rasteniy). Omsk: Omsk State Agrarian University; 2008. [in Russian] (Зыкин В.А., Белан И.А., Юсов В.С., Корнева С.П. Методики расчета экологической пластичности сельскохозяйственных растений. Омск: Омский государственный аграрный университет; 2008).

Информация об авторах

Сергей Николаевич Гапонов, кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, raiser_saratov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8138-5955>

Галина Ивановна Шутарева, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, miss.shutik2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1159-2892>

Наталья Михайловна Цетва, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, natacetva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9042-0831>

Иван Сергеевич Цетва, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, tse2van@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0539-9482>

Иван Владимирович Милованов, научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, Miliv13@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4569-0300>

Никита Андреевич Бурмистров, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, kitbur_ka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6094-1783>

Елена Сергеевна Жиганова, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, alenash89@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1551-0084>

Нина Сергеевна Соловова, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, nsolovova@list.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3784-8547>

Information about the authors

Sergey N. Gaponov, Cand. Sci. (Agriculture), Director, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulai-kova St., Saratov 410010, Russia, raiser_saratov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8138-5955>

Galina I. Shutareva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, miss.shutik2010@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1159-2892>

Natalia M. Tsetva, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, natacetva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9042-0831>

Ivan S. Tsetva, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, tse2van@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0539-9482>

Ivan V. Milovanov, Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, Miliv13@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4569-0300>

Nikita A. Burmistrov, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, kitbur_ka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6094-1783>

Elena S. Zhiganova, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, alenash89@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1551-0084>

Nina S. Solovova, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, nsolovova@list.ru, <https://orcid.org/0009-0004-3784-8547>

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 26.05.2023; одобрена после рецензирования 11.09.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 26.05.2023; approved after reviewing on 11.09.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

Обзорная статья

УДК 634.8:575.1

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-191-211



Коллекция ВИР и гербарий ВИР (WIR) для сохранения, расширения и использования генетического разнообразия винограда

М. М. Агаханов¹, Л. В. Багмет², Н. Г. Тихонова², М. В. Ерастенкова², Е. Н. Кислин², Ю. В. Ухатова^{2,3}, Е. К. Хлесткина^{2,3}

¹ Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Волгоградская опытная станция – филиал ВИР, Краснослободск, Россия

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

³ Научно-технологический университет «Сирiuс», Центр генетики и наук о жизни, Краснодарский край, Россия

Автор, ответственный за переписку: Магамедгусейн Магамедганифович Агаханов, m.agahanov@vir.nw.ru

Научная деятельность по совершенствованию стандартов систематизации сбора и хранения ценных образцов генетических ресурсов и информации о них имеет сегодня ключевое значение для успешного развития мирового виноградарства в свете вызовов, возникших в отрасли в связи с распространением болезней винограда и меняющимися климатическими условиями. В обзоре кратко охарактеризован мировой генофонд винограда, описаны подходы к его сохранению, в том числе к базовому и дублетному хранению, состояние и перспективы развития методов сохранения *in vitro* и в криоколлекциях. Дана оценка генетическому потенциалу диких родичей винограда с акцентом на значение конкретных видов в качестве источников генов устойчивости к факторам биотического и абиотического стрессов. Рассмотрены достижения в применении технологий генетического редактирования для повышения устойчивости винограда к болезням. Отмечено, что в настоящее время в этом направлении применяется преимущественно нокаут генов, обеспечивающих восприимчивость культурного винограда к болезням, тогда как в дальнейшем наибольший потенциал имеет внесение при помощи редактирования направленных изменений в гены культурного винограда на основе знаний о генах устойчивости диких родичей, что требует активного изучения последних при помощи современных методов прямой и обратной генетики. В контексте вопросов сохранения и расширения генетического разнообразия винограда на современном технологическом этапе детально проанализированы состояние и значение коллекции ВИР и гербария ВИР (WIR). Отмечена важность аутентификации образцов винограда и роли, которая отведена в свете решения этих задач гербария винограда ВИР – уникальному собранию физических носителей эталонной генетической информации об отечественном коллекционном генофонде винограда. Обозначены перспективные направления развития гербария ВИР в связи с созданием и хранением в нем номенклатурных стандартов отечественных сортов.

Ключевые слова: генетические ресурсы растений, *Vitis L.*, сохранение *ex situ* и *in vitro*, криохранилище, генетическая структура коллекции, гены устойчивости

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 21-66-00012 «Создание с использованием генетических технологий и изучение новых линий растений, адаптированных к меняющимся условиям окружающей среды, обладающих повышенной продуктивностью и диетической ценностью». Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Агаханов М.М., Багмет Л.В., Тихонова Н.Г., Ерастенкова М.В., Кислин Е.Н., Ухатова Ю.В., Хлесткина Е.К. Коллекция ВИР и гербарий ВИР (WIR) для сохранения, расширения и использования генетического разнообразия винограда. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):191-211. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-191-211

SURVEYS

Review article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-191-211

The plant germplasm and herbarium (WIR) collections maintained at VIR as contributors to grape genetic diversity conservation, expansion and utilization

Magamedgusein M. Agakhanov¹, Larisa V. Bagmet², Nadezhda G. Tikhonova², Mariya V. Erastenkova², Evgeny N. Kislin², Yulia V. Ukhatova^{2,3}, Elena K. Khlestkina^{2,3}

¹ N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Volgograd Experiment Station of VIR, Krasnoslobodsk, Russia

² N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia

³ Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, Krasnodar Territory, Russia

Corresponding author: Magamedgusein M. Agakhanov, m.agahanov@vir.nw.ru

Improving the standards of collecting and maintaining valuable genetic resources accessions and information about them is currently of crucial importance for the successful development of the world viticulture in the light of the challenges caused by the spread of grape diseases and climate change. This review briefly characterizes the global grapevine gene pool, approaches to its conservation, including base and duplicate conservation techniques, and the current status and prospects of the progress in *in vitro* and cryogenic preservation methods. The genetic potential of grape wild relatives is assessed focusing on particular species as sources of resistance genes to biotic and abiotic stressors. Achievements in the application of gene editing technologies to increase grape resistance to diseases are discussed. It is noted that a common practice at this stage is to knock out the genes responsible for grapevine susceptibility to diseases, whereas a more advantageous approach in the future will be to make targeted changes in the grape genome based on the knowledge of resistance genes in its wild relatives. Therefore, grape wild relatives need to be studied thoroughly using modern methods of forward and reverse genetics. Regarding the issues of grape genetic diversity conservation and expansion at the current technological stage, the status and significance of the plant germplasm and herbarium (WIR) collections held by VIR are scrutinized in detail. Authentication of grape germplasm accessions is marked as important, along with the role of the WIR herbarium, a unique collection incorporating physical carriers of reference genetic information on the national grapevine gene pool. Promising trends in the development of the WIR herbarium are outlined in connection with the establishment and preservation of nomenclature standards for domestic grape cultivars.

Keywords: plant genetic resources, *Vitis* L., herbarium, *ex situ* and *in vitro* conservation, cryopreservation, genetic structure, resistance genes

Acknowledgements: this research was supported by the Russian Science Foundation under Project No. 21-66-00012 “The development with genetic technologies and the study of new plant lines adapted to changing environmental conditions, with increased productivity and dietary value”.

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

For citation: Agakhanov M.M., Bagmet L.V., Tikhonova N.G., Erastenkova M.V., Kislin E.N., Ukhatova Yu.V., Khlestkina E.K. The plant germplasm and herbarium (WIR) collections maintained at VIR as contributors to grape genetic diversity conservation, expansion and utilization. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):191-211. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-191-211

Культура винограда (*Vitis L.*) занимает одно из лидирующих положений в группе плодовых, ягодных культур и винограда как по занимаемым площадям, так и по валовому сбору свежей продукции (FAOSTAT..., 2022). Плоды винограда не только являются основным источником сырья для виноделия, но и широко используются в пищевой промышленности как в свежем виде, так и для переработки.

Длительное возделывание винограда на одних и тех же территориях в течение многих столетий содействовало развитию патогенного фона. Виноград поражается различными фитопатогенами (грибы, бактерии, вирусы, виоиды, фитоплазмы). За последние 70 лет на виноградниках в нашей стране выявили более 200 видов вредителей и возбудителей болезней. За этот период к числу доминирующих и основных относили от 10–15 до 20–30 видов. Среди наиболее опасных грибных патогенов – оидиум (*Uncinula necator* Burill.), милдью (*Plasmopara viticola* Berl.), гнили (*Botrytis cinerea* Pers., *Coniothyrium diplodiella* Sacc., *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp. и др.), фомопсис (*Phomopsis viticola* Sacc.), фузариозы (*Fusarium sporotrichioides* Sherb., *F. chlamydosporum* Woll. et Rein., *F. moniliforme* Sheld., *F. oxysporum* Schlecht.), антракноз (*Gloeosporium ampelophagum* Sacc.). Ежегодные потери урожая винограда от вредителей и болезней составляют не менее 30% в мире. В России в отдельные годы отмечены потери в 50% и более (Talash, Troshin, 2012; Úrbez-Torres et al., 2013).

В настоящее время производство винограда сопряжено с большим количеством химических обработок за сезон, остро стоят вопросы повышения генетической устойчивости винограда и эффективного улучшения качества продукции винограда в целом. Эти задачи решаются как при помощи традиционной селекции, так и с применением современных генетических технологий. Перечисленные подходы базируются на совокупности знаний о культуре винограда, генерация которых осуществляется в первую очередь на основе фундаментальных исследований ампелографических коллекций. Огромное значение имеют результаты этих исследований, такие как:

- выделение источников ценных признаков для использования в комбинационной селекции в качестве родительских форм;
- выявление генов, контролирующих хозяйственно ценные признаки винограда;
- создание доноров ценных генов, в том числе путем геномного редактирования, которое рассматривается как способ направленного мутагенеза и расширения генетического разнообразия.

Особенности сохранения ампелографических коллекций и документирования генетического разнообразия винограда также требуют проведения фундаментальных исследований.

Цель настоящего обзора – проанализировать состояние и значение коллекции генетических ресурсов растений ВИР¹ и гербария ВИР² в контексте вопросов сохранения и расширения генетического разнообразия винограда на современном технологическом этапе.

Мировой генофонд винограда и подходы к его сохранению

Наибольшее внимание сохранению и приумножению генетического потенциала винограда уделяется в России, США, Германии, Франции, Италии, Испании, Индии, Молдавии. Следует отметить, что в большинстве стран сохраняется только одна ампелографическая коллекция. В России же на текущий момент существует несколько коллекций, в которых часть образцов дублируется (рис. 1).

Самыми крупными ампелографическими коллекциями в России являются Анапская коллекция СКФНЦСВВ (5001 обр.) и коллекция ВНИИВиВ «Магарач» (4120 обр.). Эти коллекции входят в число крупнейших в мире наряду с ампелографическими коллекциями Франции, США и Германии (Ilnitskaya, Makarkina, 2016). Ампелографические коллекции Всероссийского НИИ виноградарства и виноделия им. Я.И. Потопенко и Всероссийского института генетических ресурсов имени Н.И. Вавилова включают в себя 1200 и 1247 образцов соответственно.

Основным способом сохранения образцов винограда в мире является сохранение *ex situ*. Генотипы винограда обладают различной степенью устойчивости к фитопатогенам, вредителям, различными физиологическими особенностями, неоднородностью требований к температурному режиму и почвам. К примеру, сорта культурного винограда восточной группы при выращивании в условиях влажного климата Краснодарского края страдают от болезней и вредителей, а также от низких зимних температур (Kislin et al., 2015). С другой стороны, образцы винограда, полученные при участии винограда амурского (*V. amurensis* Rupr.), в южных регионах страдают от короткого периода покоя этого вида, в результате чего при постоянных зимних оттепелях глазки растений начинают преждевременно прорастать и затем повреждаются возвратными заморозками (Kislin et al., 2015). Для снижения рисков потерь генофонда при содержании коллекции необходимо подбирать оптимальные эколого-географические условия для конкретных генотипов, вследствие чего сохранение и поддержание в коллекции *ex situ* является довольно сложным и дорогостоящим способом (Engelmann, 1997; Pathirana et al., 2015; Gisbert et al., 2018).

Современные подходы к сохранению генофонда винограда включают методы *in vitro* и криосохранение; их применяют для создания дублетных коллекций в контролируемых условиях с целью гарантированного сохранения зародышевой плазмы (гермоплазмы). Так, в Национальном хранилище клональной зародышевой плазмы плодовых, орехоплодных культур и винограда Службы сельскохозяйственных исследований Министерства сельского хозяйства США (USDA-ARS) в Дэвисе (Калифорния, США) поддерживается одна из самых богатых по видовому составу коллекция рода *Vitis* в мире (42 таксона), где сосредоточены 3649 уникальных образцов винограда, которые содержатся и в дублетных коллекциях – полевой и *in vitro* (Prins et al., 2021).

Сохранение генотипов *in vitro* представляет собой альтернативу полевым коллекциям для кратковремен-

¹ Коллекция мировых генетических ресурсов культурных растений и их диких родичей (коллекция ВИР) – одна из крупнейших в мире по ботаническому, генетическому, географическому и экологическому разнообразию входящих в нее образцов (Устав ВИР, стр. 4, <http://www.vir.nw.ru/wp-content/uploads/2023/10/Ustav-VIR.pdf>).

² Гербарная коллекция «Гербарий культурных растений мира,

их диких родичей и сорных растений Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова» (гербарий ВИР) – один из крупнейших в мире гербариев, специализирующихся на возделываемых растениях, соответствующий статусу специализированного гербария мирового значения (Устав ВИР, стр. 4, <http://www.vir.nw.ru/wp-content/uploads/2023/10/Ustav-VIR.pdf>).

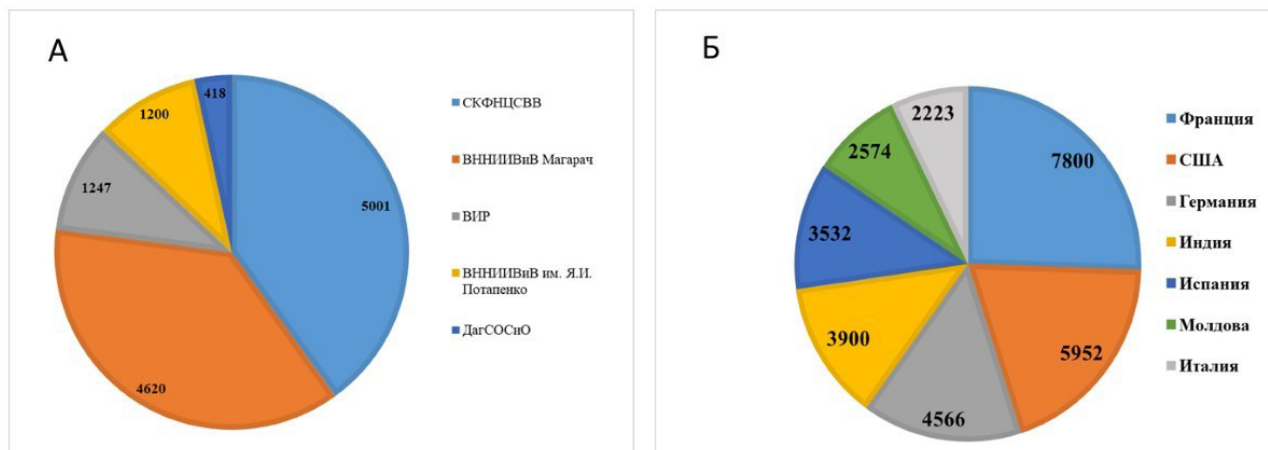


Рис. 1. А) Держатели основных коллекций винограда в России (СКФНЦСВВ – Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия; ВНИИВиВ Магарач – Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» Российской академии наук; ВИР – Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР); ВНИИВиВ им. Я.И. Потапенко – Всероссийский научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия имени Я.И. Потапенко; ДагСОСнО – Дагестанская селекционная опытная станция виноградарства и овощеводства – филиал СКФНЦСВВ).

Б) Крупнейшие мировые коллекции винограда на 2022 год (Франция – INRA, Montpellier; США – University of Florida; Индия – Agrarian Institute, Bangalore; Германия – Institut für Rebenzüchtung Geilweilerhof; Испания – IMIDRA; Молдова – Institut National de la Vigne et du Vin)

Fig. 1. A) Holders of the main grape collections in Russia (СКФНЦСВВ – North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making; ВНИИВиВ Магарач – All-Russian National Research Institute of Viticulture and Winemaking “Magarach” of the Russian Academy of Sciences; ВИР – N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR); ВНИИВиВ им. Я.И. Потапенко – All-Russian Research Institute of Viticulture and Winemaking named after Ya.I. Potapenko; ДагСОСнО – Dagestan Breeding Experimental Station of Viticulture and Vegetable Growing, branch of the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making).

B) The world’s largest grape collections for 2022 (Франция – France: INRA, Montpellier; США – USA: University of Florida; Индия – India: Agrarian Institute, Bangalore; Германия – Germany: Institut für Rebenzüchtung Geilweilerhof; Испания – Spain: IMIDRA; Молдова – Moldova: Institut National de la Vigne et du Vin)

ного и среднесрочного хранения гермоплазмы (Barlass, Skene, 1980; Hassan et al., 2013; Hassanen et al., 2013; Maia et al., 2015). Методы *in vitro* играют важную роль в стратегии сохранения исчезающих видов (Blakesley et al., 1996). В частности, для сохранения редких видов винограда Бразилии были разработаны и апробированы методы проращивания семян, микроразмножения, соматического эмбриогенеза, культивирования соматических эмбрионов и культивирования каллуса (Pilatti et al., 2011). Среднесрочное хранение винограда методами *in vitro* позволяет хранить биологический материал от нескольких месяцев до 2-3 лет без пассажа, в зависимости от используемого метода и растительного материала (Cruz-Cruz et al., 2013). Вместе с этим использование данного метода позволяет получить оздоровленный от патогенов материал.

Получение оздоровленного материала решается различными методами: отбор и тестирование визуально здоровых растений, термо-, крио-, химио- и комплексная терапия, метод апикальных меристем (Abdullahi, Rott, 2007; Panattoni et al., 2007; Panattoni, Triolo, 2007; Křižan et al., 2009; Maliogka et al., 2009; Skiada et al., 2009). Поддержание коллекции *in vitro* трудоемко, требует профессиональных навыков, а также сопряжено с риском микробного загрязнения и генетической нестабильности (Kulus, Zalewska, 2014; Dalla Costa et al., 2019; Panis et al., 2020). В настоящее время в ВИР апробированы и усовершенствованы протоколы дублетного хранения вегетативно размножаемых культур *in vitro* (Dunaeva et al.,

2017; Ukhatoeva et al., 2017; Ukhatoeva, 2017; Bepalova et al., 2019).

В последнее десятилетие в мире активно разрабатываются методы длительного хранения. Для вегетативно размножаемых культур криоконсервация является единственным доступным методом, обеспечивающим безопасное и рентабельное долгосрочное хранение зародышевой плазмы (Engelmann, 2011). Протоколы долгосрочного хранения разработаны и внедрены для разных представителей данной группы культур, в том числе и для винограда (Kim et al., 2012; Keller et al., 2016; Jenderek, Reed, 2017; Vollmer et al., 2017; Wang et al., 2018; Agrawal et al., 2019; Malik, Chaudhury, 2019; Panis, 2019; Panis et al., 2020;). Несмотря на то что метод криоконсервации винограда был описан еще в 1990-е годы, широкое распространение он получил только в настоящее время (Bi et al., 2018; Volk et al., 2019; Bettoni et al., 2019, 2021; Verzhuk et al., 2022).

Генетический потенциал диких родичей винограда и технологии геномного редактирования для расширения генетического разнообразия винограда

Дикие родичи культурных растений являются ценным источником генов, связанных с адаптацией к болезням, вредителям и неблагоприятным условиям окружающей среды. Культурный виноград имеет довольно обширное межвидовое и внутривидовое разнообразие диких родичей.

Систематика рода *Vitis* наиболее полно была разработана в XIX веке французским ботаником Ж. Планшоном, который разбил род на две секции, рассматриваемые в настоящее время как два подрода: *Muscadinia* Planch. и *Euvitis* Planch., которые отличаются между собой по морфологическим признакам, биологическим свойствам, цитологическому строению (Negrul, 1946). Подрод *Muscadinia* более древнего происхождения, он включает 2 вида: *V. munsoniana* Sims. и *V. rotundifolia* Michx. с числом хромосом $2n = 40$; подрод *Euvitis* включает 68 видов с числом хромосом $2n = 38$ (Smirnov, 1987).

Виды винограда делятся на 3 группы по эколого-географическому происхождению (Negrul, 1946).

1. *Восточно-азиатская группа* включает 39 видов, большинство из которых отличается повышенной морозоустойчивостью и резистентностью к грибным заболеваниям. Генотипы из восточно-азиатской группы (*V. amurensis*, *V. bhashinica* P.C. He, *V. davidii* (Rum.Cail.) Foenix, *V. libanensis* L.X. Niu., *V. piasezkii* Maim., *V. romanetii* Rom. Caill.) показывают генетическую устойчивость к оидиуму (Alleweldt, Possingham, 1988; Wan et al., 2015). Особенно ценен в этой группе *V. amurensis*, который распространен на Дальнем Востоке России и в северо-восточных провинциях Китая. Кроме того, у вида *V. amurensis* были обнаружены и картированы на хромосомах 14, 9, 14, 15 локусы количественных признаков устойчивости к ложной мучнистой росе *Rpv8*, *Rpv10*, *Rpv12*, *Rpv25* – *Rpv26* (Blasi et al., 2011; Schwander et al., 2012; Venuti et al., 2013; Song et al., 2018; Lin et al., 2019).

2. *Американская группа* насчитывает около 28 видов винограда. В естественных условиях они произрастают в лесах и по берегам рек от Мексики до Канады. Американские виды используются в селекции как источники устойчивости к болезням и вредителям, а также для выведения морозоустойчивых сортов (*V. riparia* Michx., *V. rupestris* Sheel, *V. berlandieri* Planc., *V. labrusca* L.). Локусы количественных признаков, отвечающих за устойчивость к ложной мучнистой росе на разных уровнях, были обнаружены: *Rpv1*, *Rpv2* – у вида *V. rotundifolia*, картированы на хромосомах 12 и 18 соответственно; *Rpv3* – у вида *V. rupestris*, картирован на хромосоме 18; *Rpv3*, *Rpv5*, *Rpv6* – *Rpv13*, *Rpv9* – у вида *V. riparia*, картированы на хромосомах 18, 9, 12, 7 соответственно; *Rpv14* – у вида *V. cinerea* (Engelm.) Engelm. ex Millardet на 5-й хромосоме; *Rpv3* – у видов *V. lincecumii*, *V. labrusca* на хромосоме 18. Локусы устойчивости к мучнистой росе *Ren5*, *Run1*, *Run2* были обнаружены и картированы соответственно на хромосомах 14, 12 и 18 у вида *V. rotundifolia*. Кроме того, у американских видов винограда были выявлены локусы устойчивости к виноградной филлоксеры: *Rdv1* – у вида *V. cinerea*, картирован на хромосоме 13; *Rdv6*, *Rdv7*, *Rdv8* – у вида *V. rotundifolia*, картированы на хромосомах 7, 8 и 10.

3. Название третьей группы довольно условно, так как *европейско-азиатский* виноград произрастает не только в Европе, но и в западной и восточной частях Азии и Африки. До сих пор систематики не пришли к единому мнению относительно таксономического статуса видов данной группы. Согласно точке зрения А. М. Негруля (Negrul, 1979), европейско-азиатская группа включает один вид *V. vinifera* L., который делится на два подвида: дикий виноград (*V. vinifera* subsp. *sylvestris* (Willd.) Hegi) и культурный виноград (*V. vinifera* subsp. *sativa* (DC.) Hegi) (Negrul, 1979; Pospisilova, 2012; Lin et al., 2019). С учетом особенностей морфологических и биологических признаков культурных сортов А. М. Негруль разработал клас-

сификацию сортов винограда вида *V. vinifera* (Negrul, 1946), в которой все культивируемые сорта разделены на три эколого-географические группы: восточная (*V. vinifera* convar. *orientalis* Negr.), западноевропейская (*V. vinifera* convar. *occidentalis* Negr.) и группа побережья Черного моря (*V. vinifera* convar. *pontica* Negr.). В 1970-е годы советским ампелографом П. М. Грамотенко выделена четвертая эколого-географическая группа: североафриканская (*V. vinifera* convar. *Nord-Africa* Gram.) (Smirnov, 1987).

Известно, что виды рода *Vitis* различного географического происхождения отличаются по восприимчивости к милдью (Boso et al., 2006, 2011; Boso, Kassemeyer, 2008; Cadle-Davidson, 2008). В геномах видов Северной Америки и Азии (*V. riparia*, *V. rupestris*, *V. aestivalis* Michx., *V. berlandieri*, *V. cinerea*, *V. rotundifolia*, *V. amurensis*) отмечена более высокая резистентность к милдью (Alleweldt, Possingham, 1988; Wan et al., 2015), чем у *V. vinifera*, возможно, из-за их более длительной коэволюции с патогеном (Wan et al., 2015; Il'nitskaya, Makarkina, 2016). Сорта винограда *V. vinifera* в основном восприимчивы к грибным болезням, низким температурам и вредителям, но иногда встречаются сорта, показывающие относительную устойчивость на высоком инфекционном фоне (Staudt, Kassemeyer, 1995; Cadle-Davidson, 2008). К примеру, в геноме сорта 'Шардоне' был выявлен локус *Rpv11* (картирован на хромосоме 5). У сорта 'Мгабошвили' были выявлены три новых геномных локуса, связанных с устойчивостью к *Plasmopara viticola*, – *Rpv29*, *Rpv30*, *Rpv31* (картированы на хромосомах 14, 3, 16). У сортов 'Кишмиш Ваткана', 'Шардоне' были выявлены локусы устойчивости к мучнистой росе – *Ren1*, *Sen1* (картированы на хромосомах 13 и 9) (Alleweldt, Possingham, 1988; Wan et al., 2015).

Поиск и валидация новых генов-кандидатов для признаков устойчивости винограда к болезням сегодня ведется при помощи методов обратной генетики и в частности геномного редактирования. Данный подход также рассматривается в качестве перспективного инструмента для ускоренного создания новых улучшенных форм винограда путем целенаправленного изменения генов.

Существующие нормы правового регулирования во многих странах приравнивают отредактированные (модифицированные, но при этом не трансгенные) растения к ГМО, поэтому их возделывание запрещено, хотя геномное редактирование как метод направленного мутагенеза является безопасным способом направленного мутагенеза. Данные запреты, однако, не распространяются на исследовательскую деятельность. Серьезная проблема, связанная с фитосанитарной ситуацией на виноградниках и потребностью в большом количестве химических обработок для защиты растений винограда от болезней, привела к активному развитию исследований в области генетического редактирования винограда, поиску генов-мишеней, редактирование которых потенциально может снизить восприимчивость к тому или иному заболеванию и повысить устойчивость. Первые работы в этом направлении касались нокаута известного гена *Mlo*, обеспечивающего восприимчивость к мучнистой росе. Ген *Mlo* консервативен и встречается у многих видов растений. Мутанты по гену *Mlo* были известны у ряда видов культурных растений задолго до появления генетического редактирования. Снижение восприимчивости к мучнистой росе у растений с дефектным геном *Mlo* заставляло искать способы нокаутить данный ген и у других видов. На винограде при помощи нокадауна нескольких копий генов *Mlo* путем применения техноло-

гии генного сайленсинга удалось показать снижение восприимчивости к мучнистой росе. Затем, в 2016 г., была показана эффективность нокаута гена *Mlo-1* винограда на протопластах без получения растений-трансформантов (Malnoy et al., 2016). Далее, в 2020 г., при помощи редактирования были получены растения, нокаутные по ряду копий гена *Mlo*, и показана повышенная устойчивость нокаутного растения по гену *Mlo3* (Wan et al., 2020).

Апробированы и другие мишени, нокаут которых связан с повышением устойчивости к мучнистой росе – ген *DMR6-2* (Scintilla et al., 2021) и *EDR2* (Yang et al., 2020).

Параллельно при помощи генетического редактирования велась работа по генам, связанным с восприимчивостью к серой гнили. В 2017 г. был произведен нокаут гена *WRKY52* и получены растения-трансформанты, на которых показано повышение устойчивости к данному патогену (Wang et al., 2017). Также выявлены и успешно нокаутированы гены, связанные с неспецифической восприимчивостью к грибным болезням (Olivares et al., 2021), и гены, связанные с развитием болезни Пирса и восприимчивостью к вирусу красной пятнистости (Sunitha, Rock, 2020).

Следует отметить, что перечисленные выше исследования проводились на трех модельных сортах. Хотя сколько-то широкое применение геномного редактирования для улучшения винограда по устойчивости к болезням и в целом для расширения генетического разнообразия *V. vinifera* возможно лишь при преодолении влияния генотипа на способность к соматическому эмбриогенезу (Nuzzo et al., 2022; Kovalenko et al., 2022).

Активное развитие инструментов геномного редактирования, при помощи которых можно было производить не только нокаут генов, но и изменение/восстановление функций генов (подходы, связанные с заменой отдельных нуклеотидов или заменой/инсерцией/делецией протяженных участков гена), дает потенциальную возможность вносить изменения в гены культурного винограда на основе знаний о генах устойчивости диких родичей. Для развития этих работ ключевое значение имеет секвенирование геномов диких родичей винограда и изучение структурно-функциональной организации генов устойчивости, выявленных у данных видов.

Значение диких родичей винограда для научных исследований и применения в селекции оценили на самых ранних этапах развития ампелографических коллекций, в том числе и при создании и развитии коллекции винограда ВИР.

Коллекция винограда ВИР: история развития, современное состояние и потенциал для селекции

Ампелографическая коллекция ВИР до 1991 г. включала 3270 образцов винограда (без учета дублетных – 2840 образцов). Она размещалась в разных природно-климатических условиях (Кавказ, Средняя Азия, Дальний Восток), что позволяло более объективно оценивать реакцию генотипов на различные условия внешней среды (Ampelography of the USSR..., 1984; Savin, 1990). Коллекция Среднеазиатской опытной станции ВИР (позднее – Среднеазиатского филиала ВИР) насчитывала 1625 образцов винограда, Туркменской опытной станции ВИР – 1040, Дальневосточной опытной станции ВИР – 800, Дагестанской опытной станции ВИР – 450, Крымской опытно-селекционной станции ВИР – 600 образцов (Kislin et al., 2015).

Первая попытка создания ампелографической коллекции в Абхазии была предпринята в 1894 г., когда в Сухуми была организована Сухумская сельскохозяйственная станция, директором которой стал В. В. Маркович (Chamagua, 1968). Там собрали богатейший ассортимент местных и иностранных сортов, однако коллекция была выкорчевана по требованию антифиллоксерного комитета (Markovich, 1911). В 1913 г. сотрудники станции zaloжили плантацию винограда столовых и технических интродуцированных сортов в имении Н. Смецкого. При этом долгое время преодолевалось непонимание властями важности данной культуры в регионе (Ayba, 2019). Одновременно с существованием станции, в 1926 г. организуется Сухумское отделение ВИР, в дальнейшем преобразованное в Сухумскую опытную станцию субтропических культур ВИР. В первый же год открытия Сухумское отделение ВИР получило в свое владение имение Н. Смецкого с плантацией винограда (Khvatysh, 1985). Большая закладка коллекционных и маточных садов аборигенных сортов винограда начата на Сухумской станции в 1958 г. по инициативе старшего научного сотрудника станции Евгения Ильича Чамагуа. С 1958 по 1961 г. была заложена коллекция, насчитывающая 67 сортов (Sukhumi Experiment Station..., 1964). Однако в связи со скоропостижной кончиной Евгения Ильича работы по винограду были прекращены. Помимо этого, в конце 1960-х годов сужается ассортимент изучаемых культур станции. Принято решение сосредоточиться на основных производственных культурах влажных субтропиков. К началу 1980-х годов коллекция винограда на станции была утрачена. В опубликованной в 1985 г. монографии, посвященной Сухумской станции и ее коллекции, виноград не упоминается (Khvatysh, 1985).

Ампелографическая коллекция Туркменской опытной станции ВИР имела большое количество форм, собранных в ущельях Западного Копетдага. За годы существования ТОС ВИР под руководством В. А. Носульчака была создана крупная коллекция винограда – 1040 образцов (1995 г.). Значительную часть коллекции представляли местные аборигенные сорта из советских республик Средней Азии. К ним, например, относятся такие сорта, как 'Якдона Узбекская', 'Сурхак Белый' и 'Сурхак Рассеченнолистный', 'Халили Дели', 'Кизил Сапак', 'Эрта Пишар', 'Оли Коки', 'Нулизок', 'Ишакки', 'Каду Хусайне', 'Кундузи', 'Калай Заг', 'Джаути', 'Бидона', 'Кизил Узюм Канибаданский', 'Кара Узюм Ашхабадский' и др. Из новых на то время сортов коллекцию пополнили 'Дружба', 'Бессемянный Ранний', 'Кишмиш ВИР' и ряд других. В коллекцию были привлечены сорта из Турции: 'Чауш Белый' и 'Чауш Розовый'.

В ходе экспедиций по Средней Азии обнаружили перспективные для селекции формы винограда, обладающие целым комплексом полезных свойств. В. А. Носульчак, возглавлявший Туркменскую опытную станцию ВИР, произвел отбор ценных элитных форм винограда, представляющих особую ценность. К ним относятся: 'Кишмиш Крупный Дайна', 'Кизил Бидона', 'Бахчи Длинный', 'Тайфи Красный', 'Дорои Красный Мужской' и др. Ряд форм обладают весьма ценным качеством – быстрой скоростью снижения уровня кислот в ягодах во время их созревания (Nosulchak, 2013).

Работа по сбору, сохранению, изучению сортов винограда и селекции проводилась на Среднеазиатской опытной станции ВИР с 1928 г. Создание коллекции шло под непосредственным руководством Н. И. Вавилова при участии А. М. Негруля и Я. Ф. Каца. В советское время,

в ходе многочисленных экспедиций 1950–1970-х годов на территориях Узбекистана, Таджикистана, Туркмении и Киргизии, удалось собрать в коллекцию почти все аборигенные сорта винограда Средней Азии (Pugachev, Jabbarov, 1974).

С распадом СССР генофонд винограда ВИР существенно сократился ввиду того, что значительная часть ампелографической коллекции оказалась за пределами России. В 1995 г. были организованы проблемная генетико-ампелографическая лаборатория при Северо-Кавказском зональном НИИ садоводства и виноградарства (СКЗИСиВ) и Анапский опорный пункт ВИР при Крымской опытно-селекционной станции ВИР, где под руководством В. А. Носульчака проводилась работа по интродукции винограда из бывших опытных станций ВИР (Узбекистан, Туркменистан) и ныне действующих в системе ВИР (Дагестан, Приморский край) (Kislin et al., 2015). В настоящее время в филиалах ВИР (на Дагестанской и Дальневосточной опытных станциях, Крымской опытно-селекционной станции) сохраняется около 1247 образцов винограда.

Относительно небольшая на сегодняшний день коллекция винограда ВИР отличается высокой долей ценного исходного материала для совершенствования конкурентоспособного сортимента, устойчивого к нестабильным погодным условиям и патогенам. Сохранение дикорастущих видов и межвидовых гибридов винограда особенно ценно, так как они являются источниками хозяйственно ценных признаков, таких как морозоустойчивость, устойчивость к наиболее опасным вредителям и грибным заболеваниям. Высокий потенциал в агроэкологических условиях конкретной области проявляют автохтонные (староместные) сорта; их использование в селекции на устойчивость к биотическим и абиотическим факторам среды также перспективно. В состав ампелографической коллекции ВИР входят более 400 сортов *V. vinifera* (около 50% которых – автохтонные), 52 сорта других видов рода *Vitis*, 262 сорта неизвестного происхождения, 509 межвидовых гибридов и 25 образцов дикорастущих форм (табл. 1). В межвидовой группе наибольшая доля приходится на сорта, полученные путем скрещивания: *V. vinifera* × ‘Seyve-Villard’, *V. vinifera* × *V. labrusca*, *V. vinifera* × *V. amurensis* и *V. vinifera* × *V. amurensis* × гибрид ‘Seyve-Villard’.

Для повышения надежности сохранения ценных форм винограда проводится создание и сохранение дублета в условиях *in vitro* и криохранения. В ВИР изучается эффективность криоконсервации различных образцов винограда, что позволяет в том числе выявить генотипические особенности посткриогенного восстановления разных образцов коллекции (Verzhuk et al., 2022). Созданные в результате работ по криоконсервации дублеты в виде сохраняемых в условиях глубокой заморозки апексов микропобегов с четким обозначением места хранения в конкретном криобанке являются неотъемлемой частью работы по совершенствованию стандартов систематизации сбора и хранения ценных образцов генетических ресурсов и информации о них.

Гербарий ВИР

Коллекция генетических ресурсов винограда ВИР претерпела существенные изменения с распадом СССР. Сейчас ценный для России генофонд сохраняется в не-

¹ ‘Seyve-Villard’ – сложный межвидовой гибрид (*V. vinifera* × *V. rupestris* × *V. labrusca*)

скольких крупных российских ампелографических коллекциях. В разных коллекциях присутствуют образцы с одинаковыми наименованиями. Необходима дальнейшая работа по инвентаризации и интеграции ампелографических коллекций России по сетевому принципу, и ключевым условием для этого является возможность аутентификации образцов. Аутентификация образцов актуальна в связи с тем, что со временем по ряду причин (технических и биологических) многие живые коллекционные образцы утрачивают свою однородность, может наблюдаться соматоклональная изменчивость, под одним наименованием могут встречаться генотипы, имеющие некоторые генетические отличия. Для аутентификации эталоном служат гербарные образцы как носители исходной генетической информации. Согласно правилам Международного кодекса номенклатуры культурных растений (Chukhina et al., 2021), номенклатурным стандартом назначается гербарный образец, максимально приближенный по времени к созданию сорта. Информация, хранящаяся в виде гербарного образца, не устаревает со временем и создает основу для проведения различных исследований, включая молекулярно-генетические.

Огромную ценность для решения задачи по аутентификации образцов отечественных ампелографических коллекций представляет собой гербарий винограда ВИР. На протяжении многих десятилетий велось документирование гербарных образцов как физических носителей генетической информации, содержащейся в отечественном генофонде винограда. Созданное ценное собрание эталонов для аутентификации – коллекция винограда в гербарии ВИР – насчитывает 1300 образцов, из которых около половины – культурные сорта. Помимо того что велась гербаризация образцов, сохранявшихся в живом виде в коллекции ВИР, создавались гербарные образцы коллекций винограда других отечественных учреждений. В частности, в гербарии ВИР имеются многочисленные сборы из Магарачской ампелографической коллекции, собранные с 1932 по 1981 г. (‘Аклык’, ‘Кишмиш Круглый’, ‘Корнишон Белый’, ‘Первенец Магарача’, ‘Тамагаз’, ‘Цимлянский Белый’, ‘Цимлянский Черный’, ‘Юбилейный Магарача’ и др.).

Всего в гербарии ВИР хранятся 28 видов рода *Vitis* в количестве 1644 образца, 4267 гербарных листов. В коллекции представлены все группы винограда по классификации А. М. Негруля (рис. 2).

Анализ гербария ВИР показал, что по происхождению почти две трети гербарной коллекции винограда – местные дикорастущие и культурные формы винограда Средней Азии и Кавказа (рис. 3).

Группа американских видов представлена в гербарной коллекции 16 видами в количестве 58 образцов, собранными с 1915 по 1983 г. Среди наиболее интересных можно назвать гербарные образцы гибрида *V. riparia* × *V. labrusca* (личный сбор И. В. Мичурина 1922 года) и видов *V. aestivalis*, *V. palmata* Vahl., *V. cinerea* и *V. vulpina* L., собранные в местах их естественного произрастания в Северной Америке, поступившие в коллекцию по обмену.

Группа восточно-азиатских видов представлена 9 видами в количестве 74 образца. Дикорастущие образцы собраны в основном экспедициями ВИР: 1 обр. *V. flexuosa* Thunb. (Е. Н. Синская, Япония, 1928); 1 обр. *V. davidii* (Д. И. Тупицын, Китай, 1956); 13 обр. *V. coignetiae* Pulliat ex Planch. (Т. Н. Ульянова, Сахалин, 1974, 1978, 1979); 22 обр. *V. amurensis* собраны в Приморском крае, Амурской области, Еврейской АО, КНДР (Г. Г. Тарасенко, 1935; М. П. Цербрий, 1935; Т. Н. Ульянова, 1970, 1972, 1977, 1980; Т. А. Си-

Таблица 1. Генетическое разнообразие коллекции винограда ВИР
(N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. Research report 2021)**Table 1. Genetic diversity of the grapevine germplasm collection at VIR**
(N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. Research report 2021)

Таксономический состав коллекции <i>Vitis</i>	Количество образцов					
	Крымская опытно-селекционная станция – филиал ВИР		Дагестанская опытная станция – филиал ВИР		Дальневосточная опытная станция – филиал ВИР	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Сорта <i>V. vinifera</i> L., в т. ч.:	181	26	218	63	7	3
автохтонные (староместные)	56		136		7	
селекционные (внутривидовые)	125		82		0	
Сорта других видов <i>Vitis</i>, в т. ч.:	34	5	7	2	11	5
<i>V. labrusca</i>	32		7		3	
<i>V. rupestris</i>	1		0		0	
<i>V. riparia</i>	1		0		2	
<i>V. amurensis</i>	0		0		6	
Межвидовые гибриды, в т. ч.:	304	44	74	20	131	61
<i>V. vinifera</i> × <i>V. amurensis</i>	37		19		81	
<i>V. vinifera</i> × <i>V. riparia</i>	1		0		2	
<i>V. riparia</i> × <i>V. amurensis</i>	0		0		2	
<i>V. vinifera</i> × <i>V. labrusca</i>	77		4		33	
<i>V. riparia</i> × <i>V. labrusca</i>	2		0		3	
<i>V. vinifera</i> × <i>V. rupestris</i>	2		0		0	
<i>V. vinifera</i> × <i>V. amurensis</i> × <i>V. labrusca</i>	6		3		1	
<i>V. vinifera</i> × <i>V. amurensis</i> × гибрид 'Seyve-Villard' × <i>V. berlandieri</i>	1		0		0	
<i>V. labrusca</i> × <i>V. vinifera</i> × <i>V. riparia</i>	9		0		0	
<i>V. labrusca</i> × <i>V. vinifera</i> × <i>V. lincecumii</i>	1		0		0	
<i>V. vinifera</i> × гибриды 'Seyve-Villard'	118		35		9	
<i>V. vinifera</i> × <i>V. riparia</i> × <i>V. rupestris</i>	2		0		0	
<i>V. vinifera</i> × <i>V. amurensis</i> × гибриды 'Seyve-Villard'	42		0		0	
<i>V. labrusca</i> × <i>V. vinifera</i> × гибриды 'Seyve-Villard'	4		13		0	
<i>V. labrusca</i> l. × <i>V. vinifera</i> × <i>V. riparia</i> × гибрид 'Seyve-Villard'	1		0		0	
<i>V. riparia</i> × гибрид 'Seyve-Villard'	1		0		0	
Сорта неизвестного происхождения	169	25	28	8	65	31
Дикорастущие виды	0		25	7	0	
Всего:	688	100	352	100	214	100

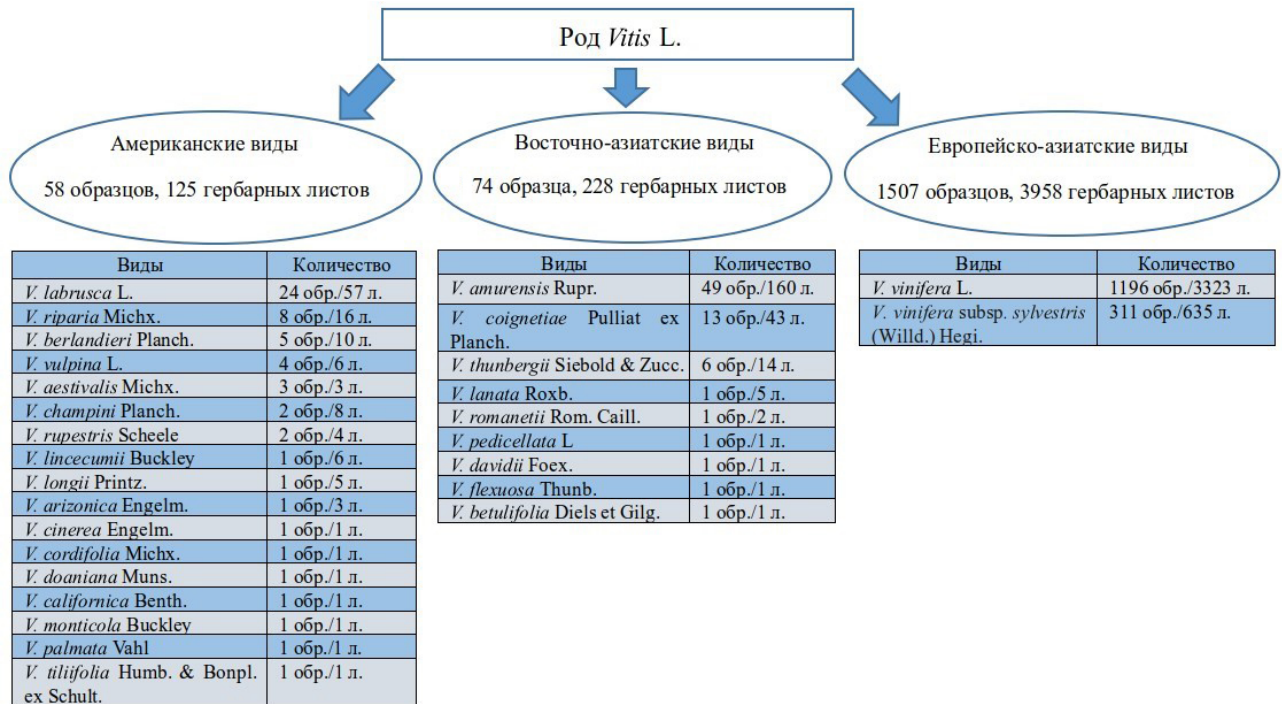


Рис. 2. Структура коллекции рода *Vitis* L. в гербарии ВИР (WIR)
Fig. 2. Structure of the *Vitis* L. collection in the VIR herbarium (WIR)

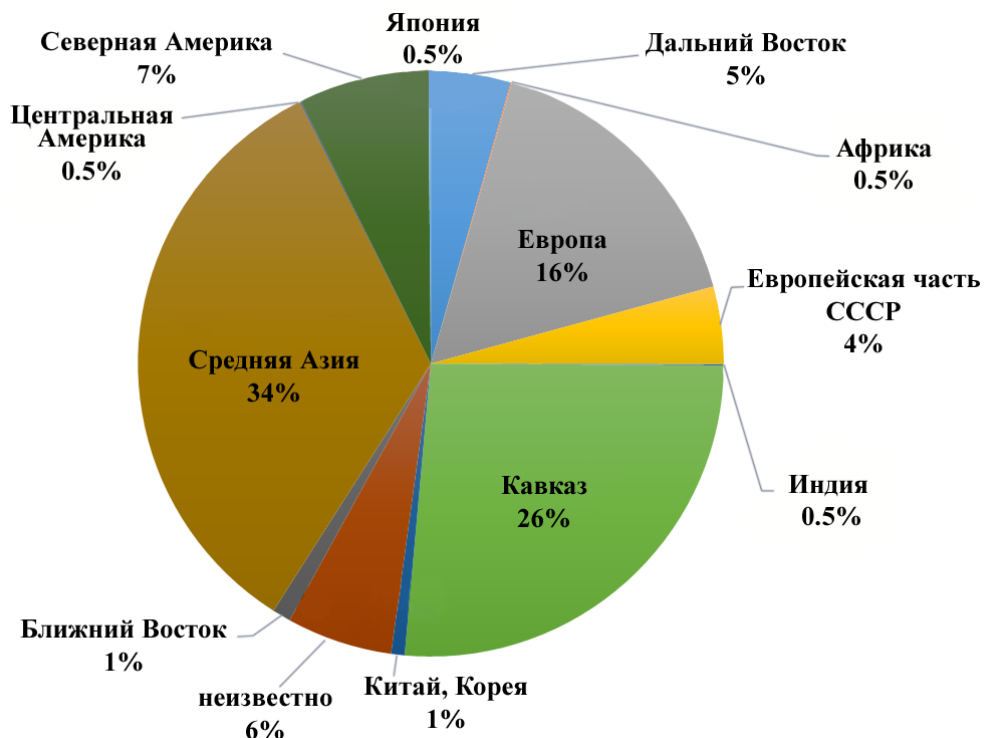


Рис. 3. Происхождение образцов винограда в гербарии ВИР (WIR)
Fig. 3. Origin of the grapevine specimens in the VIR herbarium (WIR)

ницына, 2005; Л. В. Багмет, 2012). Культурные образцы винограда амурского поступили из опытных станций ВИР (Сухумская ОС ВИР, 1927; Среднеазиатская ОС ВИР, 1935; Дальневосточная ОС ВИР, 1970, 1983), Каменно-Степной опытной станции им. В. В. Докучаева (1927), Куйбышевского ботанического сада (1954). Остальные виды этой группы собраны на Братцевской и Сухумской опытных станциях в 1921 г., Среднеазиатской опытной станции в 1931 и 1966 г. (*V. betulifolia* Diels et Gilg., *V. lanata* Roxb., *V. pedicellata* L., *V. romanetii*, *V. thunbergii* Siebold & Zucc.).

Единственный представитель европейско-азиатской группы *V. vinifera* со своими подвидами насчитывает в гербарии ВИР 1507 обр., 3958 гербарных листов.

V. vinifera subsp. *sylvestris* (Willd.) Hegi (*V. sylvestris* C. C. Gmel.) – виноград лесной. Включен в Красные книги Республик Адыгея, Ингушетия, Карачаево-Черкесия, Кабардино-Балкария, Северная Осетия, Чеченской Республики, Краснодарского и Ставропольского краев. В коллекции 311 образцов в количестве 635 листов. Самый старый сбор датируется 1888 годом (Австрия). Большая часть коллекции собрана на Кавказе (255 обр. / 544 листа), 41 образец – среднеазиатского происхождения, в Крыму собраны 14 образцов. За небольшим исключением, коллекция состоит из сборов экспедиций ВИР. Более подробно анализ коллекции представлен в таблице 2.

Таблица 2. Состав коллекции *Vitis vinifera* L. subsp. *sylvestris* (Willd.) Hegi в гербарии ВИР (WIR)

Table 2. Composition of the *Vitis vinifera* L. subsp. *sylvestris* (Willd.) Hegi collection in the VIR herbarium (WIR)

Годы сбора	Количество образцов	Основные коллекторы	Места сбора
1	2	3	4
1888	1	J. Dorfler	Австрия
1924–1929	13	Л. Р. Алексеев, В. Васильев, Е. В. Вульф, С. А. Дзевановский	Крым
1928, 1929	3	П. А. Баранов	Туркменистан
1932	27	К. И. Фролова	Туркменистан
1935	12	И. Ф. Бахмайер	Краснодарский край
1936	12	И. Ф. Бахмайер	Азербайджан: Хачмасский район
1937	44	И. Ф. Бахмайер	Азербайджан: Кубинский район
1952	1	А. И. Шретер	Грузия, окр. Кутаиси
1958	1 1	С. А. Дзевановский Н. Загребина	Украина, Херсонская обл. Украина, Закарпатская обл.
1966	1	Н. И. Рябова	Среднеазиатская ОС ВИР
1968	2	Т. И. Жиленко	Туркменистан: Кара-Калинский район
1969	3	Ю. Д. Сосков	Азербайджан
1971	5	М. И. Власов, А. К. Станкевич, Н. А. Францкевич	Азербайджан: Геокчайский, Ленкоранский, Зангеланский районы, Нагорный Карабах
1973	4 4	Н. А. Францкевич, А. К. Станкевич, Т. Н. Леготина	Туркменистан: Кара-Калинский район Дагестан
1974	3 3	П. М. Пирмагомедов, А. К. Станкевич, Т. Н. Леготина	Азербайджан: Ахсуинский район Дагестан
1975	66	П. М. Пирмагомедов, А. М. Аджиев, Г. А. Мирзаферов	Азербайджан (35), Северная Осетия (2), Дагестан (24), Чечено-Ингушетия (5)
1976	66	П. М. Пирмагомедов, А. М. Аджиев, Г. А. Мирзаферов, С. А. Магомедов	Азербайджан (29), Армения (11), Грузия (5), Абхазия (2), Кабардино-Балкария (5), Дагестан (3), Северная Осетия (2), Чечено-Ингушетия (6), Краснодарский (1) и Ставропольский край (2)

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Годы сбора	Количество образцов	Основные коллекторы	Места сбора
1978	31	П. М. Пирмагомедов, А. М. Аджиев, С. А. Магомедов	Азербайджан (10), Грузия (2), Дагестан (15), Краснодарский край (4)
1980	3	Н. А. Францкевич	Туркменистан: Кара-Калинский район
1986	3	Е. А. Кортышева, Н. Н. Лунева, И. В. Сеферова	Азербайджан, Дагестан
1989	1	Н. М. Черноморская	Крым
1991	1	И. В. Сеферова	Дагестан

V. vinifera subsp. *sativa* (DC.) Hegi (*V. vinifera*) – виноград культурный. Основными объектами сохранения в гербарной коллекции ВИР являются сорта культурных растений. Именно культурный виноград составляет основную часть коллекции рода *Vitis* нашего гербария (1196 образцов, 3323 гербарных листа). Около 93% этого количества составляют сборы в культуре. Наиболее активно коллекция культурного винограда пополнялась в первой половине прошлого века, около 70% сборов датируются 1922–1940 гг. (табл. 3).

Самый старый гербарный лист собран в 1844 г. Ф. Коллати (рис. 4), который впервые в России предпринял попытку исследования вопроса о происхождении культурного винограда и классификации культурных сортов. Среди регионов происхождения образцов наиболее представлены Средняя Азия (450 обр.), Европа (230 обр.) и Кавказ (123 обр.).

Большая часть коллекции культурного винограда представлена сборами сотрудников, работавших в разные годы в ВИР (А. М. Аджиев, В. А. Арзуманов, И. Ф. Бахмайер, Е. В. Вульф, Р. Х. Гзириан, Т. Л. Герман, В. И. Дорофеев, А. Я. Зарецкий, Г. Л. Камахина, Я. Ф. Кац, Г. А. Мирзаферов, Н. И. Рябова, И. В. Сеферова, Е. Н. Синская, Г. М. Синькова, А. К. Станкевич, А. Стребкова, Г. Г. Тарасенко, Д. И. Тупицын, Т. Н. Ульянова, Н. А. Францкевич, К. И. Фролова и др.). Также среди коллекторов гербария винограда можно встретить фамилии известных ученых-ботаников (М. Г. Попов, Е. И. Исполатов, А. И. Мальцев, П. А. Баранов, И. А. Райкова, С. А. Дзевановский, И. В. Мичурин). Особую ценность представляют личные сборы А. М. Негруля (рис. 5) – исследователя и систематика винограда, возглавлявшего секцию виноградарства в ВИР с 1932 по 1950 г. Годы работы в ВИР были для Александра Михайловича очень плодотворными. Им проведены глубокие исследования в области теории и методики селекции винограда, продвижения промышленной культуры винограда в новые районы, практической селекции, изучения дикорастущего винограда и староместных сортов (Ryabova, Koshelev, 2017).

Сорта культурного винограда гербаризировались большей частью в ампелографических коллекциях. Более полно отражена в гербарии коллекция ВИР (318 сортов, 358 образцов, 977 листов) (рис. 6). На Крымской опытно-селекционной станции (1982) собрано 140 сортов (141 образец, 154 гербарных листа) из Европы, Молдовы, Украины, южной России, Кавказа, Средней Азии. На

Среднеазиатской опытной станции ВИР (1931, 1936, 1966, 1970) собрано 95 сортов европейского, среднеазиатского и кавказского происхождения (136 образцов, 638 гербарных листов). На Сухумской опытной станции ВИР (1927, 1928, 1931, 1970) собрано 73 сорта (75 образцов, 167 гербарных листов), из которых 64 образца – североамериканские сорта. На Кубанской опытной станции ВИР (1963) собран 61 сорт (62 образца, 62 гербарных листа) из Средней Азии, Европы, с Кавказа и Ближнего Востока. На Дальневосточной опытной станции ВИР (1983) собрано 7 образцов семи российских сортов (21 гербарный лист).

Также довольно обширно (307 сортов, 325 образцов, 963 гербарных листа) представлена в гербарии коллекция «Магарач»: 99 образцов с указанием места сбора: АК «Магарач» (1932, 1977, 1980) и 226 образцов с указанием места сбора: Крым (1898, 1899, 1926). Мы сочли возможным отнести и эти сборы к магарачской коллекции, так как в то время она была единственной в Крыму. Большая часть сборов – старые европейские и местные крымские сорта винограда.

Большинство дикорастущих образцов *V. vinifera* subsp. *sativa* собрано экспедициями ВИР. Первая экспедиция ВИР по сбору винограда была организована в 1927 г. П. А. Баранов и И. А. Райкова проводили обследование дикорастущего винограда Дарваза в горах Памиро-Алая (Таджикистан). В гербарии хранятся 8 образцов из этой экспедиции. Подробное обследование дикорастущего винограда Кавказа (Азербайджан, Армения, Грузия, Дагестан, Северная Осетия, Кабардино-Балкария, Чечено-Ингушетия, Краснодарский край) осуществлено под руководством П. М. Пирмагомедова в 1974–1976 и 1978 г. Собран 161 образец в количестве 358 листов.

Наиболее интересной частью коллекции культурного винограда являются староместные сорта, собранные как в местах их происхождения, так и в различных коллекциях. Большое количество среднеазиатских сортов (312 образцов, 923 гербарных листа) привезено из экспедиции ВИР по ампелографическому изучению местного винограда, работавшей в Средней Азии с 1928 по 1930 г. (М. Г. Попов, П. А. Баранов, К. А. Ватолкина, Р. Х. Гзириан, Я. Ф. Кац, М. И. Паройская, М. А. Тупиков).

Сравнительный анализ доступных баз данных некоторых крупнейших гербариев мира и России – гербария национального музея естественной истории, Париж, Франция (<https://science.mnhn.fr>); гербария Нью-Йорк-

Таблица 3. Состав коллекции *Vitis vinifera* L. subsp. *sativa* (DC.) Hegi в гербарии ВИР (WIR)
Table 3. Composition of the *Vitis vinifera* L. subsp. *sativa* (DC.) Hegi collection in the VIR herbarium (WIR)

Годы сбора	Количество образцов.	Основные коллекторы	Места сбора
1	2	3	4
1844	1	Ф. Коленати	Кавказ
1898	7	Мережковский	Крым (АК «Магарач»)
1899	16	Мережковский	Крым (АК «Магарач»)
1922	3	И. В. Мичурин	Мичуринский питомник
1926	204 3 1	В. Астахова С. А. Дзевановский А. И. Мальцев	Крым (АК «Магарач») Крым Азербайджан
1927	41 8 3 1	А. Я. Зарецкий П. А. Баранов, И. А. Райкова А. Стребкова М. Г. Попов	Сухумская ОС ВИР Таджикистан Азербайджан Узбекистан
1928	52 36 14 10 4 5	Р. Х. Гзириан К. Ватолкина И. А. Райкова М. И. Паройская М. Г. Попов П. А. Баранов	Узбекистан, Таджикистан Узбекистан Узбекистан Узбекистан, Сухумская ОС ВИР Узбекистан Туркменистан
1929	26 22 20 14 4 4 1	И. А. Райкова Р. Х. Гзириан М. И. Паройская К. Ватолкина А. Тупиков А. Калинина М. Г. Попов	Средняя Азия Узбекистан, Таджикистан Средняя Азия Средняя Азия Узбекистан Узбекистан Китай
1930	53 19 11 4 3 2 2 2	Р. Х. Гзириан И. А. Райкова Г. Батикян Я. Ф. Кац А. Калинина Е. И. Исполатов М. Г. Попов К. Ватолкина	Узбекистан Средняя Азия Армения Средняя Азия Узбекистан Краснодарский край Средняя Азия Средняя Азия
1931	24 15 39	Т. Е. Романова Р. Х. Гзириан Я. Ф. Кац	Сухумская ОС ВИР Дагестан Среднеазиатская ОС ВИР
1932	88 10	Я. Ф. Кац К. И. Фролова	АК «Магарач» Туркменистан
1935	3 2	И. Ф. Бахмайер Г. Г. Тарасенко	Краснодарский край Дальний Восток
1936	16 11	Я. Ф. Кац И. Ф. Бахмайер	Среднеазиатская ОС ВИР Азербайджан
1937	6 5	Я. Ф. Кац А. М. Негруль, Н. М. Павлова	Таджикистан Казахстан, Узбекистан
1940	1	Р. Х. Гзириан	Средняя Азия
1953	1	М. Меликишвили	Грузия
1957	5	Д. И. Тупицын	Китай
1963	62	Н. И. Рябова	Кубанская ОС ВИР

Таблица 3. Окончание

Table 3. The end

Годы сбора	Количество образцов.	Основные коллекторы	Места сбора
1966	22	Н. И. Рябова	Среднеазиатская ОС ВИР
1968	4	С. М. Мурадян, С. А. Погосян, В. В. Саркисян	Армения
1970	62 9	Н. И. Рябова Г. М. Синькова	Среднеазиатская ОС ВИР Сухумская ОС ВИР
1972	2 1 1	Н. А. Францевич М. И. Власов I. Kukkonen	Туркменистан Дагестан Пакистан
1973	2 1 1	Н. А. Францевич А. К. Станкевич, Т. Н. Леготина Г. Л. Камахина	Туркменистан Армения Узбекистан
1974	1	Н. А. Францевич	Туркменистан
1976	7 2	А. К. Станкевич, В. И. Дорофеев В. А. Арзуманов	Крым, Кавказ Узбекистан
1980	1	Н. А. Францевич	Туркменистан
1982	141	Т. Л. Герман	Крымская ОСС ВИР
1983	7	И. В. Сеферова	Дальневосточная опытная станция ВИР
неизвестен	1	Е. Н. Синская	Адыгея
1899–1980	47	неизвестен	Крым, Средняя Азия



Рис. 4. Гербарный образец винограда WIR-22547, 1844 год

Fig. 4. Grapevine herbarium specimen WIR-22547, 1844



Рис. 5. Гербарные сборы винограда А. М. Негруля, 1937 г.
Fig. 5. Grapevine herbarium specimens collected by A. M. Negrul, 1937

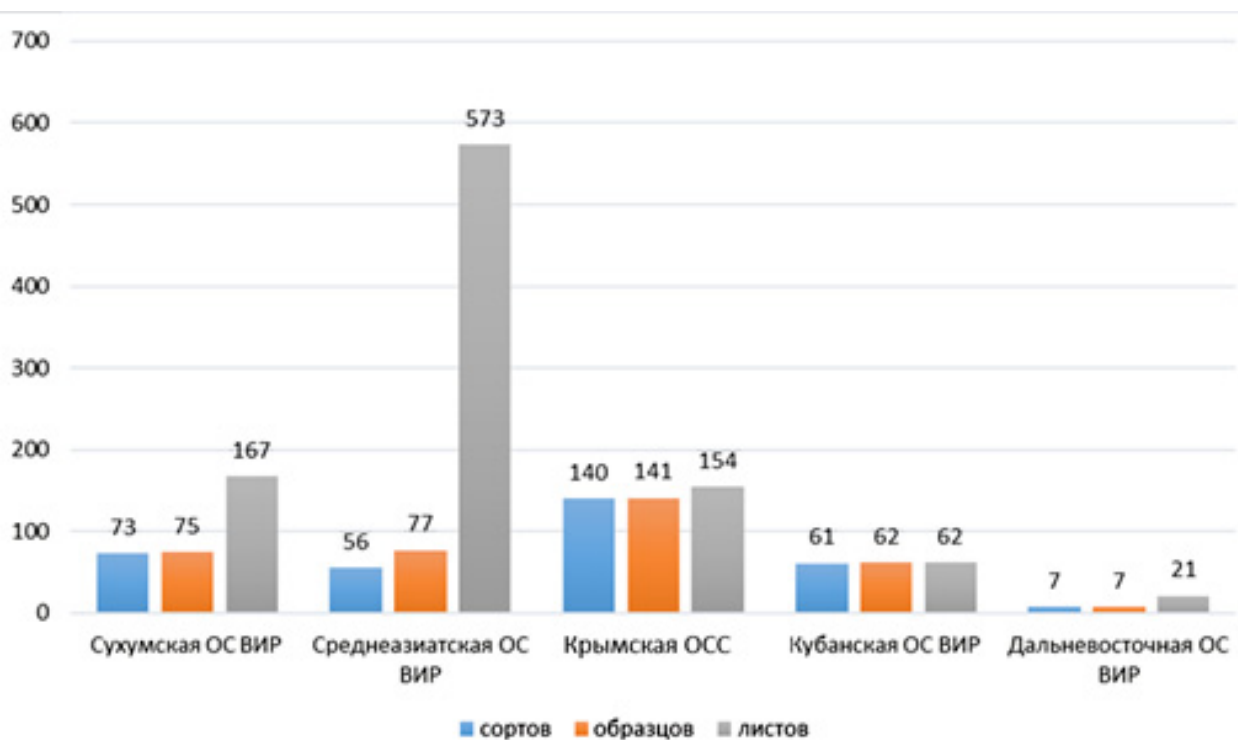


Рис. 6. Сборы культурного винограда на опытных станциях ВИР
Fig. 6. Collecting of grapevine cultivars at the experiment stations of VIR

ского ботанического сада, Нью-Йорк, США (<https://sweetgum.nybg.org>); гербария Королевских ботанических садов Кью, Ричмонд, Великобритания (<http://apps.kew.org>); гербария Миссурийского ботанического сада, Сент-Луис, США (<https://tropicos.org>); гербария Смитсоновского института, Вашингтон, США (<https://collections.nmnh.si.edu/search/botany>); гербария Шведского музея естественной истории, Стокгольм, Швеция (<https://herbarium.nrm.se>); гербария Московского государственного университета, Москва, Россия (<https://plant.depo.msu.ru>); гербария им. М. Г. Попова Центрального сибирского ботанического сада СО РАН, Новосибирск, Россия (https://csbg-nsk.ru/unu_herbarium) – показал, что в этих коллекциях очень бедно представлены виды рода *Vitis*: их доля от общего объема коллекции не превышает сотых долей процентов (табл. 4). Кроме того, нам не удалось найти ни одного образца с указанием сорта. В нашей гербарной коллекции хранятся 650 староместных и селекционных сортов винограда в количестве 935 образцов. Таким образом, гербарий ВИР (Гербарий культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений Всероссийского института генетических ресурсов имени Н.И. Вавилова) можно считать единственным, где сохраняется сортовая коллекция образцов культурного винограда.

Перспектива развития гербария ВИР связана с созданием и хранением в нем номенклатурных стандартов отечественных сортов. Номенклатурный стандарт – гербарный образец, который отражает таксономические признаки сорта, заверенный экспертом, законно опубликованный и бессрочно хранящийся в международно признанной научной гербарной коллекции. Изготовление номенклатурного стандарта осуществляется в соответствии с Международным кодексом номенклатуры культурных растений (Chukhina et al., 2021; International Code..., 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e, 2022).

В ВИР работа по созданию номенклатурных стандартов ведется с 2018 г. Номенклатурный стандарт представляет собой ценность для идентификации сорта, защиты авторских прав, защиты сорта от подделок и не санкционированных изменений генома (Gavrilenko, Chukhina, 2020; Khlestkina, Gavrilenko, 2020).

Заключение

Совершенствование стандартов систематизации сбора и хранения ценных образцов генетических ресурсов винограда и информации о них приобретает в настоящее время в меняющихся условиях окружающей среды

Таблица 4. Представленность культурного винограда в некоторых гербарных коллекциях мира

Table 4. Representation of cultivated grapes in some herbarium collections of the world

Наименование гербария	Общее количество сосудистых растений, (обр.)	Количество образцов рода <i>Vitis</i>	Количество образцов <i>Vitis vinifera</i> subsp. <i>sativa</i>	Количество образцов <i>Vitis vinifera</i> subsp. <i>sylvestris</i>
Гербарий культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR)	~ 170 000	1644	1196	311
Национальный музей естественной истории (PC)	~ 8000 000	175	64	6
Гербарий Нью-Йоркского Ботанического сада (NY)	7800 000	2408	15	
Гербарий Королевских ботанических садов Кью (K)	~ 7000 000	248	6	4
Гербарий Миссурийского ботанического сада (MO)	~ 6600 000	4698	114	2
Национальный гербарий США (US)	5100 000	33	0	0
Гербарий Шведского музея естественной истории (S)	2950 000	100	68	
Гербарий Московского государственного университета (MW)	1053 752	284	138	
Гербарий им. М. Г. Попова Центрального сибирского ботанического сада СО РАН (NSK)	249 146	17	3	0

и в условиях постоянно растущей фитопатогенной нагрузки критическое значение для развития виноградарства. Огромный потенциал в качестве источников генов устойчивости к факторам биотического и абиотического стресса имеют дикие родичи винограда. Серьезная проблема, связанная с фитосанитарной ситуацией на виноградниках и потребностью в большом количестве химических обработок для защиты растений винограда от болезней, привела к активному развитию в последние годы исследований в области генетического редактирования винограда, поиску генов-мишеней, нокаут которых потенциально может снизить восприимчивость к тому или иному заболеванию и повысить устойчивость. В дальнейшем наибольший потенциал имеет внесение при помощи редактирования направленных изменений в гены культурного винограда на основе знаний о генах устойчивости диких родичей. Это требует активное изучение диких родичей винограда с использованием современных методов прямой и обратной генетики. Для современных исследований в этом направлении возрастает актуальность коллекции винограда ВИР, в развитии которой особое внимание уделяется диким родичам и межвидовым гибридам.

Для повышения надежности сохранения ценных форм винограда в ВИР осуществляют создание и сохранение дублета в условиях *in vitro* и криохранения. Также особое внимание уделяют работе с информацией о генетических ресурсах и вопросам аутентификации образцов винограда. Важное значение в этом направлении имеет гербарий винограда ВИР – уникальное собрание физических носителей эталонной генетической информации об отечественном коллекционном генофонде винограда в разные периоды развития ампелографических коллекций, имеющихся в нашей стране. Перспективные направления развития гербария ВИР связаны с созданием и хранением в нем номенклатурных стандартов отечественных сортов, представляющих ценность для идентификации сортов, защиты авторских прав, защиты сортов от подделок и несанкционированных изменений генома.

References / Литература

- Abdullahi I., Rott M. Microarray immunoassay for the detection of grapevine and tree fruit viruses. *Journal of Virological Methods*. 2009;160(1-2):90-100. DOI: 10.1016/j.jviro.2009.04.027
- Agrawal A., Singh S., Vaidya Malhotra E., Meena D.P.S., Tyagi R. *In vitro* conservation and cryopreservation of clonally propagated horticultural species. In: P.E. Rajasekharan, V. Ramanatha Rao (eds). *Conservation and Utilization of Horticultural Genetic Resources*. Singapore: Springer; 2019. p.529–578. DOI: 10.1007/978-981-13-3669-0_18
- Alleweldt G., Possingham J.V. Progress in grapevine breeding. *Theoretical and Applied Genetics*. 1988;75:669-673. DOI: 10.1007/BF00265585
- Ampelography of the USSR. Domestic grape varieties (Ампелография СССР. Отечественные сорта винограда. Москва; 1984). [in Russian] (Ампелография СССР. Отечественные сорта винограда. Москва; 1984).
- Ayba L.Ya. At the origins of subtropical plant growing in Abkhazia. *Subtropical and Ornamental Horticulture*. 2019;(70):9-16. [in Russian] (Айба Л.Я. У истоков субтропического растениеводства в Абхазии. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2019;(70):9-16). DOI: 10.31360/2225-3068-2019-70-9-16
- Barlass M., Skene K.G.M. Studies on the fragmented shoot apex of grapevine: II. Factors affecting growth and differentiation *in vitro*. *Journal of Experimental Botany*. 1980;31(2):489-495. DOI: 10.1093/jxb/31.2.489
- Bespalova E.S., Ukhatoeva Yu.V., Volkova N.N., Oves E.V., Gaitova N.A., Gavrilenko T.A. Investigation of the post-cryogenic regeneration ability of potato varieties under different cultivation conditions. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(3):281-286. [in Russian] (Беспалова Е.С., Ухатова Ю.В., Волкова Н.Н., Овэс Е.В., Гаитова Н.А., Гавриленко Т.А. Изучение посткриогенного регенерационного потенциала сортов картофеля в разных условиях культивирования. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(3):281-286). DOI: 10.18699/VJ19.500
- Bettoni J.C., Kretschmar A.A., Bonnart R., Shepherd A., Volk G.M. Cryopreservation of 12 *Vitis* species using apical shoot tips derived from plants grown *in vitro*. *HortScience*. 2019;54(6):976-981. DOI: 10.21273/HORTSCI13958
- Bettoni J.C., Marković Z., Bi W., Volk G.M., Matsumoto T., Wang Q.C. Grapevine shoot tip cryopreservation and cryotherapy: secure storage of disease-free plants. *Plants*. 2021;10(10):2190. DOI: 10.3390/plants10102190
- Bi W.L., Hao X.Y., Cui Z.H., Volk G.M., Wang Q.C. Droplet-vitrification cryopreservation of *in vitro*-grown shoot tips of grapevine (*Vitis* spp.). *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2018;54(6):590-599. DOI: 10.1007/s11627-018-9931-0
- Blakesley D., Pask N., Henshaw G.G., Fay M.F. Biotechnology and the conservation of forest genetic resources: *in vitro* strategies and cryopreservation. *Plant Growth Regulation*. 1996;20(1):11-16. DOI: 10.1007/BF00024051
- Blasi P., Blanc S., Wiedemann-Merdinoglu S., Prado E., Rühl E.H., Mestre P. et al. Construction of a reference linkage map of *Vitis amurensis* and genetic mapping of Rpv8, a locus conferring resistance to grapevine downy mildew. *Theoretical and Applied Genetics*. 2011;123(1):43-53. DOI: 10.1007/s00122-011-1565-0
- Boso S., Alonso-Villaverde V., Gago P., Santiago J.L., Martínez M.C. Susceptibility of 44 grapevine (*Vitis vinifera* L.) varieties to downy mildew in the field. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2011;17(3):394-400. DOI: 10.1111/j.1755-0238.2011.00157.x
- Boso S., Kassemeyer H.H. Different susceptibility of European grapevine cultivars for downy mildew. *VITIS – Journal of Grapevine Research*. 2008;47(1):39-49. DOI: 10.5073/vitis.2008.47.39-49
- Boso S., Martínez M.C., Unger S., Kassemeyer H.H. Evaluation of foliar resistance to downy mildew in different cv. Albariño clones. *VITIS – Journal of Grapevine Research*. 2006;45(1):23-27. DOI: 10.5073/vitis.2006.45.23-27
- Cadle-Davidson L. Variation within and between *Vitis* spp. for foliar resistance to the downy mildew pathogen *Plasmopara viticola*. *Plant Disease*. 2008;92(11):1577-1584. DOI: 10.1094/PDIS-92-11-1577
- Central Siberian Botanical Garden SB RAS. Herbarium of Higher Plants, Lichens and Mushrooms: [website]. [in Russian] (Центральный сибирский ботанический сад СО РАН. Гербарий высших растений, лишайников и грибов: [сайт]). URL: https://csbg-nsk.ru/unu_herbarium [дата обращения: 22.06.2023].
- Chamagua E.I. Grapes of Abkhazia (Vinograd Abkhazii). Sukhumi: Alashara; 1968. [in Russian] (Чамагуа Е.И. Виноград Абхазии. Сухуми: Алашара; 1968).
- Chukhina I.G., Miftakhova S.R., Dorofeyev V.I. International Code of Nomenclature for Cultivated Plants: on the his-

- tory of the Russian translation. *Vavilovia*. 2021;4(1):48-54. [in Russian] [Чухина И.Г., Мифтахова С.Р., Дорофеев В.И. Международный кодекс номенклатуры культурных растений: к истории Русскоязычного перевода. *Vavilovia*. 2021;4(1):48-54]. DOI: 10.30901/2658-3860-2021-1-48-54
- Cruz-Cruz C.A., González-Arno M.T., Engelmann F. Biotechnology and conservation of plant biodiversity. *Resources*. 2013;2(2):73-95. DOI: 10.3390/resources2020073
- Dalla Costa L., Malnoy M., Lecourieux D. Deluc L., Ouaked-Lecourieux F., Thomas M.R. et al. The state-of-the-art of grapevine biotechnology and new breeding technologies (NBTS). *OENO One*. 2019;53(2):189-212. DOI: 10.20870/oeno-one.2019.53.2.2405
- Dunaeva S.E., Pendinen G.I., Antonova O.Yu., Shvachko N.A., Ukhatoeva 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 razmnzhayemykh 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].
- Engelmann F. *In vitro* conservation methods. In: J.A. Callow, B.V. Ford Lloyd, H.J. Newbury (eds). *Biotechnology and Plant Genetic Resources*. Oxford: CABI; 1997. p.119-162.
- Engelmann F. Use of biotechnologies for the conservation of plant biodiversity. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2011;47(1):5-16. DOI: 10.1007/s11627-010-9327-2
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture data. Rome: FAO; 2022. Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> [accessed June. 22, 2023].
- 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
- Gisbert C., Peiró R., Pedro T.S., Olmos A., Jiménez C., García J. Recovering ancient grapevine varieties: from genetic variability to *in vitro* conservation, a case study. In: A.M. Jordão, F. Cosme (eds). *Grapes and Wines – Advances in Production, Processing, Analysis and Valorization*. London: IntechOpen; 2018. p.3-21. DOI: 10.5772/intechopen.71133
- Hassan N.A., Gomma A.H., Shahin M.A., El Homosany A.A. *In vitro* storage and cryopreservation of some grape varieties. *Journal of Horticultural Science and Ornamental Plants*. 2013;5(3):183-193. DOI: 10.5829/idosi.jhsop.2013.5.3.1126
- Hassanen S.A., Abido A.I.A., Aly M.A.M., Rayan G.A. *In vitro* preservation of grapevine (*Vitis vinifera* L.) Muscat of Alexandria and Black Monukka cultivars as genetic resource. *African Journal of Basic and Applied Sciences*. 2013;5(2):55-63. DOI: 10.5829/idosi.ajbas.2013.5.2.23313
- Ilnitskaya E.T., Makarkina M.V. Application of DNA markers in molecular breeding and genetic studies of grapevine. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(4):528-536. [in Russian] [Ильницкая Е.Т., Макаркина М.В. Применение ДНК-маркеров в современных селекционно-генетических исследованиях винограда. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(4):528-536]. DOI: 10.18699/VJ16.163
- International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Preamble. Division I: Principles: [Translation from English]. *Vavilovia*. 2021a;4(1):55-59. [in Russian] [Международный кодекс номенклатуры культурных растений. Прембула. Часть I: Принципы: [перевод с английского языка]. *Vavilovia*. 2021a;4(1):55-59]. DOI: 10.30901/2658-3860-2021-1-55-59
- International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Preamble. Division I: Principles. I.G. Chukhina, S.R. Miftakhova, V.I. Dorofeyev (transl.). Transl. of: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021b;4(1):55-59. [in Russian] [Международный кодекс номенклатуры культурных растений. Прембула. Часть I: Принципы / перевод с английского И.Г. Чухина, С.Р. Мифтахова, В.И. Дорофеев. Пер. изд.: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021b;4(1):55-59]. DOI: 10.30901/2658-3860-2021-1-55-59
- International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Division II: Chapters I, II / I.G. Chukhina, S.R. Miftakhova, V.I. Dorofeyev (transl.). Transl. of: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021c;4(2):44-57. [in Russian] [Международный кодекс номенклатуры культурных растений. Часть II: Главы I, II / перевод с английского И.Г. Чухина, С.Р. Мифтахова, В.И. Дорофеев. Пер. изд.: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021c;4(2):44-57]. DOI: 10.30901/2658-3860-2021-2-44-57
- International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Division II: Chapters III–V. I.G. Chukhina, S.R. Miftakhova, V.I. Dorofeyev (transl.). Transl. of: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021d;4(3):40-57. [in Russian] [Международный кодекс номенклатуры культурных растений. Часть II: Главы III–V / перевод с английского И.Г. Чухина, С.Р. Мифтахова, В.И. Дорофеев. Пер. изд.: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021d;4(3):40-57]. DOI: 10.30901/2658-3860-2021-3-40-57
- International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Division II: Chapters VI–IX. I.G. Chukhina, S.R. Miftakhova, V.I. Dorofeyev (transl.). Transl. of: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021e;4(4):38-54. [in Russian] [Международный кодекс номенклатуры культурных растений. Часть II: Главы VI–IX / перевод с английского И.Г. Чухина, С.Р. Мифтахова, В.И. Дорофеев. Пер. изд.: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2021e;4(4):38-54]. DOI: 10.30901/2658-3860-2021-4-38-54
- International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Division III–VI, Appendix I–IX. I.G. Chukhina, S.R. Miftakhova, V.I. Dorofeyev (transl.). Transl. of: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I-XVII+1-190». *Vavilovia*. 2022;5(1):41-

70. [in Russian] (Международный кодекс номенклатуры культурных растений. Часть III–VI, Приложение I–IX / перевод с английского И.Г. Чухина, С.Р. Мифтахова, В.И. Дорофеев. Пер. изд.: «International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. Ed. 9. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:I–XVII+1–190». *Vavilovia*. 2022;5(1):41–70). DOI: 10.30901/2658-3860-2022-1-41-70
- Jenderek M.M., Reed B.M. Cryopreserved storage of clonal germplasm in the USDA National Plant Germplasm System. *In Vitro Cellular and Developmental Biology*. 2017;53(4):299–308. DOI: 10.1007/s11627-017-9828-3
- Keller E.R.J., Grübe M., Hajirezaei M.R., Melzer M., Mock H.P., Rolletschek H. et al. Experience in large-scale cryopreservation and links to applied research for safe storage of plant germplasm. *Acta Horticulturae*. 2016;1113:239–250. DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1113.36
- Khlestkina E.K., Gavrilenko T.A. Introductory article. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2020;3(3):4–5. [in Russian] (Хлесткина Е.К., Гавриленко Т.А. Вступительная статья. *Биотехнология и селекция растений*. 2020;3(3):4–5).
- Khvatysh G.A., Fogel A.I., Bokareva L.I. Sukhumi Experiment Station of Subtropical Crops, decorated with the Order of the Red Banner of Labor, affiliated to the N.I. Vavilov Research Institute of Plant Industry (Sukhumskaya ordena Trudovogo Krasnogo знамени opytная stantsiya subtropicheskikh kultur VNIIRA im. N.I. Vavilova). Sukhumi: Alashara; 1985. [in Russian] (Хватыш Г.А.; Фогель А.И., Бокарева Л.И. Сухумская орденa Трудового Красного знамени опытная станция субтропических культур ВНИИРА им. Н.И. Вавилова. Сухуми: Алашара; 1985).
- Kim H.N., Popova E., Shin D.J., Yi J.Y., Kim C.H., Yoon M.K. et al. Cryobanking of Korean *Allium* germplasm collections: results from a 10 year experience. *CryoLetters*. 2012;33(1):45–57.
- Kislin E.N., Nosulchak V.A., Dzyubenko N.I. Ampelographic collection of the Vavilov Institute: past, present and future. *Magarach. Viticulture and Winemaking*. 2015;(3):14–16. [in Russian] (Кислин Е.Н., Носульчак В.А., Дзюбенко Н.И. Ампелогографическая коллекция ВИР им. Н.И. Вавилова. Прошлое, настоящее и будущее. *Магарач. Виноградарство и виноделие*. 2015;(3):14–16).
- Kovalenko T.V., Tikhonova N.G., Khlestkina E.K., Ukhatoeva Yu.V. *In vitro* regeneration of grape. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2022;5(4):39–54. [in Russian] (Коваленко Т.В., Тихонова Н.Г., Хлесткина Е.К., Ухатова Ю.В. Регенерация винограда в культуре *in vitro*. *Биотехнология и селекция растений*. 2022;5(4):39–54). DOI: 10.30901/2658-6266-2022-4-01
- Křížan B., Ondrušiková E., Holleínová V., Moravcová K., Bláhová L. Elimination of *Grapevine fanleaf virus* in grapevine by *in vivo* and *in vitro* thermotherapy. *Horticultural Science*. 2009;36(3):105–108. DOI: 10.17221/37/2008-HORTSCI
- Kulus D., Zalewska M. Cryopreservation as a tool used in long-term storage of ornamental species – A review. *Scientia Horticulturae*. 2014;168:88–107. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.01.014
- Lin H., Leng H., Guo Y., Kondo S., Zhao Y., Shi G. et al. QTLs and candidate genes for downy mildew resistance conferred by interspecific grape (*V. vinifera* L. × *V. amurensis* Rupr.) crossing. *Scientia Horticulturae*. 2019;244:200–207. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.09.045
- Maia J.D.G., Camargo U.A., Tonietto J., Zanus M.C., Quecini V., Ferreira M.E. et al. Grapevine breeding programs in Brazil. In: A. Reynolds (ed.). *Grapevine Breeding Programs for the Wine Industry*. Cambridge: Elsevier; 2015. p.247–271. DOI: 10.1016/B978-1-78242-075-0.00011-9
- Malik S., Chaudhury R. Cryopreservation techniques for conservation of tropical horticultural species using various explants. In: P.E. Rajasekharan, V. Ramanatha Rao (eds). *Conservation and Utilization of Horticultural Genetic Resources*. Singapore: Springer; 2019. p.579–594. DOI: 10.1007/978-981-13-3669-0_19
- Maliogka V.I., Skiada F.G., Eleftheriou E.P., Katis N.I. Elimination of a new ampelovirus (GLRaV-Pr) and *Grapevine rupestris stem pitting associated virus* (GRSPaV) from two *Vitis vinifera* cultivars combining *in vitro* thermotherapy with shoot tip culture *Scientia Horticulturae*. 2009;123(2):280–282. DOI: 10.1016/j.scienta.2009.08.016
- Malnoy M., Viola R., Jung M.H., Koo O.J., Kim S., Kim J.S. et al. DNA-Free genetically edited grapevine and apple protoplast using CRISPR/Cas9 ribonucleoproteins. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:1904. DOI: 10.3389/fpls.2016.01904
- Markovich V.V. Brief summary of the work of the Sukhum Agricultural and Horticultural Experimental Station during fifteen years (1894–1909) of its existence (Kratkiy svod rabot Sukhumskoy selskokhozyaystvennoy i sadovoy opytной stantsii za pyatnadsat let (1894–1909 g.) yeye sushchestvovaniya). *Izvestiya Sukhumskoy sadovoy i selskokhozyaystvennoy opytной stantsii = News of the Sukhum Horticultural and Agricultural Experiment Station*. 1911;(3):7–9. [in Russian] (Маркович В.В. Краткий свод работ Сухумской сельскохозяйственной и садовой опытной станции за пятнадцать лет (1894–1909 г.) ее существования. *Известия Сухумской садовой и сельскохозяйственной опытной станции*. 1911;(3):7–9).
- Moscow Digital Herbarium. National Depository Bank of Live Systems “Noah’s Ark”: [website]. [in Russian] (Цифровой гербарий МГУ. Национальный банк-депозитарий живых систем «Ноев Ковчег»: [сайт]). URL: <https://plant.depo.msu.ru> [дата обращения: 22.06.2023].
- Muséum national d’Histoire naturelle: [website]. Available from: <https://science.mnhn.fr> [accessed June 22, 2023].
- N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. Research report 2021. Report number: b/n; 2021. [in Russian] (Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Научно-исследовательский отчет 2021. Номер отчета: б/н; 2021).
- Negrul A.M. Ampelography (Ampelografiya). Moscow: Pishchepromizdat; 1946. [in Russian] (Негрюль А.М. Ампелография. Москва: Пищепромиздат; 1946).
- Negrul A.M. Ampelography with the fundamentals of viticulture (Ampelografiya s osnovami vinogradarstva). Moscow: Ripol Classic; 1979. [in Russian] (Негрюль А.М. Ампелография с основами виноградарства. Москва: Рипол Классик; 1979).
- Nosulchak V.A. Grapes in the scientific works of Academician N.I. Vavilov (Vinograd v nauchnykh trudakh akademika N.I. Vavilova). Krasnodar; 2013. [in Russian] (Носульчак В.А. Виноград в научных трудах академика Н.И. Вавилова. Краснодар; 2013).
- Nuzzo F., Gambino G., Perrone I. Unlocking grapevine *in vitro* regeneration: Issues and perspectives for genetic improvement and functional genomic studies. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2022;193:99–109. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.10.027
- NYBG Steere Herbarium: [website]. Available from: <https://sweetgum.nybg.org> [accessed June 22, 2023].
- Olivares F., Loyola R., Olmedo B., de Los Angeles Miccono M., Aguirre C., Vergara R. et al. CRISPR/Cas9 targeted editing of genes associated with fungal suscep-

- tibility in *Vitis vinifera* L. cv. Thompson Seedless using geminivirus-derived replicons. *Frontiers in Plant Science*. 2021;12:791030. DOI: 10.3389/fpls.2021.791030
- Panattoni A., D'Anna F., Cristani C., Triolo E. Grapevine vitivirus A eradication in *Vitis vinifera* explants by antiviral drugs and chemotherapy. *Journal of Virological Methods*. 2007;146(1-2):129-135. DOI: 10.1016/j.jviromet.2007.06.008
- Panattoni A., Triolo E. New advances on *in vitro* antiviral chemotherapy. *Journal of Plant Pathology*. 2007;89(3):S51.
- Panis B. Sixty years of plant cryopreservation: from freezing hardy mulberry twigs to establishing reference crop collections for future generations. *Acta Horticulturae*. 2019;1234:1-8. DOI: 10.17660/ActaHortic.2019.1234.1
- 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
- Pathirana R., McLachlan A., Hedderley D., Panis B., Carimi F. Pre-treatment with salicylic acid improves plant regeneration after cryopreservation of grapevine (*Vitis* spp.) by droplet vitrification. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2015;38(12):11. DOI: 10.1007/s11738-015-2026-1
- Pilatti F.K., Aguiar T., Simões T., Benson E.E., Viana A.M. *In vitro* and cryogenic preservation of plant biodiversity in Brazil. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2011;47(1):82-98. DOI: 10.1007/s11627-010-9302-y
- Pospisilova D. Variety – the building stone of the vinegrowing. In: *Interactive Ampelography and Grapevine Breeding: Collected Papers of the International Symposium; 20–22 September 2011*. Krasnodar; 2012. p.238-252.
- Prins B., Volk G.M., Preece J.E. Grape collection. In: G.M. Volk, J.E. Preece (eds). *Field Tour of the USDA National Clonal Germplasm Repository for Tree Fruit, Nut Crops, and Grapes in Davis, California*. Fort Collins, CO: Colorado State University; 2021. Available from: <https://colostate.pressbooks.pub/davisrepositoryfieldtour/chapter/grapes> [accessed June 22, 2023].
- Pugachev I.I., Jabbarov Kh.D. 50 years to the Middle Asian Station of VIR (SASVNIIR 50 let). *Byulleten Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rasteniyevodstva im. N.I. Vavilova = Bulletin of the N.I. Vavilov All-Union Research Institute of Plant Industry*. 1974;(46):9-18. [in Russian] [Пугачев И.И., Джаббаров Х.Д. САСВНИИР 50 лет. Бюллетень Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова. 1974;(46):9-18].
- Royal Botanic Gardens, Kew: [website]. Available from: <http://apps.kew.org> [accessed June 22, 2023].
- Ryabova N.I., Koshelev P.P. Alexander Mikhailovich Negrul (Negrul Aleksandr Mikhaylovich). In: *Nikolai Ivanovich Vavilov's Associates: Plant Genetic Diversity Researchers (anniversary edition)*. 2nd ed. St. Petersburg: VIR; 2017. p. 374-378. [in Russian] [Рябова Н.И., Кошелев П.П. Негруль Александр Михайлович. В кн.: *Соратники Николая Ивановича Вавилова: исследователи генофонда растений (юбилейное издание)*. 2-е изд. Санкт-Петербург: ВИР; 2017. С.374-378].
- Savin G.A. The gene pool of grapes (Genofond vinograda). *Sadovodstvo, vinogradarstvo i vinodeliye Moldavii = Horticulture, Viticulture and Winemaking in Moldova*. 1990;(8):7-8. [in Russian] [Савин Г.А. Генофонд винограда. *Садводство, виноградарство и виноделие Молдавии*. 1990;(8):7-8].
- Schwander F., Eibach R., Fechter I., Hausmann L., Zyprian E., Töpfer R. *Rpv10*: a new locus from the Asian *Vitis* gene pool for pyramiding downy mildew resistance loci in grapevine. *Theoretical and Applied Genetics*. 2012;124(1):163-176. DOI: 10.1007/s00122-011-1695-4
- Scintilla S., Salvagnin U., Giacomelli L., Zeilmaker T., Malnoy M.A., van der Voort J.R. et al. Regeneration of plants from DNA-free edited grapevine protoplasts. *bioRxiv. The Preprint Server for Biology*. [preprint] 2021. DOI: 10.1101/2021.07.16.452503
- Skiada F., Grigoriadou K., Maliogka V., Katis N.I., Eleftheriou E. Elimination of grapevine leafroll-associated virus 1 and grapevine rupestris pitting-associated virus from grapevine cv. Agiorgitiko and a micropropagation of protocol for mass production of virus-free plantlets. *Journal of Plant Pathology*. 2009;91(1):177-184. DOI: 10.4454/jpp.v91i1.639
- Smirnov K.V., Kalmykova T.I., Morozova G.S. Viticulture (Vino-gradarstvo). Moscow: Agropromizdat; 1987. [in Russian] (Смирнов К.В., Калмыкова Т.И., Морозова Г.С. Виноградарство. Москва: Агропромиздат; 1987).
- Smithsonian Institution. National Museum of Natural History. Search the Department of Botany Collections: [website]. Available from: <https://collections.nmnh.si.edu/search/botany> [accessed June 22, 2023].
- Song S., Fu P., Lu J. Downy mildew resistant QTLs in *Vitis amurensis* "Shuang Hong" grapevine. In: *Abstract Book GBG 2018. XII International Conference on Grapevine Breeding and Genetics*. Bordeaux; 2018. p.131.
- Staudt G., Kassemeyer H.H. Evaluation of downy mildew resistance in various accessions of wild *Vitis* species. *VITIS – Journal of Grapevine Research*. 1995;34(4):225-228. DOI: 10.5073/vitis.1995.34.225-228
- Sukhumi Experiment Station. Report on the scientific research work of Sukhumi Experimental Station for 1964 (Sukhumskaya opyt'naya stantsiya. Otchet o nauchno issledovatel'skoy rabote Sukhumskoy opyt'noy stantsii za 1964 god). Report number: s/n; 1964. Central State Archive of Scientific and Technical Documentation of St. Petersburg (Tsentralny gosudarstvenny arkhiv nauchno-tekhnicheskoy dokumentatsii Sankt-Peterburga). F. R-318. Op. 23. D. 510. [in Russian] [Сухумская опытная станция. Отчет о научно исследовательской работе Сухумской опытной станции за 1964 год. Номер отчета: б/н; 1964. Центральный государственный архив научно-технической документации Санкт-Петербурга (ЦГАНТД СПб). Ф. Р-318. Оп. 23. Д. 510].
- Sunitha S., Rock C.D. CRISPR/Cas9-mediated targeted mutagenesis of TAS4 and MYBA7 loci in grapevine rootstock 101-14. *Transgenic Research*. 2020;29(3):355-367. DOI: 10.1007/s11248-020-00196-w
- Swedish Museum of Natural History. Herbarium Catalogue (S): [website]. Available from: <https://herbarium.nrm.se> [accessed June 22, 2023].
- Talash A.I., Troshin L.P. Modern phytosanitary state of Russian vineyards. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2012;(80):324-333. [in Russian] [Талаш А.И., Трошин Л.П. Современное фитосанитарное состояние виноградников России. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2012;(80):324-333].
- Tropicos.org. Missouri Botanical Garden: [website]. Available from: <https://tropicos.org> [accessed June 22, 2023].
- Ukhatoeva Y.V., Dunaeva S.E., Antonova O.Y., Apalikova O.V., Pozdniakova K.S., Novikova L.Y. et al. Cryopreservation of red raspberry cultivars from the VIR *in vitro* collection using a modified droplet vitrification method. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2017;53(7):394-401. DOI: 10.1007/s11627-017-9860-3

- 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 razmnozhayemykh 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: 06.09.2023].
- Úrbez-Torres J.R., Peduto F., Smith R.J., Gubler W.D. Phomopsis dieback: a grapevine trunk disease caused by *Phomopsis viticola* in California. *Plant Disease*. 2013;97(12):1571-1579. DOI: 10.1094/PDIS-11-12-1072-RE
- Venuti S., Copetti D., Foria S., Falginella L., Hoffmann S., Bellin D. et al. Historical introgression of the downy mildew resistance gene *Rpv12* from the Asian species *Vitis amurensis* into grapevine varieties. *PLoS One*. 2013;8(4):e61228. DOI: 10.1371/journal.pone.0061228
- Verzhuk V.G., Erastenkova M.V., Khokhlenko A.A., Agakhonov M.M., Kislin E.N., Ukhatova Yu.V. Evaluation of regenerative capacity of grape (*V. vinifera* L.) and red currant (*R. rubrum* L.) accessions in the culture *in vitro* for the development of VIR cryocollection. *Magarach. Viticulture and Winemaking*. 2022;24(3):214-218. [in Russian] (Вержук В.Г., Ерастенкова М.В., Хохленко А.А., Агаханов М.М., Кислин Е.Н., Ухатова Ю.В. Оценка регенерационной способности образцов винограда (*Vitis vinifera* L.) и красной смородины (*Ribes rubrum* L.) в культуре *in vitro* для создания криоколлекции ВИР. *Магарач. Виноградарство и виноделие*. 2022;24(3):214-218). DOI: 10.34919/IM.2022.24.3.003
- Volk G.M., Shepherd A.N., Bonnart R. Successful cryopreservation of *Vitis* shoot tips: novel pre-treatment combinations applied to nine species. *CryoLetters*. 2019;39(5):322-330.
- 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
- Wan D.Y., Guo Y., Cheng Y., Hu Y., Xiao S., Wang Y. et al. CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of *VvMLO3* results in enhanced resistance to powdery mildew in grapevine (*Vitis vinifera*). *Horticulture Research*. 2020;7:116. DOI: 10.1038/s41438-020-0339-8
- Wan Y., Schwaninger H., He P., Wang Y. Comparison of resistance to powdery mildew and downy mildew in Chinese wild grapes. *VITIS – Journal of Grapevine Research*. 2007;46(3):132-136. DOI: 10.5073/VITIS.2007.46.132-136
- Wang M.R., Chen L., Teixeira da Silva J.A., Volk G.M., Wang Q.C. Cryobiotechnology of apple (*Malus* spp.): development, progress and future prospects. *Plant Cell Reports*. 2018;37(5):689-709. DOI: 10.1007/s00299-018-2249-x
- Wang X., Tu M., Wang D., Liu J., Li Y., Li Z. et al. CRISPR/Cas9-mediated efficient targeted mutagenesis in grape in the first generation. *Plant Biotechnology Journal*. 2017;16(4):844-855. DOI: 10.1111/pbi.12832
- Yang L., Guo Y., Hu Y., Wen Y. CRISPR/Cas9-mediated mutagenesis of *VviEDR2* results in enhanced resistance to powdery mildew in grapevine (*Vitis vinifera*). *Acta Horticulturae Sinica*. 2020;47(4):623-634. DOI: 10.16420/j.issn.0513-553x.2019-0660

Информация об авторах

Магамедгусейн Магамедганифович Агаханов, кандидат биологических наук, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Волгоградская опытная станция – филиал ВИР, 404160 Россия, Волгоградская область, Среднеахтубинский район, Краснослободск, квартал Опытная станция ВИР, 30, m.agahanov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2438-9156>

Лариса Владимировна Багмет, 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, l.bagmet@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0768-0056>

Надежда Геннадьевна Тихонова, 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, n.g.tikhonova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-7662>

Мария Викторовна Ерастенкова, аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, merastenkova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7328-437X>

Евгений Николаевич Кислин, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42, 44, e.kislin@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1832-894X>

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, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, y.ukhatova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9366-0216>

Елена Константиновна Хлесткина, доктор биологических наук, профессор РАН, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, руководитель направления «Биология и биотехнология растений», Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, director@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8470-8254>

Information about the authors

Magamedgusein M. Agakhanov, Cand. Sci. (Biology), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Volgograd Experiment Station of VIR, VIR Exp. Station Block, Krasnoslobodsk 404160, Russia, m.agahanov@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2438-9156>

Larisa V. Bagmet, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.bagmet@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0768-0056>

Nadezhda G. Tikhonova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, n.g.tikhonova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-7662>

Mariya V. Erastenkova, Postgraduate Student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, merastenkova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7328-437X>

Evgeny N. Kislin, Cand. Sci. (Biology), Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.kislin@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1832-894X>

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, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settle., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, y.ukhatova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9366-0216>

Elena K. Khlestkina, Dr. Sci. (Biology), Professor of the RAS, Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, Plant Biology and Biotechnology Research Manager, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settle., Sirius Federal Territory, Krasnodar Territory 354340, Russia, director@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8470-8254>

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 04.11.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 04.11.2023; approved after reviewing on 30.11.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ОБЗОРЫ

Обзорная статья
УДК 633.18:631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-212-223



Селекция риса на повышение его продуктивности (обзор)

Г. Л. Зеленский^{1,2}, О. В. Зеленская²

¹ Федеральный научный центр риса, Краснодар, Россия

² Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Автор, ответственный за переписку: Григорий Леонидович Зеленский, zelensky08@mail.ru

В мировом рисоводстве основными направлениями селекции сортов и гибридов являются повышение продуктивности растений, приспособленность к условиям возделывания, качество получаемой продукции, устойчивость к стрессовым факторам среды, включая болезни.

Повышение урожайности риса в ведущих селекционных центрах связывают с изменением морфотипа растений: низкорослые с эректоидными листьями и высокоозерненной крупной метелкой.

В Международном НИИ риса (IRRI) созданы сорта риса, которые в условиях тропической зоны формируют урожай зерна 10–11 т/га, при $K_{хоз} = 0,5$. В Китае получен гетерозисный гибрид риса с урожайностью 13,9 т/га, имеющий новый морфотип растений и период вегетации 163 дня. Гибриду присвоена категория «супер-рис».

Современные селекционные программы направлены на создание сортов «зеленого супер-риса» методами педигри, беккроссирования для интрогрессии целевых генов с использованием ДНК-технологий.

Российские селекционеры традиционно создавали сорта риса, адаптированные к местным условиям, созревающие до 125 дней. В 1980-е гг. начата программа по созданию высокопродуктивного сорта риса с эректоидным типом листьев для уплотненных посевов. В результате ступенчатой гибридизации и целенаправленных отборов создан новый исходный материал с целевыми признаками «супер-риса», из которого получен сорт 'Полюс-5' с новым морфотипом растений. Сорт внесен в Госреестр и допущен к использованию в производстве с 2023 г. При испытании сорт 'Полюс-5' за 120 дней вегетации в условиях загущенного посева и повышенного уровня минерального питания сформировал урожайность 1380 г/м².

Ключевые слова: рис, новый морфотип растений, эректоидные листья, сорт, гибрид, урожайность

Благодарности: исследования выполнены по программе НИР Федерального научного центра риса. Обзор подготовлен авторами самостоятельно.

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

Для цитирования: Зеленский Г.Л., Зеленская О.В. Селекция риса на повышение его продуктивности (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):212-223. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-212-223

SURVEYS

Review article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-212-223

Rice breeding for higher crop productivity (a review)

Grigory L. Zelensky^{1,2}, Olga V. Zelenskaya²¹ Federal Scientific Rice Center, Krasnodar, Russia² Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia**Corresponding author:** Grigory L. Zelensky, zelensky08@mail.ru

The main global trends in the breeding of rice cultivars and hybrids are higher plant productivity, adaptability to cultivation conditions, quality of products, and resistance to environmental stressors, including diseases.

Efforts of leading breeding centers in the Philippines and China to further increase the rice yield are associated with a change in the plant morphotype: shorter plants with erectoid leaves and large panicles with a high number of grains.

The International Rice Research Institute (IRRI) has developed rice cultivars that under favorable conditions in the tropical zone produce a grain yield of up to 10–11 t/ha, with $K_{econ} = 0.5$. A heterotic hybrid of rice was obtained in China with a yield of 13.9 t/ha; it has a new plant morphotype (New Plant Type) and a growing season of 163 days. The hybrid is classified as “super rice”.

Modern breeding programs are aimed at producing cultivars of “Green Super Rice” using pedigree methods and backcrossing for introgression of target genes through DNA markers, QTL mapping, pyramiding, and recurrent selection.

Russian breeders have traditionally produced rice cultivars adapted to local conditions, with a growing season of no more than 125 days. In the 1980s, a program was launched to develop a high-yielding rice cultivar with erectoid leaves for condensed planting. As a result of multiple stepwise hybridization and targeted selection, new source material with target traits of “super rice” was released. Cv. ‘Polyus-5’ with a new plant morphotype was obtained on its basis. This cultivar was included in the State Register and from 2023 approved for commercial production. During the field trials, ‘Polyus-5’ yielded a maximum of 1380 g/m² over 120 days of the growing season, under the conditions of condensed sowing and increased mineral nutrition.

Keywords: rice, new plant morphotype, erectoid leaves, cultivar, hybrid, yield

Acknowledgments: the research was carried out under the Research Program of the Federal Rice Research Center. The review was prepared by the authors.

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

For citation: Zelensky G.L., Zelenskaya O.V. Rice breeding for higher crop productivity (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):212-223. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-212-223

Успешное развитие современных методов селекции, создание и внедрение высокопродуктивных сортов риса, начиная со времен «зеленой революции», являются основой продовольственной безопасности многих стран мира, где рис является важным продуктом питания для большинства населения. Традиционная селекция риса – это длительный многоступенчатый процесс, что в нынешних условиях быстрого роста народонаселения является серьезным недостатком. Новые технологии селекционной работы, такие как маркерная селекция, геномное редактирование сортов, культивирование *in vitro* и другие, позволяют ускорить селекционный процесс и сократить время создания сорта не менее чем на 30% (Hernández-Soto et al., 2021).

В селекционных центрах рисоводческих стран при создании сортов риса решают схожие задачи: повышение урожайности, улучшение качества зерна, усиление устойчивости к болезням и вредителям. Одновременно растения должны быть устойчивыми к полеганию, осыпанию и легко обмолачиваться при машинной уборке. При этом нужны сорта, адаптированные к местным условиям среды и приспособленные к принятым технологиям возделывания (Thudi et al., 2021).

Следует отметить, что в мировой практике используются две технологии выращивания риса: рассадная – в тропической зоне стран Азии, Африки и Центральной Америки, а также посевная – в странах умеренного климата, расположенных в Европе (в том числе и в Российской Федерации), Северной и Южной Америке и Австралии. Однако дефицит воды и трудовых ресурсов в настоящее время вынуждает фермеров Юго-Восточной Азии все чаще использовать технологию прямого посева семян в почву (Clauhan et al., 2015). Она высокомеханизирована и ориентирована на возделывание риса с использованием усовершенствованных высокоурожайных и устойчивых к неблагоприятным факторам среды сортов (Jat et al., 2022). При создании новых сортов риса обязательно учитывают, по какой технологии они будут выращиваться, и потому селекционеры отбирают растения с необходимыми признаками.

Растения сортов риса, созданные для рассадной технологии, должны давать обильное продуктивное кущение, чтобы сформировать необходимое количество метелок для получения высокого урожая. В тропической зоне кущение риса продолжается до тех пор, пока стеблестой не заполнит все свободное пространство между растениями. Здесь вегетационный период риса не ограничен количеством тепла и может составлять 160–180 дней и более.

В зоне умеренного климата период вегетации риса ограничен количеством дней с эффективной среднесуточной температурой для риса +15°C. Если в европейских странах, США, Австралии погодные условия позволяют выращивать сорта риса, которые созревают через 140–150 дней после залива, то в России – не более 125 дней. Сорта с длительным вегетационным периодом здесь в отдельные годы не созревают из-за раннего похолодания осенью (Zelensky, Zelenskaya, 2022).

Общеизвестно, что чем дольше растения находятся под солнцем, тем большую биологическую массу они образуют. Позднеспелые сорта в оптимальных условиях формируют более высокий урожай зерна, чем раннеспелые. Преодолеть эту зависимость очень сложно. Все это приходится учитывать российским селекционерам, создающим сорта риса для самой северной зоны рисоводства в мире.

Многолетняя мировая практика свидетельствует, что возрастание продуктивности риса стало возможным при изменении морфотипа растения. Понижение высоты растений, увеличение прочности стебля, повышение озерненности метелок и изменение положения листовых пластинок в пространстве позволили повысить продуктивность ценоза, увеличить урожайность зерна в большинстве рисосеющих стран (Khan et al., 2015).

Селекционерами Международного научно-исследовательского института риса (IRRI) наглядно показано, что рост урожайности риса произошел при изменении морфологических характеристик растения (Khush et al., 2001; Khush, Virk, 2005). Прочный короткий стебель, продуктивное кущение 15–17 побегов, вертикальный флаговый лист, длинное зерно высокого качества, устойчивость к основным болезням и вредителям – такие требования предъявлялись к сортам риса с самого начала селекционной работы в институте.

В 60–80-х гг. XX в. на Филиппинах и в других азиатских странах было зарегистрировано 34 разнотипных сорта селекции IRRI (Khush, Virk, 2005). Если до 1980 г. созданные здесь сорта повышали урожайность в основном за счет улучшения индекса урожая ($K_{\text{хоз}}$), то в последующие годы – за счет увеличения общей биомассы растений (Peng et al., 2000). Широко известные сорта 'IR-8' и 'IR-36', внесшие основной вклад в «Зеленую революцию» в азиатском рисоводстве, имели пониклую метелку, длинное зерно и вертикальный флаговый лист. Подобный внешний вид имели растения сорта 'IR-72', который допущен к использованию в производстве с 1988 г. По морфотипу 'IR-72' существенно отличался от 'IR-5' – первого сорта, созданного в институте, и значительно превосходил его по урожайности зерна (рис. 1).

Дальнейшее повышение урожайности риса ученые связывают с созданием растений нового морфотипа и гибридным рисом (Khan et al., 2015; He et al., 2020).

В 1988 г. специалисты IRRI подготовили стратегический документ «IRRI до 2020 г. и далее». В нем были обозначены приоритетные научные направления, и одно из них – это развитие генплазмы с высоким потенциалом урожайности. Предложена концепция нового типа растения (New Plant Type) для увеличения потенциала урожайности на 20%. К 2000 г. сорта риса, созданные в IRRI, при выращивании в оптимальных условиях тропической зоны были способны формировать урожай до 10–11 т/га, при $K_{\text{хоз}}$ около 0,5 (Khush et al., 2001).

Следует отметить, что селекционеры IRRI в своей работе практически не обращали внимания на крупность зерна создаваемых сортов и гибридов. У большинства из них масса 1000 зерен составляет 20–24 г. К примеру, у сорта риса 'IR-36' зерно по нашим меркам очень мелкое: масса 1000 зерен – 22,3 г. Автор сорта G. S. Khush утверждал, что для повышения урожайности риса важнее количество зерен в метелке, нежели их размер (Khush, Virk, 2005).

Индийские исследователи считают, что для повышения потенциальной урожайности риса необходимо увеличить биомассу растений создаваемых сортов до 25 т/га и повысить индекс урожая с 0,5 до 0,6 (Ahmed, 2013; Rahangdale et al., 2019). Этой же точки зрения придерживался и А. Г. Ляховкин (Lyakhovkin, 2005), подчеркивая, что основной вклад в урожайность сорта вносит масса зерна с метелки.

В 1995 г. в IRRI была начата селекционная программа по увеличению потенциальной урожайности риса до 15 т/га и более. Селекционеры считали, что это возмож-



Рис. 1. Сорты риса, созданные в IRRI: 'IR-5' и 'IR-72' (по: Khush, Virk, 2005)

Fig. 1. Rice cultivars developed at IRRI: 'IR-5' and 'IR-72' (from Khush, Virk, 2005)

но при создании растений риса с $K_{\text{хоз}} = 0,6$, то есть 60% зерна и 40% соломы по весу, а также с повышенной способностью к фотосинтезу для увеличения общего биологического урожая (Khush, 2000). При этом необходимо было уменьшить кущение растений, но значительно увеличить количество зерен на метелке (рис. 2.). Однако теоретические расчеты не подтвердились практикой: сортообразцы с новым типом растений не смогли дать больше урожая, чем лучшие сорта с обычным морфотипом (Bressegheho, Coelho, 2013). Несмотря на большую озерненность метелок, снижение кущения

уменьшало общую биомассу растений, что приводило к меньшей урожайности агроценоза (Peng et al., 2008).

Более успешной оказалась реализация программы по увеличению продуктивности рисовых систем, связанная с созданием китайскими учеными гибридного риса (Cheng et al., 2007; Wu, 2009).

Китай является мировым лидером по производству риса и созданию сортов. С целью повышения урожайности, устойчивости к стрессам и улучшения качества зерна ученые используют как традиционную селекцию, так и инновации, применяя методы функциональной гено-



Рис. 2. Различные морфотипы растений риса (по: Khush et al., 2001): 1 – традиционное высокорослое растение; 2 – полукарликовое растение; 3 – новый тип растения, предложенный в IRRI

Fig. 2. Different rice morphotypes (from Khush et al., 2001): 1 – traditional tall plant; 2 – semidwarf plant; 3 – new plant type proposed by IRRI

мики и молекулярной селекции (Bai et al., 2018; Gao et al., 2022). Для решения проблемы продовольственной безопасности и самообеспечения жителей страны крупной риса был разработан ряд селекционных программ, в том числе по созданию «супергибридного риса», который должен обеспечить значительный рост урожайности (Yuan, 2017).

Китайский перспективный морфотип растения аналогичен морфотипу риса IRRI. Отличие в том, что метелки расположены ниже высоты трех верхних листьев, которые должны оставаться продуктивными до полного налива зерна. Благодаря добавлению этих признаков и использованию гибридов китайские селекционеры добились большого успеха (Cheng et al., 2007). Создание гибридов представляет собой кратчайший путь к получению улучшенных морфотипов риса, потому что не надо включать все признаки в одну инбредную линию. Необходимо получить две взаимодополняющие родительские формы, которые при скрещивании формировали нужный морфотип. При этом гетерозис давал дополнительный потенциал урожайности (Wu, 2009).

Реализацию программы по увеличению продуктивности растений риса в Китае с измененным морфотипом начал в 1996 г. селекционер L. Yuan. Для морфологического улучшения растений и использования межподвидового гетерозиса он скрещивал растения подвидов *indica* и *jarolisa* и обосновал модели морфотипов риса для поэтапного повышения урожайности (рис. 3). Для формирования урожая риса выше 15 т/га предполагается значительно увеличить высоту, биомассу растений и продуктивность их метелок по сравнению с существующими морфотипами.

с момента посева семян в питомнике или с высадки рассады. Китайские селекционеры продолжают работу по дальнейшему увеличению урожайности гибридов риса. Так, в 2018 г. на демонстрационных посевах на площади 100 му (6,67 га) у одного из образцов «супергибридного риса» была зарегистрирована урожайность 17,28 т/га (He et al., 2020).

В странах Азии, на долю которых приходится 90% мирового производства риса и его потребления (Elert, 2014), в последнее двадцатилетие значительно возрастают противоречия между производством риса и рациональным использованием природных ресурсов. Интенсивное рисоводство наносит существенный вред состоянию окружающей среды. Для повышения урожайности риса фермеры увеличивают количество вносимых удобрений, чтобы удовлетворить потребности высокопродуктивных сортов в большем количестве азота (Ali et al., 2021). Так, повышение урожайности риса в Китае с 2,1 т/га в 1961 г. до 6,7 т/га в 2013 г. произошло за счет создания высокопродуктивных сортов и гибридов, внедрение которых сопровождалось значительным увеличением внесения азотных удобрений – с 8 до 35% от общего количества удобрений, используемых в мире (Wang, Peng, 2017). Это привело к попаданию большого остаточного количества азотных удобрений в почву и водоемы вокруг сельскохозяйственных угодий, что явилось причиной загрязнения окружающей среды и деградации экологических систем (Ali et al., 2018).

Для решения этой проблемы китайские ученые в 2005 г. предложили проект «Green Super Rice» (GSR), целью которого является выведение новых сортов «суперриса» с так называемыми «зелеными» свойствами. К ним

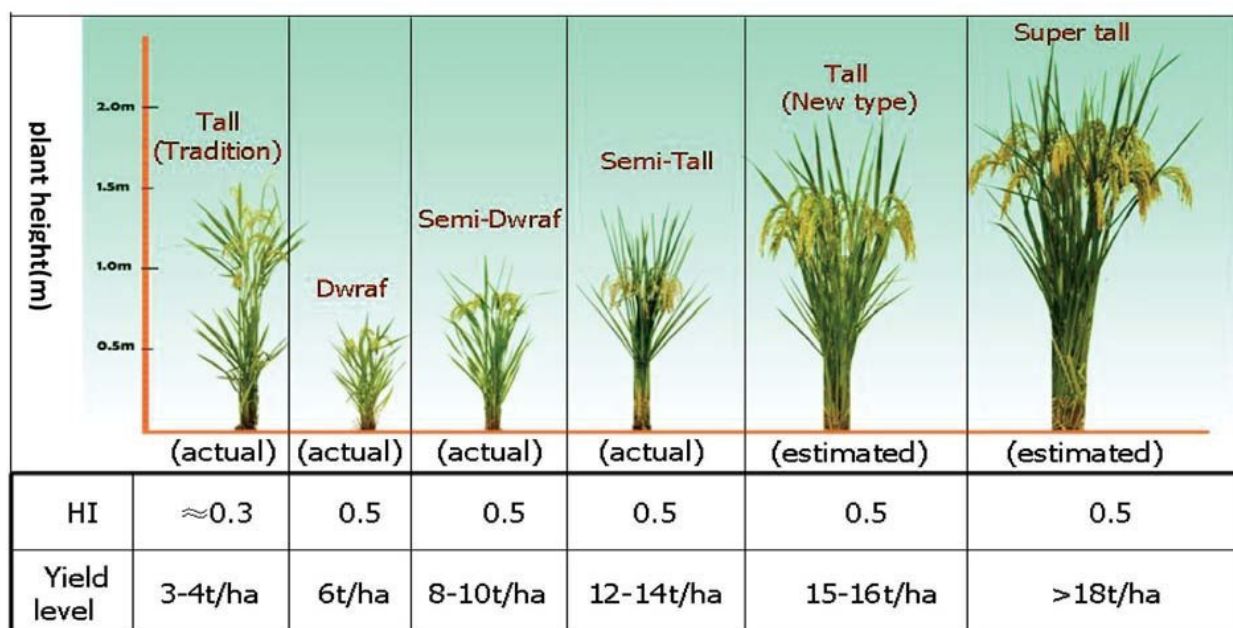


Рис. 3. Модели морфотипов растений для повышения урожайности риса в Китае (по: Yuan, 2017)

Fig. 3. Plant morphotype models to increase rice yield in China (from Yuan, 2017)

Создание гибридов по программе, предложенной L. Yuan (2017), ведется в нескольких селекционных центрах Китая. В 2012 г. был зарегистрирован гибрид риса Y-U-2 с урожайностью 13,9 т/га. Его растения за период вегетации 163 дня формируют урожай зерна из расчета по 85,3 кг в день на 1 га (Yuan, 2017). Однако не уточняется, когда начат отсчет вегетации этого гибрида риса –

относятся: множественная устойчивость к насекомым и болезням, высокая эффективность использования удобрений, экономия воды, толерантность к засухе и солеустойчивость на основе высокой урожайности и качества зерна (Zhang, 2007; Wing et al., 2018). Проект GSR имеет пять основных направлений, включающих создание платформ полногеномной селекции и выведение сортов

(как инбредных, так и гибридных) с различными комбинациями целевых признаков. Этот проект получил поддержку не только китайского правительства, но и международных программ финансирования (Yu et al., 2020).

Научные исследования по созданию и продвижению в производство новых сортов GSR, предназначенных для ресурсосберегающих и природосберегающих технологий, ведут не только в Китае, но и в Международном институте риса на Филиппинах.

В селекционную программу IRRI по созданию сортов «супер-риса» внесены некоторые изменения. На основе полученных высокопродуктивных образцов риса селекционеры начали создавать генотипы, которые с высокой эффективностью используют питательные вещества и воду, при этом способны переносить абиотические стрессы в различных экосистемах (Marcaida III et al., 2014). Эти генотипы названы так же, как и в Китае – «зеленый супер-рис» (GSR) (Li, Ali, 2017). При создании GSR, наряду с фенотипическим отбором методом педигри, ученые широко использовали беккроссирование для интрогрессии целевых генов с использованием маркеров ДНК, QTL-картирование, пирамидирование и рекуррентный отбор. Полученные генотипы GSR имели преимущество в урожайности над обычными сортами 31–36% и были пригодны для выращивания риса в неблагоприятных условиях среды (Marcaida III et al., 2014).

Этот подход привел к появлению многих сортов GSR и их внедрению по всей Азии и Африке, в том числе конкурентоспособного по отношению к сорнякам риса (WTR 1) (Ali et al., 2018). Так, B. S. Chauhan et al. (2015) сообщают об испытании на Филиппинах при прямом высеве семян 10 элитных генотипов GSR, полученных путем пирамидирования образцов селекции IRRI и созданных для выращивания в неблагоприятных для растений риса условиях окружающей среды. Один из таких генотипов (IR83140-B-11-B), имеющий высоту растений 103 см и вегетационный период 105 дней, проявил высокую степень устойчивости к засорению посевов и незначительное по сравнению с другими сортами снижение урожайности (Chauhan et al., 2015).

Сорта GSR смогут поддерживать стабильную и более высокую урожайность риса при меньших затратах на их выращивание, обладают более высокой устойчивостью и способны к быстрому восстановлению при частом возникновении экстремальных стрессов, вызванных изменениями климата (Wing et al., 2018; Yu et al., 2022). Внедрение таких сортов риса будет способствовать устойчивому развитию рисоводства в азиатских и африканских странах, где сосредоточено основное производство культуры (Yu et al., 2020).

В азиатских странах продолжают также исследования, связанные с моделированием нового типа растений, известного как «идеальная архитектура растения» (IPA), на основе мутационной селекции и ДНК-технологий. Этот тип был предложен в качестве средства повышения потенциальной урожайности риса по сравнению с существующими высокоурожайными сортами (Jiao et al., 2010; Duan et al., 2019). Другие исследователи, используя методы маркерной селекции и QTL-картирования, работают над получением генотипов с наиболее удачным сочетанием количественных признаков, обеспечивающих высокие урожаи риса (Bagudam et al., 2020; Donde et al., 2020). Кроме того, в селекционную практику по рису начали внедрять технологию геномного редактирования при использовании системы CRISPR/Cas – направленно редактирования геномов (нокаута генов) (Khlestkina,

2019). Сообщается о получении этим методом форм риса, устойчивых к пирикуляриозу (Wang et al., 2016) и гербициду сплошного действия глифосату (Li et al., 2016).

В Российской Федерации селекция риса изначально была направлена на создание сортов, адаптированных к условиям «северного» рисоводства (Shilovsky et al., 2001). Селекционная работа по изменению морфотипа растения риса для повышения его продуктивности была начата во ВНИИ риса (ныне ФНЦ риса) в 1982 г. В коллекционном питомнике из мутантного образца К-01209 было отобрано растение высотой 50 см с эректоидными листьями, которое с именем «Остролистный-1» использовано в дальнейшей селекционной работе в качестве донора вертикальности листьев. Остролистный-1 имел два серьезных недостатка: позднеспелость (вегетационный период более 130 дней) и очень мелкое зерно (масса 1000 зерновок менее 20 г).

В 1983 г. в гибридной популяции F_3 C-11VC × (Protao Prescose × Безостый скороспелый) выделено позднеспелое растение риса высотой 85 см. Пять продуктивных побегов несли компактные сорговидные метелки с очень большим количеством колосков – от 566 до 665 (в среднем 600), в то время как у обычных сортов в метелке 120–150 колосков (Zelensky, 1985). Этот уникальный образец под названием «БЗ-600» был включен в селекционную проработку как донор продуктивности (рис. 4).

К сожалению, у образца БЗ-600 и его потомства было низкое качество зерна и мучнистый эндосперм, поэтому они использовались только как исходный материал.

Образцы БЗ-600 и Остролистный-1 были взяты в качестве родительских форм для гибридизации между ними и с рядом лучших из возделываемых на тот момент сортов риса.

В результате был получен гибридный материал, растения которого сочетали эректоидность листьев с высокопродуктивными метелками (рис. 5). Недостатками полученных новых гибридных форм являлись их позднеспелость и мелкое зерно (Zelensky, 1998).

Исторически сложилось так, что российские рисоводы отдают предпочтение сортам риса с округлой и достаточно крупной зерновкой (масса 1000 зерен – 30–32 г). В послевоенные годы, когда рисоводство в стране бурно развивалось, именно такое зерно имели сорта 'Дубовский 129', 'Краснодарский 424' и 'Кубань 3', которые возделывались в СССР на большой площади более 50 лет. Они определили требования к комбайнам, очистительным машинам и перерабатывающим рис заводам, где оборудование было ориентировано именно на такой размер зерна (Zelensky, Zelenskaya, 2022). Сорта с более мелким зерном, даже высокоурожайные, до сих пор с трудом «приживаются» в российском производстве.

Селекционеры, создавая новые сорта, обязаны учитывать требования рисоводов. К сожалению, раннеспелость, большое число зерен в метелке, крупное зерно и высокая продуктивность очень трудно сочетаются в одном растении риса.

В связи с тем, что в Российской Федерации принят посевной тип культуры риса и урожай биомассы формируется главным образом за счет густоты растений, морфотип сорта должен быть таким, чтобы значительно уменьшить конкуренцию растений за свет при их загущении.

Проблему повышения эффективности фотосинтеза в различных по густоте растительных ценозах к моменту разработки селекционной программы по созданию отечественного «супер-риса» изучали российские и японские ученые (Nichiporovich, 1975; Ross, 1975; Sasa



Рис. 4. Исходные образцы риса: 1 – Остролистный-1; 2 – БЗ-600 (фото Г. Л. Зеленского, О. В. Зеленской)
Fig. 4. Initial source samples of rice: 1 – Ostrolistny-1; 2 – BZ-600 (photo by G. L. Zelensky and O. V. Zelenskaya)



Рис. 5. Промежуточные высокопродуктивные гибридные формы риса (фото Г. Л. Зеленского, О. В. Зеленской)
Fig. 5. Intermediate high-yielding hybrid forms of rice (photo by G. L. Zelensky and O. V. Zelenskaya)

hava et al., 1989). Впоследствии на примере отечественных сортов проводилось также изучение генетической системы признаков, определяющих морфотип и фотосинтетическую активность растений риса. Выявлен полигенный характер их наследования, причем основная роль отведена аддитивным эффектам генов (Goncharova, 2012). При создании сортов риса с новым морфотипом растений были учтены основные выводы этих исследований.

По мнению G. Zelensky et al. (2021), растения риса нового типа должны иметь эректоидное расположение листьев, высоту до 90 см, отличное качество зерна и высокую устойчивость к полеганию, болезням и вредителям. Именно такой тип растения может нести крупную метелку с большой озерненностью, которая не должна сильно уменьшаться при загущении посевов (Zelensky et al., 2021).

В результате многолетней ступенчатой гибридизации и целенаправленных отборов выделен ряд селекционных линий, каждая из которых имела признаки, необходимые для создания растений нового типа. С одной стороны, были получены образцы с вертикальными эректоидными листьями, хорошо выдерживающие плотные посевы, и с другой – образцы с крупными метелками и большой озерненностью, которые обладали зерном отличного качества, но имели обычное расположение листьев и отрицательно реагировали на загущение. После гибридизации между ними многократным отбором в 1997 г. были получены растения нового типа. У них эректоидность листьев сочеталась с высокоозерненными метелками, которые различались плотностью и степенью их пониклости (Zelensky, 2005). После размножения новые образцы изучались в питомниках селекционного процесса (рис. 6) и вегетационных опытах, при посеве в лизиметрах с различной густотой.

Оба образца (СПу-78-96-02 и СПу-77-96-02) имели стекловидное зерно, не полегали, не осыпались, были

устойчивы к болезням. Однако их вегетационный период превышал 130 дней, что для условий зоны рисосеяния в России неприемлемо. Поэтому оба образца использовали в качестве родительских форм для гибридизации при дальнейшей селекционной работе.

После очередной серии скрещиваний, проведения отборов и изучения селекционного материала был получен ряд вертикальнолистных образцов риса, отвечающих требованиям современных сортов. Два из них, с новым морфотипом растений, «Рубикон» и «Полюс-5» (рис. 7) в 2020 г. были переданы на Государственное сортоиспытание, по результатам которого сорт риса «Полюс-5» внесен в Госреестр РФ и допущен к использованию в производстве с 2023 г. (<https://reestr.gossortrf.ru>; Zelensky et al., 2023).

В период прохождения государственного испытания Рубикон и «Полюс-5» дополнительно изучали в полевых опытах для уточнения сортовой реакции на густоту растений и уровень азотного питания (Tkachenko et al., 2022). Полученные результаты показали, что новые вертикальнолистные сорта Рубикон и «Полюс-5» по-разному реагируют на условия выращивания и формируют по вариантам различную урожайность (таблица).

Согласно данным таблицы, сорт «Полюс-5» сформировал максимальную урожайность (1380 г/м²) в условиях загущенного посева и повышенного уровня минерального питания. При этом $K_{хоз}$ по вариантам различался мало и составил 0,50–0,51. Имея относительно короткий вегетационный период (120–121 день), растения сорта «Полюс-5» «работали» очень эффективно, формируя в варианте с загущенным посевом ежедневно по 115,0 кг зерна на 1 га. Этот показатель значительно выше, чем у китайского гибрида (85,3 кг/га в день), который отнесен к категории «супер-рис» (Yuan, 2017). Зерно сорта «Полюс-5» по крупности практически не отличается от стандартного сорта «Рапан-2», дает крупу отличного качества.



1



2

Рис. 6. Селекционные образцы риса: 1 – СПу 78-96-02; 2 – СПу 77-96-02 (фото Г. Л. Зеленского, О. В. Зеленской)

Fig. 6. Breeding samples of rice: 1 – SPu 78-96-02; 2 – SPu 77-96-02 (photo by G. L. Zelensky and O. V. Zelenskaya)

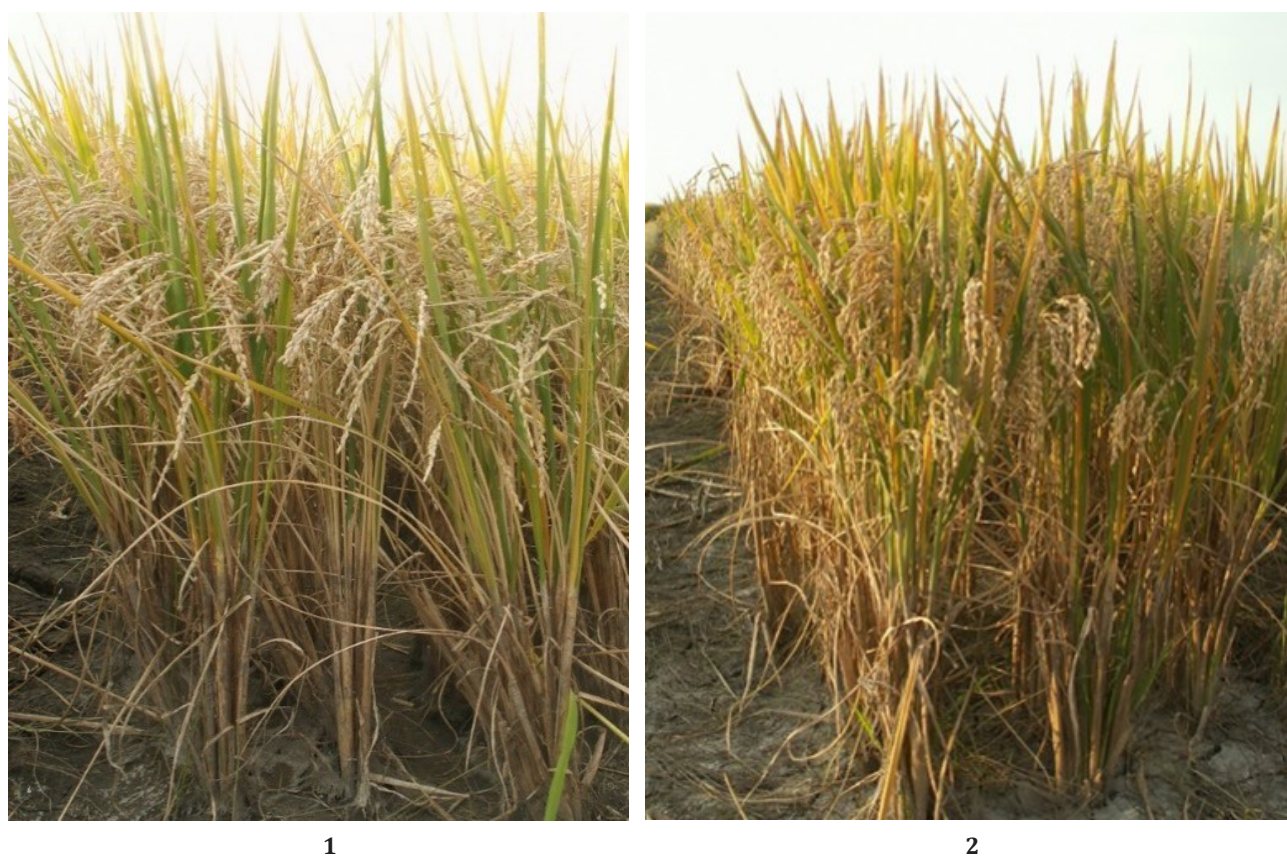


Рис. 7. Сорты риса Рубикон (1) и 'Полюс-5' (2) (фото Г. Л. Зеленского, О. В. Зеленской)
Fig. 7. Rice cultivars Rubikon (1) and 'Polyus-5' (2) (photo by G. L. Zelensky and O. V. Zelenskaya)

Таблица. Урожайность сортов риса при двух подкормках азотом, 2021 г. (Федеральный научный центр риса)
Table. Productivity of rice cultivars with two nitrogen fertilizer applications, 2021 (Federal Scientific Rice Centre)

Показатели / Indicators	Рубикон / Rubikon		'Полюс-5' / 'Polyus-5'		'Рапан-2' st. / 'Rapan-2' st.		НСП _{0,5} / LSD ₀₅
	1*	2**	1	2	1	2	
Масса зерна с делянки (1 м ²), г / Grain weight per plot (1 m ²), g	860	1100	1380	1200	910	880	5,5
Вегетационный период, дней / Growing season, days	120	122	120	121	118	119	-
Высота растений, см / Plant height, cm	84	86	90	92	90	95	
Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	29,2	29,4	28,7	28,5	28,0	28,2	-
K _{хоз} / K _{экон}	0,45	0,49	0,50	0,51	0,50	0,52	-
Урожай зерна, кг, в день на 1 га / Grain yield, kg, per day per 1 ha	71,7	90,2	115,0	99,2	77,1	73,9	-

Примечания: 1* – загущенный; 2** – разреженный посев; st. – сорт-стандарт

Notes: 1* – condensed planting; 2** – sparse planting; st. – standard reference

Помимо методов традиционной селекции, российские ученые все шире используют инновационные технологии, особенно при создании высокопродуктивных сортов риса, устойчивых к пирикулярриозу (возбудитель *Pyricularia oryzae* Cav.), который поражает рисовые растения практически во всем мире. Сочетая применение ДНК-маркеров, сцепленных с локусами устойчивости к пирикулярриозу, и фитопатологического тестирования в полевых условиях, создан ряд сортов риса с распецифической устойчивостью к пирикулярриозу, из которых пять ('Восход', 'Капитан', 'Ленарис', 'Пируэт' и 'Фрегат') внесены в Госреестр РФ и допущены к использованию в производстве с 2021–2022 гг. (Kostylev et al., 2017; Dubina et al., 2019; Zelensky et al., 2021). Выращивание таких сортов позволяет значительно сократить применение химических средств защиты и избежать загрязнения экосистем в зоне рисоводства.

Заключение

В мировой селекционной практике дальнейшее увеличение продуктивности риса связывают с созданием растений нового морфотипа. Такие растения имеют короткий прочный стебель, устойчивый к полеганию, вертикальные листья среднего размера, высокоозерненные метелки, хорошее качество крупы. Они устойчивы к болезням и вредителям, адаптированы к местным условиям выращивания.

Селекционерами IRRI созданы сорта риса, которые в тропических условиях способны формировать урожай 10–11 т/га. Лучшие из них переданы фермерам для производственного использования. Селекционная программа, принятая в институте, предусматривает создание нового типа растения, который позволит увеличить потенциальную урожайность риса до 15 т/га и более.

В Китае ведется широкомасштабная селекционная работа по увеличению продуктивности растений риса на основе изменения их морфотипа. Создаются гетерозисные гибриды при скрещивании растений подвидов *indica* и *japonica*. Зарегистрирован и допущен к использованию гибрид риса Y-U-2 с урожайностью 13,9 т/га. Кроме того, китайские ученые, применяя ДНК-технологии, создают новые сорта «супер-риса» с различными «зелеными» свойствами, включая устойчивость к многочисленным насекомым и болезням, высокую эффективность использования удобрений, экономию воды, борьбу с засухой, толерантность и стрессоустойчивость на основе высокой урожайности и качества зерна. Выращивание таких сортов позволит снизить экологическую напряженность в зоне рисоводства за счет уменьшения объемов применяемых химических препаратов.

Российскими селекционерами традиционно создавались сорта риса с обычным морфотипом растений, адаптированные к условиям самой северной зоны рисоводства. В результате многолетней целенаправленной работы создан высокопродуктивный сорт 'Полюс-5' с новым морфотипом растения, который по большинству показателей отвечает требованиям «супер-риса». 'Полюс-5' внесен в Госреестр сортов, допущенных к использованию в Российской Федерации с 2023 г. В ФНЦ риса развернуто семеноводство сорта для обеспечения широкого изучения и внедрения в производство. На основе полученного исходного материала растений нового морфотипа начаты исследования с применением маркерной селекции по созданию сортов риса для природосберегающих технологий.

References / Литература

- Ahmed T. Twenty years of achievements of the EIRLSBN: accomplishments of the Regional Agricultural Research Station, Titabar, Assam. In: B.C.Y. Collard, A.M. Ismail, B. Hardy (eds). *EIRLSBN: Twenty Years of Achievements in Rice Breeding*. Los Baños: IRRI; 2013. p.65-86. Available from: http://books.irri.org/9789712202957_content.pdf [accessed Aug. 04, 2023].
- Ali J., Anumalla M., Murugaiyan V., Li Z. Green Super Rice (GSR) traits: Breeding and genetics for multiple biotic and abiotic stress tolerance in rice. In: J. Ali, S.H. Wani (eds). *Rice Improvement: Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives*. Cham: Springer; 2021: p.59-97.
- Ali J., Jewel Z.A., Mahender A., Anandan A., Hernandez J., Li Z. Molecular genetics and breeding for nutrient use efficiency in rice. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018;19(6):1762. DOI: 10.3390/ijms19061762
- Bagudam R., Eswari K.B., Badri J., Devi G.L., JaiVidhya L.R.K., Bhavani P. et al. Morphological and molecular characterization of new plant type core set for yield and culm strength traits in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*. 2020;30(6):233-242. DOI: 10.1007/s13562-020-00581-w
- Bai S., Yu H., Wang B., Li J. Retrospective and perspective of rice breeding in China. *Journal of Genetics and Genomics*. 2018;45(11):603-612. DOI: 10.1016/j.jgg.2018.10.002
- Breseghele F., Coelho A.S.G. Traditional and modern plant breeding methods with examples in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2013;61(35):8277-8286. DOI: 10.1021/jf305531j
- Chauhan B.S., Opeña J., Ali J. Response of 10 elite "Green Super Rice" genotypes to weed infestation in aerobic rice systems. *Plant Production Science*. 2015;18(2):228-233. DOI: 10.1626/pp.18.228
- Cheng S.H., Cao L.Y., Zhuang J.Y., Chen S.G., Zhan X.D., Fan Y.Y. et al. Super hybrid rice breeding in China: Achievements and prospects. *Journal of Integrative Plant Biology*. 2007;49(6):805-810. DOI: 10.1111/j.1744-7909.2007.00514.x
- Donde R., Mohapatra S., Baksh S.K.Y., Padhy B., Mukherjee M., Roy S. et al. Identification of QTLs for high grain yield and component traits in new plant types of rice. *PLoS One*. 2020;15(7):e0227785. DOI: 10.1371/journal.pone.0227785
- Duan E., Wang Y., Li X., Lin Q., Zhang T., Wang Y. et al. OsSH1 regulates plant architecture through modulating the transcriptional activity of IPA1 in rice. *The Plant Cell*. 2019;31(5):1026-1042. DOI: 10.1105/tpc.19.00023
- Dubina E.V., Shilovsky V.N., Kostylev P.I., Ruban M.G., Ogly A.M. Development of blast-resistant rice varieties based on application of DNA technologies. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2019;2(1):16-23. [in Russian] (Дубина Е.В., Шиловский В.Н., Костылев П.И., Рубан М.Г., Оглы А.М. Создание сортов риса, устойчивых к пирикулярриозу, на основе применения ДНК-технологий. *Биотехнология и селекция растений*. 2019;2(1):16-23). DOI: 10.30901/2658-6266-2019-1-16-23
- Elert E. Rice by the numbers: A good grain. *Nature*. 2014;514(7524):50-51. DOI: 10.1038/514s50a
- Gao L., Gao Q., Lorenc M. Comparison of total factor productivity of rice in China and Japan. *Sustainability*. 2022;14(12):7407. DOI: 10.3390/su14127407
- Goncharova Yu.K. Variability, inheritance and relationship with productivity of photosynthesis traits in rice (Variabelnost, nasledovaniye i svyaz s produktivnostyu priznakov fotosinteza u risa). Krasnodar: All-Russian Rice Research Institute; 2012. [in Russian] (Гончарова Ю.К. Вариабельность,

- наследование и связь с продуктивностью признаков фотосинтеза у риса. Краснодар: ВНИИ риса; 2012).
- He Q., Deng H., Sun P., Zhang W., Shu F., Xing J. et al. Hybrid rice. *Engineering*. 2020;6(9):967-973. DOI: 10.1016/j.eng.2020.08.005
- Hernández-Soto A., Echeverría-Beirute F., Abdelnour-Esquivel A., Valdez-Melara M., Boch J., Gatica-Arias A. Rice breeding in the new era: Comparison of useful agronomic traits. *Current Plant Biology*. 2021;27:100211. DOI: 10.1016/j.cpb.2021.100211
- Jat R.K., Meena V.S., Kumar M., Jakkula V.S., Reddy I.R., Pandey A.C. Direct seeded rice: Strategies to improve crop resilience and food security under adverse climatic conditions. *Land*. 2022;11(3):382. DOI: 10.3390/land11030382
- Jiao Y., Wang Y., Xue D., Wang J., Yan M., Liu G. et al. Regulation of *OsSPL14* by *OsmiR156* defines ideal plant architecture in rice. *Nature Genetics*. 2010;42(6):541-544. DOI: 10.1038/ng.591
- Khan M.H., Dar Z.A., Dar S.A. Breeding strategies for improving rice yield – A review. *Agricultural Sciences*. 2015;6(5):467-478. DOI: 10.4236/as.2015.65046
- Khlestkina E.K. Rice genome editing using CRISPR/Cas system. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2019;2(1):49-54. [in Russian] [Хлесткина Е.К. Геномное редактирование риса при использовании системы CRISPR/Cas. *Биотехнология и селекция растений*. 2019;2(1):49-54]. DOI: 10.30901/2658-6266-2019-1-49-54
- Khush G.S. Strategies for increasing the yield potential of rice. In: J.E. Sheehy, P.L. Mitchell, B. Hardy (eds). *Redesigning Rice Photosynthesis to Increase Yield*. Los Baños: IRRI; 2000. p.207-213. Available from: http://books.irri.org/0444506101_content.pdf [accessed Aug. 04, 2023].
- Khush G.S., Coffman W.R., Beachell H.M. The history of rice breeding: IRRI's contribution. In: W.G. Rockwood (ed.). *Rice Research and Production in the 21st Century: Symposium Honoring R.F. Chandler, Jr.* Los Baños: IRRI; 2001. p.117-135. Available from: http://books.irri.org/9712201635_content.pdf [accessed Aug. 04, 2023].
- Khush G.S., Virk P.S. IR varieties and their impact. Los Baños: IRRI; 2005. Available from: http://books.irri.org/9712202062_content.pdf [accessed Aug. 04, 2023].
- Kostylev P.I., Krasnova E.V., Redkin A.A., Dubina E.V., Mukhina Z.M. Combination of rice blast resistance genes in the genotypes of Russian rice varieties with the use of marker assisted selection. *Ecological Genetics*. 2017;15(3):54-63. [in Russian] [Костылев П.И., Краснова Е.В., Редькин А.А., Дубина Е.В., Мухина Ж.М. Объединение генов устойчивости риса к пирикулярриозу в генотипах российских сортов с использованием маркерной селекции. *Экологическая генетика*. 2017;15(3):54-63]. DOI: 10.17816/ecogen15354-63
- Li J., Meng X., Zong Y., Chen K., Chang H., Liu J. et al. Gene replacements and insertions in rice by intron targeting using CRISPR-Cas9. *Nature Plants*. 2016;2(10):16139. DOI: 10.1038/nplants.2016.139
- Li Z., Ali J. Breeding green super rice (GSR) varieties for sustainable rice cultivation. In: T. Sasaki (ed.). *Achieving Sustainable Cultivation of Rice. Vol. 1*. Washington DC: Burleigh Dodds Science Publishing; 2017. p.109-129. DOI: 10.19103/AS.2016.0003.05
- Lyakhovkin A.G. Rice. World production and gene pool of rice (Mirovoye proizvodstvo i genofond risa). St. Petersburg: PROFI INFORM; 2005. [in Russian] [Ляховкин А.Г. Рис. Мировое производство и генофонд риса. Санкт-Петербург: ПРОФИ ИНФОРМ; 2005].
- Marcaida III M., Li T., Angeles O., Evangelista G.K., Fontanilla M.A., Xu J. et al. Biomass accumulation and partitioning of newly developed Green Super Rice (GSR) cultivars under drought stress during the reproductive stage. *Field Crops Research*. 2014;162:30-38. DOI: 10.1016/j.fcr.2014.03.013
- Nichiporovich A.A. The theory of photosynthetic plant productivity and the sustainable breeding trend for increasing productivity (Teoriya fotosinteticheskoy produktivnosti rasteniy i ratsionalnoye napravleniye selektsii na povysheniye produktivnosti). In: *Physiological and Genetic Fundamentals of Productivity Increase in Cereal Crops (Fiziologo-geneticheskiye osnovy povysheniya produktivnosti zernovykh kultur)*. Moscow: Kolos; 1975. p.5-14. [in Russian] [Ничипорович А.А. Теория фотосинтетической продуктивности растений и рациональное направление селекции на повышение продуктивности. В кн.: *Физиолого-генетические основы повышения продуктивности зерновых культур*. Москва: Колос; 1975. С.5-14].
- Peng S., Khush G.S., Virk P., Tang Q., Zou Y. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crops Research*. 2008;108(1):32-38. DOI: 10.1016/j.fcr.2008.04.001
- Peng S., Laza R.C., Vesperas R.M., Sanico A.L., Cassman K.G., Khush G.S. Grain yield of rice cultivars and lines developed in the Philippines since 1966. *Crop Science*. 2000;40(2):307-314. DOI: 10.2135/cropsci.2000.402307x
- Rahangdale S., Singh Y., Kujur M.J., Koutu G.K. Exploration of new plant type (NPT) rice lines for crop improvement. In: R.K. Naresh (ed.). *Advances in Agriculture Sciences. Vol. 19*. New Delhi: AkiNik Publications; 2019. p.53-67.
- Ross Yu.K. Radiation regime and architectonics of vegetation cover (Radiatsionnyy rezhim i arkhitektonika rastitel'nogo pokrova). Leningrad: Gidrometeoizdat; 1975. [in Russian] [Росс Ю.К. Радиационный режим и архитектоника растительного покрова. Ленинград: Гидрометеоздат; 1975].
- Sasahava T., Cheng C.H., Seno K. Photosynthetic capacity and inheritance of V-type leaf in rice. *Japanese Journal of Breeding*. 1989;39(1):15-22. [in Japanese]
- Shilovsky V.N., Kharitonov E.M., Sheujen A.Kh. Rice breeding and cultivars in Kuban (Selektsiya i sorta risa na Kubani). Maikop; 2001. [in Russian] [Шиловский В.Н., Харитонов Е.М., Шеуджен А.Х. Селекция и сорта риса на Кубани. Майкоп; 2001].
- 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: 01.09.2023].
- Thudi M., Palakurthi R., Schnable J.C., Chitikineni A., Dreisgacker S., Mace E. et al. Genomic resources in plant breeding for sustainable agriculture. *Journal of Plant Physiology*. 2021;257:153351. DOI: 10.1016/j.jplph.2020.153351
- Tkachenko M.A., Gnenny E.Yu., Dinkova V.S., Samelik E.G., Zelensky G.L. Dependence of the vertical-leaved rice varieties productivity on plant density and level of nitrogen nutrition. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2022;(179):22-32. [in Russian] [Ткаченко М.А., Гненный Е.Ю., Динкова В.С., Самелик Е.Г., Зеленский Г.Л. Зависимость продуктивности вертикальнолистных сортов риса от густоты стояния и уровня азотного питания. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2022;(179):22-32]. DOI: 10.21515/1990-4665-179-003

- Wang F., Peng S.B. Yield potential and nitrogen use efficiency of China's super rice. *Journal of Integrative Agriculture*. 2017;16(5):1000-1008. DOI: 10.1016/S2095-3119(16)61561-7
- Wang F., Wang C., Liu P., Lei C., Hao W., Gao Y. et al. Enhanced rice blast resistance by CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the ERF transcription factor gene *OsERF922*. *PLoS One*. 2016;11(4):e0154027. DOI: 10.1371/journal.pone.0154027
- Wing R.A., Purugganan M.D., Zhang Q. The rice genome revolution: from an ancient grain to Green Super Rice. *Nature Reviews. Genetics*. 2018;19(8):505-517. DOI: 10.1038/s41576-018-0024-z
- Wu X. Prospects of developing hybrid rice with super high yield. *Agronomy Journal*. 2009;101(3):688-695. DOI: 10.2134/agronj2008.0128f
- Yu S., Ali J., Zhang C., Li Z., Zhang Q. Genomic breeding of Green Super Rice varieties and their deployment in Asia and Africa. *Theoretical and Applied Genetics*. 2020;133(5):1427-1442. DOI: 10.1007/s00122-019-03516-9
- Yu S., Ali J., Zhou S., Ren G., Xie H., Xu J. et al. From Green Super Rice to green agriculture: Reaping the promise of functional genomics research. *Molecular Plant*. 2022;15(1):9-26. DOI: 10.1016/j.molp.2021.12.001
- Yuan L. Progress in super-hybrid rice breeding. *The Crop Journal*. 2017;5(2):100-102. DOI: 10.1016/j.cj.2017.02.001
- Zelensky G., Dubina E., Ladatko M., Zelenskaya O. Innovative trends in breeding disease resistant rice varieties. *E3S Web of Conference*. 2021;285:02029. DOI: 10.1051/e3sconf/202128502029
- Zelensky G.L. Biological potential of the rice plant (Biologicheskiy potentsial risovogo rasteniya). *Doklady VASKhNIL = Reports of VASKhNIL*. 1985;(11):16-18. [in Russian] (Зеленский Г.Л. Биологический потенциал рисового растения. *Доклады ВАСХНИЛ*. 1985;(11):16-18).
- Zelensky G.L. New high-yielding forms of rice (Novye vysokourozhaynye formy risa). *Russian Agricultural Sciences*. 1998;(4):14-15. [in Russian] (Зеленский Г.Л. Новые высокоурожайные формы риса. *Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук*. 1998;(4):14-15).
- Zelensky G.L. Response of rice forms with erectoid leaves for thickness. *Rice Growing*. 2005;(7):21-25. [in Russian] (Зеленский Г.Л. Реакция форм риса с эректоидными листьями на загущение. *Рисоводство*. 2005;(7):21-25).
- Zelensky G.L., Tkachenko M.A., Gnenny E.Yu. Polus 5 – a rice variety with a new plant morphotype. *Rice Growing*. 2023;2(59):39-46. [in Russian] (Зеленский Г.Л., Ткаченко М.А., Гненный Е.Ю. Полюс-5 – сорт с новым морфотипом растений. *Рисоводство*. 2023;2(59):39-46). DOI: 10.33775/1684-2464-2023-59-2-39-46
- Zelensky G.L., Zelenskaya O.V. Rice: from a plant to a dietary product: a monograph (Ris: ot rasteniya do dieticheskogo produkta: monografiya). Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2022. [in Russian] (Зеленский Г.Л., Зеленская О.В. Рис: от растения до диетического продукта: монография. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2022).
- Zhang Q. Strategies for developing Green Super Rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2007;104(42):16402-16409. DOI: 10.1073/pnas.0708013104

Информация об авторах

Григорий Леонидович Зеленский, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Федеральный научный центр риса, 350921 Россия, Краснодар, пос. Белозерный, 3, профессор, Кубанский государственный аграрный университет, 350044 Россия, Краснодар, ул. Калинина, 13, zelensky08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7340-8432>

Ольга Всеволодовна Зеленская, кандидат биологических наук, доцент, Кубанский государственный аграрный университет, 350044 Россия, Краснодар, ул. Калинина, 13, zelenskayaolga-2011@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4362-3568>

Information about the authors

Grigory L. Zelensky, Dr. Sci. (Agriculture), Chief Researcher, Federal Scientific Rice Center, 3 Belozerny Settlem., Krasnodar 350921, Russia, Professor, Kuban State Agrarian University, 13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russia, zelensky08@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7340-8432>

Olga V. Zelenskaya, Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Kuban State Agrarian University, 13 Kalinina St., Krasnodar 350044, Russia, zelenskayaolga-2011@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-4362-3568>

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 11.10.2023; одобрена после рецензирования 04.12.2023; принята к публикации 04.03.2024. The article was submitted on 11.10.2023; approved after reviewing on 04.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

Обзорная статья
УДК 575.22;631.524;631.527
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-224-232



Андрогенез и гиногенез в культуре томата (*Solanum lycopersicum* L.) *in vitro*

А. А. Шергина, А. Б. Курина

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

Автор, ответственный за переписку: Алиса Андреевна Шергина, a.shergina@vir.nw.ru

Томат (*Solanum lycopersicum* L.) – одна из наиболее потребляемых овощных культур. Плоды томата богаты витаминами, минералами и пигментами, включая ликопин. В связи с высоким спросом и увеличением производства появляется необходимость в получении новых улучшенных сортов и гибридов F_1 .

Биотехнологические методы сокращают время для создания исходного материала и снижают трудоемкость селекционных работ. Получение удвоенных гаплоидных растений позволяет фиксировать и анализировать новые комбинации генов за меньшее время, чем требуется при традиционной селекции, а также получать гомозиготные растения. Считается, что томаты малоотзывчивы к гаплоидной индукции, что является предметом исследований уже более 40 лет и все еще представляет особый интерес. Основные методы получения гаплоидов основаны на андрогенезе и гиногенезе.

Целью данной работы является обзор исследований получения гаплоидов томата путем андрогенеза и гиногенеза. В настоящее время нет эффективных и воспроизводимых протоколов для получения удвоенных гаплоидов этой культуры. Необходимо определить инкубационные условия, физико-химические условия среды, зависимость генотипа культуры *in vitro*, физиологическое состояние донорного растения и развитие пыльника, которые влияют на повторяемость протоколов для достижения индукции гаплоидии.

Культура пыльников для получения гаплоидных растений томата не дала успешных результатов, а исследований по культуре микроспор было проведено мало, поэтому трудно дать оценку эффективности данного способа. Методы на основе гиногенеза малоизучены, однако потенциально культура неоплодотворенных семязпочек может стать успешным способом получения гаплоидов томата при ее дальнейшей разработке.

Ключевые слова: томат, гаплоиды, гиногенез, андрогенез

Благодарности: статья подготовлена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0012 «Клеточные технологии для расширения селекционного потенциала культур овощного направления использования».

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

Для цитирования: Шергина А.А., Курина А.Б. Андрогенез и гиногенез в культуре томата (*Solanum lycopersicum* L.) *in vitro*. Труды прикладной ботанике, генетике и селекции. 2024;185(1):224-232. DOI:10.30901/2227-8834-2024-1-224-232

SURVEYS

Review article

DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-224-232

**Androgenesis and gynogenesis in tomato (*Solanum lycopersicum* L.)
*in vitro***

Alisa A. Shergina, Anastasia B. Kurina

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia***Corresponding author:** Alisa A. Shergina, a.shergina@vir.nw.ru

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most consumed vegetable crops worldwide. Tomato fruits are rich in vitamins, minerals, and pigments, including lycopene. The high demand and the need to enhance tomato production call for new improved cultivars and F₁ hybrids.

Biotechnological methods reduce the time for source material development and the labor intensity of breeding efforts. Obtaining doubled haploid plants makes it possible to fix and analyze new gene combinations faster than with conventional breeding techniques, and produce homozygous genotypes. Tomato is highly unsusceptible to haploid induction, which has been continuously studied for more than 40 years and is still of special interest. The main methods for producing haploids are based on androgenesis and gynogenesis. Androgenesis is the production of haploids from the cells of the male gametophyte, and gynogenesis from the cells of the female gametophyte.

The objective was to review the research on the induction of tomato haploids based on androgenesis and gynogenesis. No standardized, efficient or reproducible protocols are currently available to produce doubled haploids of tomato. It is necessary to determine the incubation conditions, physicochemical environments, dependence of the genotype *in vitro*, physiological state of the donor plant, and development of the anther, which affect the reproducibility of protocols to achieve haploid induction.

Anther culture for obtaining haploid tomato plants has not yielded successful results, and the studies on microspore culture were too few, so it is difficult to understand the effectiveness of this technique. The method of gynogenesis is poorly investigated, but the culture of unfertilized ovules can become a successful way to obtain tomato haploids, with more research on this subject.

Keywords: tomato, haploids, gynogenesis, androgenesis**Acknowledgments:** the article was prepared as part of the state task assigned to VIR in accordance with the theme plan on Project No. FGEM-2022-0012 "Cell technologies for expanding the breeding potential of vegetable crops".

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

For citation: Shergina A.A., Kurina A.B. Androgenesis and gynogenesis in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) *in vitro*. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):224-232. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-224-232

Введение

Томат (*Solanum lycopersicum* L. (= *Lycopersicon esculentum* Mill.) является одной из наиболее потребляемых овощных культур во всем мире. По данным ФАО ООН, в 2021 г. в мире было произведено 189,14 млн т томатов на площади более 5 млн га, в России произведено 3,06 млн т на площади 7,9 тыс. га, а средняя урожайность с квадратного метра составила 3,7 кг в мире и 3,9 кг в России (FAOSTAT..., 2021). В Государственном реестре селекционных достижений РФ, допущенных к использованию на 2023 год, насчитывается 3570 образцов томата, из которых 58,6% являются гибридами F₁.

Томат – это травянистое растение, выращиваемое в однолетней культуре (Yershova, 1978). Являясь факультативным самоопылителем, он может скрещиваться внутри вида, а также с некоторыми дикими видами, благодаря чему возможно получение спонтанных гибридов (Avdeev, 1982; Iqbal et al., 2019).

Плоды томата богаты биологически активными веществами – микроэлементами, полифенолами, витаминами и каротиноидами (включая ликопин), которые имеют выраженные антиоксидантные свойства, помогая снизить риск онкологических и других заболеваний (Avdeev, 1982; Abewoy Fentik, 2017). В связи с высоким спросом и увеличением производства появляется необходимость в получении новых улучшенных сортов и гибридов F₁.

Существуют традиционные (классические) и современные методы селекции. Прогресс в селекции томатов был достигнут в основном за счет классических методов: интрогрессия признаков из родственных диких видов *Solanum*, массовый и индивидуальный отбор из популяций и гибридизация (Avdeev, 1982; Lin et al., 2014; Abewoy Fentik, 2017; Iqbal et al., 2019). К современным методам относятся биотехнологические: культура тканей, получение гаплоидных растений, культура протопластов и соматическая гибридизация, спасение эмбрионов, а также генная инженерия (Thomas, Pratt, 1981; Van den Bulk et al., 1990; Wijbrandi et al., 1990; Ali et al., 2014; Seguí-Simarro, 2016).

Наилучшие показатели по урожайности и качеству плодов показывают гибриды F₁ (Seguí-Simarro, 2016). Использование традиционных методов селекции для получения генетически однородных гибридов у самоопыляемых растений, в том числе у томата, требует большего количества времени. Чистые линии получают путем 5-6 поколений инбридинга; это означает, что время, затраченное на выведение нового сорта, составляет от 11 до 13 лет (Yan et al., 2017). Биотехнологические методы сокращают время создания исходного материала и снижают трудоемкость селекционных работ (Gerszberg et al., 2015).

В настоящее время имеется много информации о физиологических, генетических и биохимических особенностях томата, разработаны молекулярные маркерные системы, составлены генетические карты, но до сих пор не разработана технология получения гаплоидов этой культуры (Rick, Butler, 1956; Foolad, 2013; Ali et al., 2014; Abewoy Fentik, 2017; Kurina et al., 2021; Musa et al., 2023).

Получение гаплоидов предоставляет возможность фиксировать и анализировать новые комбинации генов за меньшее время, чем требуется при традиционной селекции, а также позволяет создавать полностью гомозиготные растения (Zorzoli et al., 2007). Удвоенные гаплоиды наиболее широко используются у различных сельскохозяйственных культур из-за их эффективности в полу-

чении чистых линий (Yan et al., 2017). В настоящее время разрабатывают различные методы для получения гаплоидов томата.

В данной работе представлен обзор исследований по получению гаплоидов томата с использованием клеточных технологий *in vitro*.

Гаплоидия у томата

В последние годы все больше развиваются методы ускоренного получения чистых линий через удвоенные гаплоиды. Основные методы базируются на таких формах развития, как андрогенез и гиногенез. Путем андрогенеза гаплоиды получают из клеток мужского гаметофита через культуру пыльников или микроспор. На основе гиногенеза используются клетки женского гаметофита посредством культуры неоплодотворенных семязпочек (Marin-Montes et al., 2022).

Считается, что томаты малоотзывчивы к гаплоидной индукции (Seguí-Simarro, 2010). В мировой практике был выполнен ряд исследований по получению гаплоидов томата, но они не дали однозначных результатов, так как не были разработаны стандартизированные и воспроизводимые протоколы (Marin-Montes et al., 2022). В результате были выявлены факторы, препятствующие достижению поставленной цели, в частности слабая отзывчивость на культивирование *in vitro* (Bal, Abak, 2007; Niazi et al., 2019), а также полиплоидия, вызванная слиянием ядер (Corral-Martínez et al., 2011; Julião et al., 2015). Также на частоту эмбриогенеза влияет генотип, состояние донорного растения и стадия развития микроспор (Seguí-Simarro, 2016; Niazi et al., 2019).

Ниже мы подробнее рассмотрим результаты исследований по получению гаплоидов путем андрогенеза и гиногенеза.

Андрогенез в культуре томата. Первое исследование культуры микроспор томата опубликовали W. R. Sharp et al. (1971), в нем сообщалось, об образовании каллуса, однако получить растения-регенеранты не удалось. P. M. Greeshoff, C. H. Doy (1972) впервые написали о индуцировании каллуса из пыльников томата.

В работе U. Bal, K. Abak (2007) выявлены факторы, влияющие на отзывчивость пыльников томата к каллусогенезу: генотип, стадия развития микроспор, предварительная обработка бутонов, а также состав питательной среды.

Генотип донорного растения является одним из важных факторов, определяющих реакцию микроспор на состав питательной среды и условия культивирования. P. M. Greeshoff, C. H. Doy (1972) отмечали, что каллусообразование наблюдалось только у трех культурных сортов, а побегообразование – у одного из 43 используемых генотипов. Сообщалось, что некоторые мутантные линии томата, несущие ген *ms10³⁵* мужской стерильности, отзывчивы к индукции андрогенных каллусов (Zamir et al., 1980; Zagorska et al., 1998; Shtereva et al., 1998; Zagorska et al., 2004; Seguí-Simarro, Nuez, 2005, 2007).

Стадия развития микроспор является важным фактором для индукции эмбрио- или каллусогенеза. Однако данные об этом в разных исследованиях противоречивы. В первых исследованиях сообщается об индукции каллуса из пыльников с микроспорами на ранних стадиях мейоза (Greeshoff, Doy, 1972; Zamir et al., 1980; Summers et al., 1992). Позднее в некоторых работах появились данные о том, что критический период совпадает с мейотиче-

ским развитием и тетрадами (Summers et al., 1992; Shtereva et al., 1998). Также есть мнение, что индукция каллусогенеза из пыльников происходит на последней стадии вакуолизованных микроспор (Nguen, Shamina, 1978; Bal, Abak, 2005). Позже J. M. Seguí-Simarro, F. Nuez (2005) в своем исследовании сообщали, что индуцируемая стадия развития микроспор находится между метафазой I и телофазой II.

Предварительная обработка бутонов благоприятно сказывается на индукции эмбрио- и каллусогенеза. У томата проводилась обработка повышенными или пониженными температурами (температурный шок). L. Shtereva et al. (1998) изучали влияние предварительной температурной обработки при 4, 7, 10 и 35°C в течение разного количества дней. В этом же исследовании было проведено облучение гамма-лучами в качестве предварительной обработки в разных дозах 2 Гр, 4 Гр и 8 Гр. Также изучалось влияние комбинированного действия гамма-лучей и температурного шока. В результате комбинированной обработки 4 Гр и 10°C в течение

9 дней индуцирован каллус с высокой способностью к регенерации.

В своем исследовании M. Seguí-Simarro, F. Nuez (2007) проводили предварительную обработку бутонов средой, состоящей из 2 мг/л⁻¹ тиамин хлорида, 5 мг/л⁻¹ никотиновой кислоты, 0,5 мг/л⁻¹ D(+)-биотина, 10 мМ CaCl₂, 100 мг/л⁻¹ колхицина, 5 мг/л⁻¹ AgNO₃ и 0,3 М маннита, pH 5,7. Однако данный способ оказался неэффективным.

В ранних исследованиях использовались три основные питательные среды: DBM I, DBM II и DBM III с различными концентрациями НУК (1-нафталинуксусная кислота) и кинетина (Greeshoff, Doy, 1972). Сейчас наиболее часто используемая питательная среда – МС (Мурасиге – Скуга) с различным содержанием регуляторов роста (Zamir et al., 1980; Zagorska et al., 2004; Seguí-Simarro, Nuez, 2006, 2007; Corral-Martínez et al., 2011; Ahmadi et al., 2015; Kumar et al., 2020).

В таблице представлены результаты исследований методов на основе андрогенеза за последние 20 лет.

Таблица. Сравнительный анализ методов на основе андрогенеза томата
Table. Comparative analysis of androgenesis-based methods for tomato

Тип экспланта / Explant type	Предварительная обработка / Pretreatment	Питательная среда / Nutrient medium	Результат / Result	Источник / Reference
Пыльники, размер бутонов 2,0–3,0 мм	-	Индукционная среда: МС + 20 г/л сахарозы, 7 г/л агара, 1 мг/л 2-ИП и 2 мг/л ⁻¹ ИМК; МС + 20 г/л сахарозы, 7 г/л агара, 0,25 мг/л зеатина + 0,5 мг/л ИУК Среда для укоренения: ½ МС + 2 мг/л ИМК и 0,5 мг/л ⁻¹ ГК	Из 700 регенерированных растений 151 были гаплоидными, 79 были диплоидными, а остальные были миксоплоидными с широким диапазоном числа хромосом	Zagorska et al., 2004
Пыльники, размер бутонов 4,0–6,5 мм	-	Индукционная среда: МС + 2,5 г/л фитагеля, 20 г/л сахарозы, 1 мг/л 2-ИП и 2 мг/л ИУК Среда для регенерации: 4,4 г/л МС + 2,5 г/л фитагеля, 20 г/л сахарозы, 0,25 мг/л рибозид-зеатина Среда для укоренения: ½ МС + 2 мг/л ИМК и 0,5 мг/л ГК	Получены три различных типа каллуса. Каллус первого типа – соединительная ткань, отсутствуют гаплоидные клетки. Каллус второго и третьего типа – 7% гаплоидных клеток	Seguí-Simarro, Nuez, 2006
Пыльники, размер бутонов 1,0–9,0 мм	-	Индукционная среда: МС + 2,5 г/л фитагеля, 20 г/л сахарозы, 1 мг/л 2-ИП и 2 мг/л ИУК Среда для регенерации: МС + 2,5 г/л фитагеля, 20 г/л сахарозы, 0,25 мг/л рибозид-зеатина Среда для укоренения: ½ МС + 10 г/л сахарозы	Образование каллуса наблюдалось у шести из восьми протестированных генотипов: 66% каллусов были миксоплоидными, 13% – гаплоидными. Получены растения-регенеранты из двух генотипов. 20,4% растений-регенерантов оказались миксоплоидными, а гаплоидных – 9,3%	Seguí-Simarro, Nuez, 2007

Таблица. Продолжение
Table. Continued

Тип экспланта / Explant type	Предварительная обработка / Pretreatment	Питательная среда / Nutrient medium	Результат / Result	Источник / Reference
Пыльники, размер бутончиков 1,0–9,0 мм	Питательная среда: 2 мг/л ⁻¹ тиамин хлорида, 5 мг/л ⁻¹ никотиновой кислоты, 0,5 мг/л ⁻¹ D(+)-биотина, 10 мМ CaCl ₂ , 100 мг/л ⁻¹ колхицина, 5 мг/л ⁻¹ AgNO ₃ и 0,3 М маннита при 7°C в течение 6 дней в темноте	Индукционная среда: NLN + 2,5 г/л фитагеля, 130 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП и 0,5 мг/л НУК	Реакции не наблюдалось. Через 2 месяца культивирования пыльники отмирани	Seguí-Simarro, Nuez, 2007
Микроспоры, размер бутончиков 1,0–9,0 мм	-	Индукционная среда: МС + 20 г/л сахарозы, 1 мг/л 2-ИП и 2 мг/л ⁻¹ ИУК	Образования каллуса или эмбрионов не наблюдалось	
Микроспоры, размер бутончиков 1,0–9,0 мм	-	Индукционная среда: NLN + 130 г/л сахарозы, 0,5 мг/л БАП и 0,5 мг/л НУК	Появление многоклеточных эмбрионоподобных структур у двух из восьми протестированных генотипов	
Пыльники, размер бутончиков 4,0–5,0 мм	-	Индукционная среда: МС + 2,5 г/л фитагеля, 20 г/л сахарозы, 1 мг/л 2-ИП и 2 мг/л ИУК Среда для регенерации: 4,4 г/л МС + 2,5 г/л фитагеля, 20 г/л сахарозы, 0,25 мг/л рибозид-зеатина Среда для укоренения: 2,2 г/л МС + 2,5 г/л фитагеля и 10 г/л сахарозы	Было получено 965 каллусов от трех генотипов. Из 83 регенерированных растений получено одно гаплоидное	Corral-Martínez et al., 2011
Пыльники на разных стадиях развития микроспор	-	Индукционная среда: МС + 2% сахарозы, 0,25% фитагеля, мг/л 2-ИП, 2 мг/л ИУК Среды для регенерации: МС + 2% сахарозы, 0,25% фитагеля, 0,25 мг/л рибозид-зеатина МС + 2% сахарозы, 0,25% фитагеля, 0,125 мг/л рибозид-зеатина, 0,5 г/л Д-сорбитол и 1% агара Среда для укоренения: МС + 2% сахарозы, 0,25% фитагеля, 0,5 г/л Д-сорбитол, 1% агара, 1 мг/л CuSO ₄ ·5H ₂ O	Гаплоидных растений не получено. 5 из 56 диплоидов и 1 из 27 полиплоидов были частично гомозиготными	Moreno et al., 2012

Таблица. Окончание
Table. The end

Тип экспланта / Explant type	Предварительная обработка / Pretreatment	Питательная среда / Nutrient medium	Результат / Result	Источник / Reference
Пыльницы, размер бутончиков 2,0–8,0 мм	Холодовой шок при 4°C и 7°C в течение 2, 4, 6, 7, 8, и 9 дней	<p>Индукционные среды: МС + 2 мг/л ИУК, 1 мг/л 2-ИП; МС + 2 мг/л НУК + 1 мг/л кинетин + 2 мг/л 2,4-Д; МС + 2 мг/л НУК + 1 мг/л кинетин; NLN + 0,5 мг/л БАП + 0,5 мг/л НУК; МС + 2,5 мг/л НУК + 0,5 мг/л кинетин</p> <p>Среды для регенерации: МС + 2,0 мг/л БАП + 0,2 мг/л НУК; МС + 0,5 мг/л зеатин; МС + 1,5 мг/л БАП; МС + 1 мг/л ГК + 0,05 мг/л БАП + 0,1 мг/л НУК</p> <p>Среда для укоренения: ½ МС с добавлением 0,1 мг/л ИМК</p>	<p>Индукция каллуса наблюдалась только на среде МС + 2-ИП (1 мг/л), ИУК (2 мг/л). У 8 генотипов из 31 наблюдалась индукция каллуса. Регенерация наблюдалась только на среде МС + зеатин (0,5 мг/л)</p>	Kumar et al., 2020

При разработке технологии получения гаплоидов на основе андрогенеза с использованием культуры пыльников и культуры микроспор так и не было получено успешных и воспроизводимых результатов.

Гиногенез в культуре томата. Альтернативным методом получения гаплоидных растений томата является культура неоплодотворенных семяпочек. Однако таких исследований было крайне мало, и они не дали успешных результатов.

Был проведен ряд работ по получению гаплоидных растений с помощью культуры неоплодотворенных семяпочек. Впервые о возможности культивирования семяпочек томата сообщили в своем исследовании U. Bal, K. Abak (2003b). Развития каллуса не наблюдалось, однако авторы отмечали, что семязачатки оставались живы в течение некоторого времени, а из соматических тканей каллус не развился, вследствие чего авторами был сделан вывод о том, что данный способ является перспективным и многообещающим и необходимы дальнейшие исследования.

В исследовании H. Zhao et al. (2014) сообщалось о получении каллуса из семяпочки. В эксперименте использовали индукционную среду В5 с различными регуляторами роста. После переноса каллуса на среду для регенерации (В5 + ИУК 0,01 мг/л + зеатин 2,0 мг/л) получены растения-регенеранты у одного из двух используемых сортов, однако набор хромосом оказался диплоидным.

Для получения гаплоидов используется метод на основе партеногенеза через опыление облученной пыльцой. Сообщалось о том, что пыльца *Solanum pimpinellifolium* L. сохраняет свою прорастающую способность, что дает возможность получать плоды с несколькими семенами при дозах рентгеновского излучения от 2000 до 7000 Гр (Nishiyama, Tsukuda, 1959). В следующем исследовании I. Nishiyama и S. Tsukuda (1961) рассказывали о применении облучения в дозировках от 100 до 1100 Гр с шагом 100 Гр и γ -излучении пыльцы *S. pimpinellifolium*, в ходе чего обнаружили, что это оказывает одинаковое влияние на прорастание и образование плодов; при этом

способность прорастания пыльцы составляет менее 50% с дозами выше 300 Гр.

В исследовании Г. А. Кирилловой и Е. Н. Богдановой (Kirillova, Bogdanova, 1978) сообщалось о применении облученной рентгеновскими лучами пыльцы в дозировке 500 Гр. В результате только одно растение из 8964 было гаплоидным и имело 12 хромосом.

Представленные исследования показали, что опыление облученной пыльцой малоэффективно, так как используемые дозы не позволяют полностью инактивировать генетический материал микроспор и вызвать гаплоидный партеногенез.

Следующий метод путем партеногенеза базируется на отдаленной гибридизации, а именно: опылении чужеродной пыльцой, которая имеет способность прорасти на рыльце пестика, пыльцевые трубки способны достигать семяпочки, но при этом оплодотворения не происходит (Shmikova, 2009). Попытки получения гаплоидов этим способом проводились с использованием пыльцы *Solanum sisymbriifolium* Lam., с положительным результатом так и не был получен (Bal, Abak, 2003a).

Возможность получения гаплоидов *in vivo* с использованием *CRISPR/Cas9* у томата недостаточно изучена, но имеет большой потенциал. В своем исследовании Y. Zhong et al. (2022) предлагают использовать мутанты *sldmp* для увеличения уровня гаплоидной индукции с 0,5% до 3,7% и идентифицировать гаплоидные эмбрионы с помощью маркера FAST-Red.

Немногочисленные исследования методов на основе гиногенеза у томата показали, что данная технология малоизучена, так что необходима дальнейшая работа по разработке и совершенствованию протоколов получения гаплоидов у данной культуры.

Заключение

Несмотря на экономическую значимость, на накопленные знания в области генетики, биохимии и физиологии томата, для данной культуры все еще нет эффективных протоколов получения гаплоидов. По-прежнему

необходимо определить инкубационные условия, физико-химические условия среды, влияние генотипа культуры *in vitro*, физиологическое состояние донорного растения и стадии развития микроспор, которые влияют на воспроизводимость протоколов.

Культура пыльников для получения гаплоидных растений томата не дала успешных результатов, а исследований культуры микроспор было проведено недостаточно, поэтому трудно дать оценку эффективности данного способа. Методы на основе гиногенеза недостаточно изучены, однако культура неоплодотворенных семяпочек может стать успешным способом получения гаплоидов томата при дальнейшей разработке успешных протоколов.

References / Литература

- Abewoy Fentik D. Review on genetics and breeding of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Advances in Crop Science and Technology*. 2017;5(5):306. DOI: 10.4172/2329-8863.1000306
- Ahmadi B., Shariatpanahi M.E., Asghari-Zakaria R., Zare N., Azadi P. Efficient microspore embryogenesis induction in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) using shed microspore culture. *Journal of Pure and Applied Microbiology*. 2015;9:21-29. DOI: 10.13140/RG.2.1.3265.8805
- Ali A., Muzaffar A., Awan M.F., ud Din S., Nasir I.A., Husnain T. Genetically modified foods: engineered tomato with extra advantages. *Advancements in Life Sciences*. 2014;1(3):139-152.
- Avdeev Yu.I. Tomato breeding (Seleksiya tomatov). Kishinev: Ştiinţa; 1982. [in Russian] (Авдеев Ю.И. Селекция томатов. Кишинев: Штиинца; 1982).
- Bal U., Abak K. Attempts of haploidy induction in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) via gynogenesis I: Pollination with *Solanum sisymbriifolium* Lam. pollen. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 2003a;6(3):745-749. DOI: 10.3923/pjbs.2003.745.749
- Bal U., Abak K. Attempts of haploidy induction in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) via gynogenesis II: *In vitro* non-fertilized ovary culture. *Pakistan Journal of Biological Sciences*. 2003b;6(8):750-755. DOI: 10.3923/pjbs.2003.750.755
- Bal U., Abak K. Haploidy in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): a critical review. *Euphytica*. 2007;158(1):1-9. DOI: 10.1007/s10681-007-9427-1
- Bal U., Abak K. Induction of symmetrical nucleus division and multicellular structures from the isolated microspore of *Lycopersicon esculentum* Mill. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 2005;19(1):35-42. DOI: 10.1080/13102818.2005.10817151
- Bhatia P., Ashwath N., Senaratna T., Midmore D. Tissue culture studies of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2004;78(1):1-21. DOI: 10.1023/B:TICU.0000020430.08558.6e
- Corral-Martínez P., Nuez F., Seguí-Simarro J.M. Genetic, quantitative and microscopic evidence for fusion of haploid nuclei and growth of somatic calli in cultured ms10³⁵ tomato anthers. *Euphytica*. 2011;178(2):215-228. DOI: 10.1007/s10681-010-0303-z
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture data. Rome: FAO; 2021. Available from: <http://www.fao.org/faostat/en/#data> [accessed Jan. 29, 2023].
- Foolad M.R. High lycopene content tomato plants and markers for use in breeding for same. USA; patent number: US20090241209A1; 2013.
- Gerszberg A., Hnatuszko-Konka K., Kowalczyk T., Kononowicz A.K. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the service of biotechnology. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2015;120(3):881-902. DOI: 10.1007/s11240-014-0664-4
- Greeshoff P.M., Doy C.H. Development and differentiation of haploid *Lycopersicon esculentum* (tomato). *Planta*. 1972;107(2):161-170. DOI: 10.1007/BF00387721
- Iqbal R.K., Saeed K., Khan A., Noreen I., Bashir R. Tomato (*Lycopersicon esculentum*) fruit improvement through breeding. *Scholar Journal of Applied Sciences and Research*. 2019;2(7):21-25.
- Julião S.A., Carvalho C.R., da Silva T.C.R., Koehler A.D. Multiploidy occurrence in tomato calli from another culture. *African Journal of Biotechnology*. 2015;14(40):2846-2855. DOI: 10.5897/AJB2015.14525
- Kirillova G.A., Bogdanova E.V. Comparative study of the long-existing haploid form of tomato and homozygous derived from it. *Russian Journal of Genetics*. 1978;14(8):1030-1037. [in Russian] (Кириллова Г.А., Богданова Е.Н. Сравнительное изучение длительно существующей гаплоидной формы томата и гомозиготной полученной из нее. *Генетика*. 1978;14(8):1030-1037).
- Kumar S., Jindal S.K., Sarao N.K., Dhaliwal M.S. Callus induction and plant regeneration of tomato through another culture. *Vegetable Science*. 2020;47(1):23-27.
- Kurina A.B., Solovieva A.E., Khrapalova I.A., Artemyeva A.M. Biochemical composition of tomato fruits of various colors. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(5):514-527. DOI: 10.18699/VJ21.058
- Lin T., Zhu G., Zhang J., Xu X., Yu Q., Zheng Z. et al. Genomic analyses provide insights into the history of tomato breeding. *Nature Genetics*. 2014;46(11):1220-1226. DOI: 10.1038/ng.3117
- Marin-Montes I.M., Rodríguez-Pérez J.E., Robledo-Paz A., de la Cruz-Torres E., Peña-Lomelí A., Sahagún-Castellanos J. Haploid induction in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) via gynogenesis. *Plants*. 2022;11(12):1595. DOI: 10.3390/plants11121595
- Moreno A., Claveria E., Pujol M., Dolcet-Sanjuan R. Development of a methodology for the production of doubled haploid lines in *Solanum lycopersicum* L. *Acta Horticulturae*. 2012;935:95-100. DOI: 10.17660/ActaHortic.2012.935.13
- Musa U.H., Isa H., Dasikwo S.Y., Kabido A.I., Abdullahi M.H. Cytological characterization of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) germplasm. *Journal of Agripreneurship and Sustainable Development*. 2023;6(1):106-112. DOI: 10.59331/jasd.v6i1.398
- Nguen T.D., Shamina Z.B. Culture of isolated tomato anthers. *Russian Journal of Plant Physiology*. 1978;25(1):155-160. [in Russian] (Нгуен Т.Д., Шамина З.Б. Культура изолированных пыльников томата. *Физиология растений*. 1978;25(1):155-160).
- Niazian M., Shariatpanahi M.E., Abdipour M., Oroojloo M. Modeling callus induction and regeneration in an anther culture of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) using image processing and artificial neural network method. *Protoplasma*. 2019;256(5):1317-1332. DOI: 10.1007/s00709-019-01379-x
- Nishiyama I., Tsukuda S. Effects of X- and gamma-irradiations on pollen fertility of *Lycopersicon pimpinellifolium*. *The Japanese Journal of Genetics*. 1961;36:423-427. DOI: 10.1266/jjg.36.423
- Nishiyama I., Tsukuda S. Radiobiological studies in plants I. Effects of X-rays upon pollen germination and fertility. *The Japanese Journal of Genetics*. 1959;34(11):363-370. DOI: 10.1266/jjg.34.363

- Prigge V., Xu X., Li L., Babu R., Chen S., Atlin G.N. et al. New insights into the genetics of *in vivo* induction of maternal haploids, the backbone of doubled haploid technology in maize. *Genetics*. 2011;190(2):781-793. DOI: 10.1534/genetics.111.133066
- Rick C.M., Butler L. Cytogenetics of the tomato. *Advances in Genetics*. 1956;8:267-382. DOI: 10.1016/S0065-2660(08)60504-0
- Seguí-Simarro J.M. Androgenesis in Solanaceae. *Methods in Molecular Biology*. 2016;1359:209-244. DOI: 10.1007/978-1-4939-3061-6_9
- Seguí-Simarro J.M. Androgenesis revisited. *The Botanical Review*. 2010;76(3):377-404. DOI: 10.1007/s12229-010-9056-6
- Seguí-Simarro J.M., Nuez F. Androgenesis induction from tomato anther cultures: callus characterization. *Acta Horticulturae*. 2006;725:855-861. DOI: 10.17660/ActaHortic.2006.725.118
- Seguí-Simarro J.M., Nuez F. Embryogenesis induction, callogenesis, and plant regeneration by *in vitro* culture of tomato isolated microspores and whole anthers. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58(5):1119-1132. DOI: 10.1093/jxb/erl271
- Seguí-Simarro J.M., Nuez F. Meiotic metaphase I to telophase II as the most responsive stage during microspore development for callus induction in tomato (*Solanum lycopersicum*) anther cultures. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2005;27(4):675-685. DOI:10.1007/s11738-005-0071-x
- Sharp W.R., Dougall D.K., Paddock E.F. Haploid plantlets and callus from immature pollen grains of *Nicotiana* and *Lycopersicon*. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 1971;98(4):219-222. DOI: 10.2307/2483689
- Shmikova N.A. Haploidy in tomato. *Vegetable Crops of Russia*. 2009;1(3):12-15. [in Russian] (Шмыкова Н.А. Гаплоидия у томата. *Овощи России*. 2009;1(3):12-15).
- Shtereva L., Zagorska N., Dimitrov B., Kruleva M.M., Oanh H.K. Induced androgenesis in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). II. Factors affecting induction of androgenesis. *Plant Cell Reports*. 1998;18(3-4):312-317. DOI: 10.1007/s002990050578
- State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotech; 2023. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2023). URL: <https://gossortrf.ru/publication/reestry.php> [дата обращения: 10.11.2023].
- Summers W.L., Jaramillo J., Bailey T. Microspore developmental stage and anther length influence the induction of tomato anther callus. *HortScience*. 1992;27(7):838-840. DOI: 10.21273/HORTSCI.27.7.838
- Thomas B.R., Pratt D. Efficient hybridization between *Lycopersicon esculentum* and *L. peruvianum* via embryo callus. *Theoretical and Applied Genetics*. 1981;59(4):215-219. DOI: 10.1007/BF00265495
- Van den Bulk R.W., Löffler H.J., Lindhout W.H., Koornneef M. Somaclonal variation in tomato: effect of explant source and a comparison with chemical mutagenesis. *Theoretical and Applied Genetics*. 1990;80(6):817-825. DOI: 10.1007/BF00224199
- Wijbrandi J., Posthuma A., Kok J.M., Rijken R., Vos J.G.M., Koornneef M. Asymmetric somatic hybrids between *Lycopersicon esculentum* and irradiated *Lycopersicon peruvianum*: 1. Cytogenetics and morphology. *Theoretical and Applied Genetics*. 1990;80(3):305-312. DOI: 10.1007/BF00210064
- Yan G., Liu H., Wang H., Lu Z., Wang Y., Mullan D. et al. Accelerated generation of selfed pure line plants for gene identification and crop breeding. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:1786. DOI: 10.3389/fpls.2017.01786
- Yershova V.L. Cultivation of tomatoes in the opened field (Vozdelyvaniye tomato v otkrytom grunte). Kishinev: Ştiinţa; 1978. [in Russian] (Ершова В.Л. Возделывание томатов в открытом грунте. Кишинев: Штиинца; 1978).
- Zagorska N. A., Shtereva L.A., Dimitrov B.D., Kruleva M.M. Induced androgenesis in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) I. Influence of genotype on androgenetic ability. *Plant Cell Reports*. 1998;17(12):968-973. DOI: 10.1007/s002990050519
- Zagorska N.A., Shtereva L.A., Kruleva M.M., Sotirova V.G., Baraliyeva D.L., Dimitrov B.D. Induced androgenesis in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). III. Characterization of the regenerants. *Plant Cell Reports*. 2004;22(7):449-456. DOI: 10.1007/s00299-003-0720-8
- Zamir D., Jones R.A., Kedar N. Anther culture of male sterile tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) mutants. *Plant Science Letters*. 1980;17(3):353-361. DOI: 10.1016/0304-4211(80)90168-6
- Zhao H., Wang X.X., Du Y.C., Zhu D.W., Guo Y.M., Gao J.C. et al. Haploid induction via *in vitro* gynogenesis in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Journal of Integrative Agriculture*. 2014;13(10):2122-2131. DOI: 10.1016/S2095-3119(13)60672-3
- Zhong Y., Chen B., Wang D., Zhu X., Li M., Zhang J. et al. *In vivo* maternal haploid induction in tomato. *Plant Biotechnology Journal*. 2022;20(2):250-252. DOI: 10.1111/pbi.13755
- Zorzoli R., Pratta G.R., Rodríguez G.R., Picardi L.A. Advances in biotechnology: Tomato as a plant model system. *Functional Plant Science and Biotechnology*. 2007;1(1):146-159.

Информация об авторах

Алиса Андреевна Шергина, 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, a.shergina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9964-0265>

Анастасия Борисовна Курина, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, nastya_n11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3197-4751>

Information about the authors

Alisa A. Shergina, Postgraduate Student, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.shergina@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9964-0265>

Anastasia B. Kurina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, nastya_n11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3197-4751>

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

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

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 05.09.2023; одобрена после рецензирования 05.12.2023; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 05.09.2023; approved after reviewing on 05.12.2023; accepted for publication on 04.03.2024.

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

Краткое сообщение
УДК 633.41:633.63:631.52
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-233-240



Буренин Валентин Иванович. Вся жизнь посвящена науке

Д. В. Соколова, Т. М. Пискунова

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

Автор, ответственный за переписку: Диана Викторовна Соколова, dianasokol@bk.ru

Имя доктора сельскохозяйственных наук, профессора Валентина Ивановича Буренина широко известно как в нашей стране, так и за рубежом. Всю свою жизнь он проработал в ВИР, посвятив себя науке. Валентин Иванович внес весомый вклад в дело развития идей Н. И. Вавилова по мобилизации и использованию растительных ресурсов. Приоритетными научными направлениями его деятельности были сбор, изучение и использование генетических ресурсов свеклы в селекции.

Ключевые слова: ВИР, Буренин В.И., генетические ресурсы, *Beta L.*, свекла

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Соколова Д.В., Пискунова Т.М. Буренин Валентин Иванович. Вся жизнь посвящена науке. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2024;185(1):233-240. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-233-240

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

Brief report
DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-233-240

Valentin I. Burenin. The entire life was dedicated to science

Diana V. Sokolova, Tatiana M. Piskunova

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

Corresponding author: Diana V. Sokolova, dianasokol@bk.ru

The name of Prof. Valentin I. Burenin, Doctor of Agricultural Sciences, is widely known both in Russia and abroad. He worked at VIR all his life, giving himself up to science. Valentin Burenin made a significant contribution to the development of Vavilov's ideas concerning mobilization and utilization of plant resources. His scientific research priorities were the collecting and studying of beet genetic resources, and their utilization in breeding practice.

Keywords: VIR, Valentin Burenin, genetic resources, *Beta L.*, beet

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

For citation: Sokolova D.V., Piskunova T.M. Valentin I. Burenin. The entire life was dedicated to science. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2024;185(1):233-240. DOI: 10.30901/2227-8834-2024-1-233-240

© Соколова Д.В., Пискунова Т.М., 2024

19 января 2024 г. в возрасте 86 лет ушел из жизни главный научный сотрудник Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член (академик) Петровской академии наук и искусств Буренин Валентин Иванович (рис. 1).

логических наук (Burenin, 1967, 1970, 1971; Burenin, Krasochkin, 1971).

В 1972 г. Валентин Иванович проходил годовую научную стажировку в институте свекловодства Германии, где участвовал в проведении разновалентных скрещиваний (в лаборатории генетики), получении тетраплоидов с помощью колхицина (в лаборатории цито-



Рис. 1. Валентин Иванович Буренин (2012 г.)

Fig. 1. Prof. Valentin I. Burenin (2012)

Его имя широко известно как в нашей стране, так и за рубежом. Много лет Валентин Иванович работал заместителем директора ВИР, курировал работу опытных станций в регионах и в течение 25 лет был заведующим отделом генетических ресурсов овощных и бахчевых культур. Высокие профессиональные и организаторские качества, настойчивость, коммуникабельность и деловой подход позволяли ему легко справляться со всеми поставленными задачами.

Валентин Иванович родился 4 января 1938 г. в г. Пошехонье Ярославской области в семье рабочих. Основы сельского хозяйства начал постигать в полеводческом техникуме города Пошехонно-Володарск, окончив его с отличием в 1956 г. Учебу продолжил в Курском сельскохозяйственном институте. В 1961 г. получил диплом о высшем образовании и был направлен на работу агрономом на Ярославскую областную опытную станцию.

В очную аспирантуру Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова Валентин Иванович пришел в 1964 г. и до конца дней связал свою судьбу только с этим учреждением. Под руководством доктора сельскохозяйственных наук Василия Трофимовича Красочкина в Пушкинских лабораториях ВИР Валентин Иванович начал свое диссертационное исследование на тему «Изучение и использование гетерозиса у гибридов первого поколения сахарно-кормовой свеклы». Было изучено 80 межсортовых гибридов свеклы от свободного опыления разных сортов отечественного и зарубежного происхождения и 120 гибридов, полученных от парных скрещиваний. В 1967 г. Валентин Иванович успешно защитил кандидатскую диссертацию и ему была присуждена ученая степень кандидата био-

логии), оценке биотипов с цитоплазматической мужской стерильностью (ЦМС) (в лаборатории селекции), отработке системы первичного семеноводства (в лаборатории семеноводства). Результаты стажировки были обобщены и опубликованы в брошюре «Селекция и семеноводство свеклы в ГДР» (Burenin, 1975).

В последующие годы В. И. Буренин занимался изучением коллекции свеклы, которая к тому времени насчитывала около 2000 образцов и включала дикорастущие виды, примитивные и переходные формы, стародавние и современные сорта и гибриды столовой, кормовой, листовой и сахарной свеклы из 77 стран мира. Продолжая и развивая свои исследования, он выделил из коллекции свеклы и подробно описал оригинальные образцы: биотипы со стабильным проявлением признаков «форма» и «окраска» корнеплодов, образцы с высоким уровнем раздельноплодности (односемянности), устойчивые к цветущности, биотипы с ЦМС и однолетним циклом развития, устойчивые к болезням, ультраскороспелые, а также тетраплоидные формы, включая дикорастущие виды (Burenin et al., 1979; Burenin, Yudaeva, 1981). Большое значение уделялось биохимическому составу корнеплодов (Yesyunina et al., 1979). Материалы изучения были использованы при проведении исследований по генетике отдельных признаков, при изучении вопросов эволюции и филогении рода *Beta* L., а также при проведении отдаленных скрещиваний (Burenin, Gavriluk, 1982; Burenin, 1983b; Burenin, 2018). В результате всестороннего изучения коллекции свеклы был получен колоссальный экспериментальный материал, оформленный в виде докторской диссертации «Свекла – *Beta* L. (систематика, генетика, исходный материал и методы селекции)»,

успешная защита которой состоялась в 1983 г. (Burenin, 1983a).

В процессе многолетней работы В. И. Буренин выполнил исследования по инбридингу, полиплоидии и апомиксису, цитоплазматической мужской стерильности, по генетике раздельноплодности и однолетнему циклу развития свеклы (Burenin, 2015; Burenin et al., 2016). Им установлен ряд важных закономерностей в эволюции, филогении и систематике, а также отдаленной гибридизации в роде *Beta* L. (Chesnokov et al., 2013). Отдельные образцы генетической коллекции использовались в качестве исходного материала для создания новых сортов и гибридов: скороспелых и холодостойких – столовой свеклы, устойчивых к цветущности и с повышенным содержанием сухих веществ и сахаров в корнеплодах – кормовой.

Осознавая огромную значимость экологической селекции, выявления пластичности и адаптивности образцов, В. И. Буренин уделял большое внимание эколого-географическому изучению (Burenin et al., 2013; Burenin, Sokolova, 2016; Burenin, Piskunova, 2019). Оценка коллекции проводилась в широком географическом диапазоне: на Полярной опытной станции ВИР (Мурманская область) – на холодостойкость и нецветущность; на Дальневосточной опытной станции ВИР – на устойчивость к болезням; на Московской, Волгоградской и Майкопской опытных станциях ВИР – по комплексу признаков (Burenin, Kuzmina, 1980; Burenin, Yudaeva, 1989; Burenin et al., 2016). Климатические условия Полярной опытной станции ВИР (пониженные температуры воздуха, короткий вегетационный период и длинный световой день) позволили дифференцировать исходный материал по степени цветущности и скороспелости (Burenin et al., 1989). В результате был получен исходный материал, использовавшийся для создания новых сортов и гибридов, обладающих признаками холодостойкости.

Приоритетными научными направлениями деятельности В. И. Буренина были сбор, изучение и использование генетических ресурсов в селекции корнеплодных растений, включающих не только свеклу, но и брюкву с репой (Burenin, Sokolova, 2017; Burenin et al., 2017). Кол-

лекция свеклы ВИР, куратором которой много лет являлся Валентин Иванович, была самой дорогой и любимой для него. Профессор заботился о поддержании коллекций и их пополнении, участвовал в 18 экспедициях по сбору растительных ресурсов, в пяти из них – за рубежом.

За десятки лет плодотворной научно-исследовательской деятельности В. И. Буренин выделил более 500 источников и 5 доноров селекционно ценных признаков, издал 11 каталогов-справочников и 3 методических указания, передал селекционерам в качестве исходного материала свыше 1,5 тысяч коллекционных образцов. Он был автором 10 сортов овощных культур, из которых шесть сортов свеклы: 'Валента' (Burenin, Piskunova, 1999), 'Красавица' (2002 г.), 'Бордо Односемянная' (2003 г.), 'Вировская Односемянная' (2004 г.), 'Фурор' (2007 г.), 'Свекман' (2008 г.).

Результаты исследований Валентина Ивановича обобщены более чем в 380 научных работах, включая монографии (в соавторстве): «Гетерозис овощных культур» (Boos et al., 1990), «Свекла» (Burenin, Pivovarov, 1998), «Генетические ресурсы рода *Beta* L. (Свекла)» (Burenin, 2007). Совместно с доктором сельскохозяйственных наук В. Т. Красочкиным он был редактором XVIII тома и автором подразделов XVIII и XIX томов «Культурной флоры СССР» (Krasochkin et al., 1971; Shebalina, Sazonova, 1985). При его непосредственном участии в качестве автора и под его редакцией (Burenin, Shevtsov, 1990; Fadeeva et al., 1990) вышла в свет третья книга из серии издания «Генетика культурных растений». Валентин Иванович также являлся составителем издания 1998 г., продолжившего данную популярную серию (Dragavtsev, Fadeeva, 1998). В. И. Буренин состоял членом двух секций РАСХН по селекции и генетике овощных культур и сахарной свеклы и членом комитета Европейской кооперативной программы по роду *Beta* L., награжден орденом «Знак Почета», юбилейной медалью «За доблестный труд» и Серебряной медалью ВДНХ СССР.

Будучи заведующим отделом генетических ресурсов овощных и бахчевых культур ВИР, Валентин Иванович всегда уделял особое внимание проблемам сотрудников, старался помочь и объединить коллектив (рис. 2–6).



Рис. 2. В. И. Буренин с аспирантами А. А. Ивановым и Д. В. Соколовой на территории Пушкинских лабораторий ВИР (2007 г.)

Fig. 2. V. I. Burenin with his postgraduate students A. A. Ivanov and D. V. Sokolova in the fields of Pushkin Laboratories of VIR (2007)



Рис. 3. Обход полей в Пушкинских лабораториях ВИР (2008 г.)
Fig. 3. Touring the fields at Pushkin Laboratories of VIR (2008)



Рис. 4. В. И. Буренин (в центре) с коллегами в Пушкинских лабораториях ВИР (2012 г.)
Fig. 4. V. I. Burenin (in the center) with his colleagues at Pushkin Laboratories of VIR (2012)



Рис. 5. В. И. Буренин с коллегами из Отдела генетических ресурсов овощных и бахчевых культур (2014 г.)
Fig 5. V. I. Burenin and his colleagues from the Department of Vegetable and Cucurbit Crop Genetic Resources (2014)



Рис. 6. В. И. Буренин с сотрудниками Отдела генетических ресурсов овощных и бахчевых культур (Пушкинские лаборатории ВИР, декабрь 2014 г.)
Fig. 6. V. I. Burenin with the staff members of the Department of Vegetable and Cucurbit Crop Genetic Resources (Pushkin Laboratories of VIR; December, 2014)

Безусловно, ключевое значение имеет созданная им научная школа. Под руководством Валентина Ивановича 15 ученых защитили кандидатские диссертации. Аспиранты, подготовленные профессором, стали высококлассными, успешными профессионалами, многие из них и сейчас работают как в отделе генетических ресурсов овощных и бахчевых культур, так и на опытных станциях ВИР. Все ученики с теплотой отзываются о нем как о прекрасном грамотном руководителе, умевшем найти подход и заинтересовать исследовательской работой каждого.

Валентин Иванович Буренин внес весомый вклад в дело развития идей Н. И. Вавилова по мобилизации и использованию растительных ресурсов. Ученики и коллеги всегда будут помнить его доброту, энергичность, оптимизм, поддержку и неоценимую помощь в научных исследованиях.

References / Литература

- Boos G.V., Badina G.V., Burenin V.I. Heterosis of vegetable crops (Geterozis ovoshchnykh kultur). Leningrad: Agropromizdat; 1990. [in Russian] (Боос Г.В., Бадина Г. В., Буренин В.И. Гетерозис овощных культур. Ленинград: Агропромиздат; 1990).
- Burenin V.I. A topcross-based method for assessing general combining ability (Sposob otsenki obshchey kombinatsionnoy sposobnosti na osnove topkrossa). *Byulleten Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rasteniyevodstva im. N.I. Vavilova = Bulletin of the N.I. Vavilov All-Russian Research Institute of Plant Industry*. 1971;(19):32-37. [in Russian] (Буренин В.И. Способ оценки общей комбинационной способности на основе топкросса. *Бюллетень Всесоюзного научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова*. 1971;(19):32-37).
- Burenin V.I. Beet – *Beta L.*: (systematics, genetics, source material, and breeding methods) (Svekla – *Beta L.*: (sistematika, genetika, iskhodny material i metody selektsii) [dissertation]. Leningrad: VIR; 1983a. [in Russian] (Буренин В.И. Свекла – *Beta L.*: (систематика, генетика, исходный материал и методы селекции): дис. ... докт. с.-х. наук. Ленинград: ВИР; 1983a).
- Burenin V.I. Beet breeding and seed production in the German Democratic Republic (Selektsiya i semenovodstvo svekly v GDR). Moscow: VNIITEISKH; 1975. [in Russian] (Буренин В.И. Селекция и семеноводство свеклы в ГДР. Москва: ВНИИТЭИСХ; 1975).
- Burenin V.I. Distant hybridization of the species in the genus *Beta L.* *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1983b;81:12-17. [in Russian] (Буренин В.И. Отдаленная гибридизация внутри рода *Beta L.* *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1983b;81:12-17).
- Burenin V.I. Genetic resources of the *Beta L.* genus (Geneticheskiye resursy roda *Beta L.* Санкт-Петербург; 2007. [in Russian] (Буренин В.И. Генетические ресурсы рода *Beta L.* Санкт-Петербург; 2007).
- Burenin V.I. Heterosis in the F_1 hybrid beet plants. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1970;43(2):221-249. [in Russian] (Буренин В.И. Проявление гетерозиса у гибридов первого поколения свеклы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1970;43(2):221-249).
- Burenin V.I. On the origin of sugar beet. *Sugar Beet*. 2018;(1):2-4. [in Russian] (Буренин В.И. О происхождении сахарной свеклы. *Сахарная свекла*. 2018;(1):2-4).
- Burenin V.I. Study and use of heterosis in first-generation hybrids of fodder sugar beet (Izucheniye i ispolzovaniye geterozisa u gibridov pervogo pokoleniya sakharno-kormovoy svekly) [dissertation]. Leningrad: VIR; 1967. [in Russian] (Буренин В.И. Изучение и использование гетерозиса у гибридов первого поколения сахарно-кормовой свеклы: дис. ... канд. биол. наук. Ленинград: ВИР; 1967).
- Burenin V.I. The use of inbreeding in beet. *Sugar Beet*. 2015;(1):11-14. [in Russian] (Буренин В.И. Использование инбридинга у свеклы. *Сахарная свекла*. 2015;(1):11-14).
- Burenin V.I., Gavriilyuk I.P. Taxonomy, phylogeny and provenance of the representatives of the genus *Beta L.* *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1982;72(3):3-12. [in Russian] (Буренин В.И., Гаврилюк И.П. Систематика и филогения рода *Beta L.* *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1982;72(3):3-12).
- Burenin V.I., Khmelinskaya T.V., Piskunova T.M. Early ripening and productivity of table beet accessions (Skorospelost i produktivnost obraztsov stolovoy svekly). *Nauchno-tekhnicheskii byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rasteniyevodstva im. N.I. Vavilova = Scientific and Technical Bulletin of the N.I. Vavilov All-Russian Research Institute of Plant Industry*. 1989;(192):10-13. [in Russian] (Буренин В.И., Хмелинская Т.В., Пискунова Т.М. Скороспелость и продуктивность образцов столовой свеклы. *Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова*. 1989;(192):10-13).
- Burenin V.I., Kochneva V.N., Shchegoleva M.I. On the problem of beet bolting. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1979;65(1):19-26. [in Russian] (Буренин В.И., Кочнева В.Н., Щеголева М.И. О цветущности свеклы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1979;65(1):19-26).
- Burenin V.I., Krasochkin V.T. Genetic aspects in beet studies. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1971;44(1):189-215. [in Russian] (Буренин В.И., Красочкин В.Т. Генетические аспекты изучения свеклы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1971;44(1):189-215).
- Burenin V.I., Kuzmina O.A. Comparative studies of the garden beet and mangel collections at the Maikop Experiment Station the VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1980;66(2):91-98. [in Russian] (Буренин В.И., Кузьмина О.А. Сравнительное изучение коллекции столовых и кормовых корнеплодов на Майкопской станции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1980;66(2):91-98).
- Burenin V.I., Ludilov V.A., Sokolova D.V. Integrated research of red beet gene pool. *Potato and Vegetables*. 2016;(2):39-40. [in Russian] (Буренин В.И., Лудилов В.А., Соколова Д.В. Комплексное исследование генофонда столовой свеклы. *Картофель и овощи*. 2016;(2):39-40).
- Burenin V.I., Piskunova T.M. Quality of table beet root crops depending on growing conditions. *Agrarian Russia*. 2019;(3):26-30. [in Russian] (Буренин В.И., Пискунова Т.М. Качество корнеплодов столовой свеклы в зависимости от условий выращивания. *Аграрная Россия*. 2019;(3):26-30). DOI: 10.30906/1999-5636-2019-3-26-30
- Burenin V.I., Piskunova T.M. Table beet (*Beta vulgaris L. ssp. vulgaris var. conditiva Alef.*). Cv. Valenta (Svekla stolovaya [*Beta vulgaris L. ssp. vulgaris var. conditiva Alef.*]). Sort Valenta. Russian Federation; breeding achievement patent number: RU 1422; 1999. [in Russian] (Буренин В.И., Пискунова Т.М. Свекла столовая (*Beta vulgaris L. ssp. vulgaris*

- var. *conditiva* Alef.). Сорт Валента. Российская Федерация; патент на селекционное достижение № RU 14224; 1999).
- Burenin V.I., Piskunova T.M., Sokolova D.V. Gene pool for breeding monogerm table beet. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2016;177(4):45-56. [in Russian] (Буренин В.И., Пискунова Т.М., Соколова Д.В. Генофонд для селекции раздельноплодной столовой свеклы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2016;177(4):45-56). DOI: 10.30901/2227-8834-2016-4-45-56
- Burenin V.I., Pivovarov V.F. Beet (Svekla). St. Petersburg: VIR; 1998. [in Russian] (Буренин В.И., Пивоваров В.Ф. Свекла. Санкт-Петербург: ВИР; 1998).
- Burenin V.I., Shevtsov I.A. Beet genetics (Genetika svekly). In: T.S. Fadeeva, V.I. Burenin, V.I. Krivchenko (eds). *Genetics of Cultivated Plants: Legumes, Vegetables, Cucurbits (Genetika kulturnykh rasteniy: zernobobovye, ovoshchnye, bakhchevye)*. Leningrad: Agropromizdat; 1990. p.135-163. [in Russian] (Буренин В.И., Шевцов И.А. Генетика свеклы. В кн.: *Генетика культурных растений: зернобобовые, овощные, бахчевые* / под ред. Т.С. Фадеевой, В.И. Буренина, В.И. Кривченко. Ленинград: Агропромиздат; 1990. С.135-163).
- Burenin V.I., Sokolova D.V. Catalogue of the VIR global collection. Issue 838. *Brassica napus* L. subsp. *rapifera* Metzg. St. Petersburg: VIR; 2017. [in Russian] (Буренин В.И., Соколова Д.В. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 838. Брюква. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).
- Burenin V.I., Sokolova D.V. The adaptive potential of gene resources of fodder beet. *Sugar Beet*. 2016;(3):8-12. [in Russian] (Буренин В.И., Соколова Д.В. Адаптивный потенциал генресурсов кормовой свеклы. *Сахарная свекла*. 2016;(3):8-12).
- Burenin V.I., Sokolova D.V., Emelyanov A.V. Variability of quantitative traits of red beet varieties by ecologo-geographical study. *Sugar Beet*. 2013;(8):16-19. [in Russian] (Буренин В.И., Соколова Д.В., Емельянов А.В. Изменчивость количественных признаков сортообразцов столовой свеклы при эколого-географическом изучении. *Сахарная свекла*. 2013;(8):16-19).
- Burenin V.I., Sokolova D.V., Shumilina V.V. Germplasm collection of rutabaga: study and prospect for use. *Vegetable Crops of Russia*. 2017;1(34):17-21. [in Russian] (Буренин В.И., Соколова Д.В., Шумилина В.В. Генофонд для селекции брюквы: изучение и перспективы использования. *Овощи России*. 2017;1(34):17-21).
- Burenin V.I., Yudaeva V.E. Evaluation of table beet collection accessions in Moscow Province (Otsenka kollektsionnykh obraztsov stolovoy svekly v usloviyakh Moskovskoy oblasti). *Nauchno-tekhnicheskii byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rastenyevodstva im. N.I. Vavilova = Scientific and Technical Bulletin of the N.I. Vavilov All-Russian Research Institute of Plant Industry*. 1989;(192):25-29. [in Russian] (Буренин В.И., Юдаева В.Е. Оценка коллекционных образцов столовой свеклы в условиях Московской области. *Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова*. (1989);192:25-29).
- Burenin V.I., Yudaeva V.E. On the problem of breeding monogerm table beet cultivars (K probleme selektsii odnosemyannykh sortov stolovoy svekly). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1981;(1):19-21. [in Russian] (Буренин В.И., Юдаева В.Е. К проблеме селекции односемянных сортов столовой свеклы. *Селекция и семеноводство*. 1981;(1):19-21).
- Chesnokov Yu.V., Burenin V.I., Ivanov A.A. RAPD analysis of collection accessions of the genus *Beta* L. species. *Agricultural Biology*. 2013;48(3):28-36. [in Russian] (Чесноков Ю.В., Буренин В.И., Иванов А.А. RAPD-анализ коллекционных образцов дикой и культурной свеклы (*Beta* L.). *Сельскохозяйственная биология*. 2013;48(3):28-36). DOI: 10.15389/agrobiology.2013.3.28rus
- Dragavtsev V.A., Fadeeva T.S. (eds). Genetics of cultivated plants (flax, potato, carrot, potherbs, gladioli, apple tree, and alfalfa) (Genetika kulturnykh rasteniy [len, kartofel, morkov, zelenye kultury, gladiolus, yablonya, lyutserna]). Burenin V.I. (comp.). St. Petersburg: VIR; 1998. [in Russian] (Генетика культурных растений (лен, картофель, морковь, зеленые культуры, гладиолус, яблоня, люцерна) / под ред. В.А. Драгавцева, Т.С. Фадеевой; сост. В.И. Буренин. Санкт-Петербург: ВИР; 1998).
- Fadeeva T.S., Burenin V.I., V.I. Krivchenko (eds). *Genetics of cultivated plants: legumes, vegetables, cucurbits (Genetika kulturnykh rasteniy: zernobobovye, ovoshchnye, bakhchevye)*. Leningrad: Agropromizdat; 1990. [in Russian] (Генетика культурных растений: зернобобовые, овощные, бахчевые / под ред. Т.С. Фадеевой, В.И. Буренина, В.И. Кривченко. Ленинград: Агропромиздат; 1990).
- Krasochkin V.T., Sechkarev B.I., Sazonova L.V., Levandovskaya L.I. Flora of cultivated plants. Vol. 19. Root crops (Fam. Chenopodiaceae – beet, Fam. Umbelliferae – carrot, parsley, celery and parsnip) (Kulturnaya flora SSSR. T. 19. Korneplozdnye rasteniya [semeystvo Marevykh – svekla, semeystvo Zontichnykh – morkov, petrushka, selderey, pasternak]). V.T. Krasochkin, P.M. Zhukovsky (eds). Leningrad: Kolos; 1971. [in Russian] (Красочкин В.Т., Сечкарев Б.И., Сазонова Л.В., Левандовская Л.И. Культурная флора СССР. Т. 19. Корнеплодные растения (семейство Маревых – свекла, семейство Зонтичных – морковь, петрушка, сельдерей, пастернак) / под ред. В.Т. Красочкина, П.М. Жуковского. Ленинград: Колос; 1971).
- Shebalina M.A., Sazonova L.V. Flora of cultivated plants. Vol. 18. Root crops (Fam. Brassicaceae – food turnip, forage turnip, swede, radish, and small radish) (Kulturnaya flora SSSR. T. 18. Korneplozdnye rasteniya [semeystvo Kapustnye – repa, turneps, bryukva, redka, redis]). V.T. Krasochkin, V.I. Burenin, V.F. Dorofeev (eds). Leningrad: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Шебалина М.А., Сазонова Л.В. Культурная флора СССР. Т. 18. Корнеплодные растения (семейство Капустные – репа, турнепс, брюква, редька, редис) / под ред. В.Т. Красочкина, В.И. Буренина, В.Ф. Дорофеева. Ленинград: Агропромиздат; 1985).
- Yesyunina A.I., Lukovnikova G.A., Burenin V.I. The biochemical characteristics of the collection samples of the beet. *Proceedings on Applied botany, Genetics and Breeding*. 1979;65(1):34-43. [in Russian] (Есюнина А.И., Луковникова Г.А., Буренин В.И. Биохимическая характеристика коллекционных образцов свеклы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1979;65(1):34-43).

Информация об авторах

Диана Викторовна Соколова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, dianasokol@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9967-7454>

Татьяна Миновна Пискунова, кандидат 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, t.piskunova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9267-6619>

Information about the authors

Diana V. Sokolova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, dianasokol@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9967-7454>

Tatiana M. Piskunova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, t.piskunova@vir.nw.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9267-6619>

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 12.02.2024; одобрена после рецензирования 04.03.2024; принята к публикации 04.03.2024.
The article was submitted on 12.02.2024; approved after reviewing on 04.03.2024; accepted for publication on 04.03.2024.

УДК 631.52:635.21:633.49

Выборочный список «Каталогов мировой коллекции ВИР» по картофелю за 1963–2018 гг. Selective list of the Catalogues of the VIR Global Collection on potato published in 1963–2018

Издательская деятельность Федерального исследовательского центра Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова, на базе которого в 2022 году образован Национальный центр генетических ресурсов растений, началась в 1908 году и продолжается по сей день.

Начиная с 1961 года прошлого века ВИР издает серию «Каталог мировой коллекции ВИР», имевшую первоначальное название «Каталог-справочник мировой коллекции ВИР». Название серии на английском языке – *Catalogue of the VIR Global Collection*; с 2018 года выходные данные каждого выпуска и аннотация представлены параллельно на русском и английском языках.

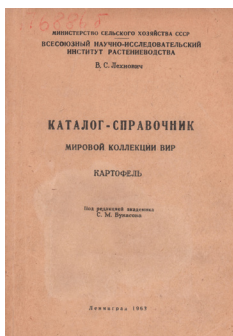
Данная серия в течение более 60 лет имеет свою специализированную аудиторию, все выпуски представляют единый систематизированный и документированный массив информации по изучению, сохранению и пополнению уникальной коллекции мировых генетических ресурсов ВИР. Выпуски данной серии по отдельным культурам нашли широкое применение в работе с генетическими ресурсами растений в области семеноводства и селекции, физиологии, биохимии, генетики, защиты растений, молекулярной биологии, биотехнологии.

В большинстве случаев авторами (составителями) выпусков являются кураторы таксономических и тематических коллекций ВИР, ответственные за формирование, учет, документирование, содержание, сохранение и популяризацию коллекций генетических ресурсов растений.

Каждый отдельный выпуск данной серии подлежит обязательному рецензированию. Научную экспертизу авторских материалов с целью определения возможности их публикации обеспечивают ведущие ученые и специалисты, имеющие близкую к теме научную специализацию. С 2022 года для издания каталога обязательным требованием является наличие не менее двух авторитетных рецензентов. Сведения о рецензентах указываются в выходных данных издания.

Серия «Каталог мировой коллекции ВИР» / *Catalogue of the VIR Global Collection* предназначена для селекционеров, специалистов-растениеводов для решения практических задач в селекции и семеноводстве, научных работников, осуществляющих фундаментальные и прикладные научные исследования, а также для учебных целей. Издания серии способствуют раскрытию потенциала мировой коллекции генетических ресурсов растений ВИР, гербарной коллекции ВИР (VIR) как важной части российских биоресурсных коллекций (БРК).

Редакция журнала «Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции» с целью отражения многолетней издательской деятельности ВИР, привлечения дополнительного внимания к серии «Каталог мировой коллекции ВИР» / *Catalogue of the VIR Global Collection* и уточнения для авторов научных статей номеров и названий выпусков серии приняла решение опубликовать «Выборочный список «Каталогов мировой коллекции ВИР» по картофелю за 1963–2018 гг.». Для удобства пользования материал расположен в хронологическом порядке, по номерам выпусков. Мы надеемся, что список окажется полезным нашим читателям и авторам научных статей.



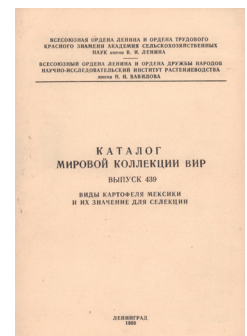
Выпуск 11



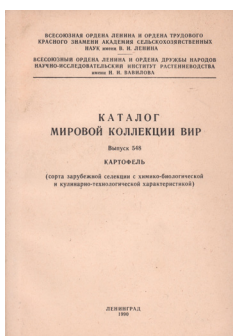
Выпуск 311



Выпуск 400



Выпуск 439



Выпуск 548



Выпуск 809



Выпуск 816



Выпуск 852

1. Каталог - справочник мировой коллекции ВИР. Вып. 11. Картофель / В.С. Лехнович ; под редакцией С.М. Букасова ; Министерство сельского хозяйства СССР, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1963. 203, [1] с. : табл.
2. Каталог – справочник [мировой коллекции ВИР]. О новых образцах коллекции ВИР / редакторы: З.Д. Артюгина, Р.Х. Макашева, М.М. Якубцинер ; ответственный за выпуск З.Д. Артюгина ; под редакцией Д.Д. Брежнева ; [составители: по ягодным культурам: А.В. Мосолова, В.А. Чикова ; по декоративным культурам: Т.Г. Тамберг] ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства. Ленинград : ВИР, 1966. 122 с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР ; вып. 1). Из содерж.: (Картофель. С. 74-85).
3. Каталог [мировой коллекции ВИР]. Вып. 45. Гербарий Всесоюзного научно-исследовательского института им. Н.И. Вавилова / составители: В.А. Борковская, С.С. Восканьян ; под редакцией В.В. Никитина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1969. 91, [1] с. : фот. Из содерж.: (Клубнеплоды. Картофель. С. 61).
4. [Каталог мировой коллекции ВИР]. Вып. 66. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, собранных зарубежными экспедициями ВИР в 1968-1969 гг. / составители: С.Н. Бахарева, Ф.В. Гуревич, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, Е.А. Толмачева, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1970. 172, [1] с.
5. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 91. Картофель / подготовили: Л.И. Костина, З.П. Жолудева ; под редакцией С.М. Букасова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1972. 82, [1] с. : табл.
6. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1970 году. Вып. 110 / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1973. 243, [1] с. : табл.
7. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1971 г. Вып. 126 / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1974. 245, [1] с. : табл. Из содерж.: (Картофель. С. 153-164).
8. Каталог образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1972 г. Вып. 136 / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1974. 307, [1] с. : табл. Из содерж.: (Картофель. С. 219-232).
9. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 141. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1973 году / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, А.Ф. Коломицина, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1975. 214, [1] с. : табл. Из содерж.: (Картофель. С. 129-137).
10. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 155. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1974 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич ; под редакцией К.З. Будина ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1975. 219, [1] с. : табл. Из содерж.: (Картофель. С. 165-173).
11. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 165. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1975 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ф.В. Гуревич ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1976. 156 с. : табл. Из содерж.: (Картофель. С. 127-142).
12. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 189. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1976 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.К. Петрова, Ф.В. Гуревич ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 203, [1] с. : табл. Из содерж.: (Картофель. С. 158-170).
13. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 194. Картофель / составители: Л.И. Костина, З.П. Жолудева ; под редакцией С.М. Букасова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 109, [1] с.
14. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 208. Химико-биологические и столово-технологические свойства сортов картофеля / составители: В.И. Комаров, З.П. Жолудева, В.И. Шинкарев ; ответственный редактор В.И. Комаров ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1977. 22, [2] с. : табл.
15. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 226. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1977 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.К. Петрова, Ф.В. Гуревич ; под редакцией Э.Т. Мещерова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград : ВИР, 1978. 133, [1] с. : табл. Из содерж.: (Картофель. С. 120-124).
16. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 230. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, Ю.Н. Щербаков, В.А. Чикова, Н.К. Петрова, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, Г.Н. Павлов, В.С. Ефимова, Н.А. Кирьян, О.З. Сытник,

Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас); под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1978. 95, [1] с. Из содерж.: (Картофель. С. 74-76).

17. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 252. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1978 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1979. 245, [3] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 222-223).

18. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 266. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас); под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1979. 109, [3] с. Из содерж.: (Картофель. С. 85-89).

19. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 274. Перечень таксонов, поступивших в Гербарий ВИР из-за рубежа с 1968 по 1977 г. / составитель Н.И. Белозор; под редакцией О.Н. Коровиной; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1980. 59, [1] с.

20. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 277. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1979 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1980. 197, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 122-126).

21. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 284. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, Ф.В. Гуревич, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас); под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1980. 126 с. Из содерж.: (Картофель. С. 119-124).

22. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 305. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1980 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1981. 110, [2] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 76-80).

23. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 308. Сорты сельскохозяйственных культур для возделывания в аграрной зоне БАМ на севере Амурской области / составители: Э.Н. Ломакин, О.А. Евдокимова, В.А. Мищенко, Н.Г. Пантелеева, Л.А. Слободчикова, В.Е. Фомина, А.Н. Свистунов; под редакцией Д.Д. Брежнева; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1981. 59, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 28-32).

24. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 311. Картофель (*Solanum andigenum* Juz. et Buk.) / составители: Е.В. Морозова; под редакцией: С.М. Букасова, К.З. Будина; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1981. 80, [2] с.

25. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 321. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, Ф.В. Гуревич, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас); под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1981. 108 с. Из содерж.: (Картофель. С. 95-97).

26. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 322. Растительные ресурсы Советского Союза (экспедиции ВИР в 1971–1980 годах) / составители: Э.Т. Мещеров, К.А. Кобылянская; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1981. 125, [3] с.: табл.

27. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 327, ч. 2. Каталог типов таксонов растений, хранящихся в гербарии ВИР / составители: О.Н. Коровина, Н.И. Белозор, Н.М. Черноморская; под редакцией О.Н. Коровиной; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1985. 21, [1] с.

28. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 342. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1981 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1982. 97, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 53-59).

29. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 355. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, заведующие интродукционно-карантинными питомниками института: (Е.П. Гогун, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Н.А. Кирьян, Г.Н. Павлов, О.З. Сытник, Л.Г. Тарасовская, Ф.Т. Цангас); под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1982. 104 с. Из содерж.: (Картофель. С. 90-93).

30. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 356. Информация о зарубежных экспедициях и командировках ВИР в 1971–1980 гг. / составители: Э.Т. Мещеров, К.А. Кобылянская; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1982. 39, [1] с.: табл.

31. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 379. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1982 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1983. 83, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 45-48)

32. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 382. Картофель / составители: В.И. Комаров, З.П. Жолудева, Л.И. Костина, В.И. Шинкарев; под редакцией К.З. Будина; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1983. 131, [1] с.

33. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 389. Доноры и источники важнейших хозяйственно-ценных признаков культурных растений для решения актуальных проблем селекции / составители: В.Ф. Дорофеев, В.А. Вершинина, К.С. Горская [и др.]; составители: картофель: К.З. Будин, Н.А. Житлова; под редакцией: В.Ф. Дорофеева, В.Д. Кобылянского; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1984. 267, [1] с. Из содерж.: (Картофель. С. 217-222).

34. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 394. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1983 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1984. 100 с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 46-53).

35. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 395. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, Е.П. Гогун, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксюзян, Л.П. Тарасовская, Ф.Т. Цангас, О.З. Сытник; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1983. 122, [2] с. Из содерж.: (Картофель. С. 106-109).

36. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 400. Картофель: (Чилийские сорта-аборигены) / составители: Л.И. Костина, Л.М. Турулева; под редакцией С.М. Букасова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1984. 45, [1] с.

37. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 418. Экспресс-информация о новых образцах / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Н.С. Несмеянова, С.Г. Иванова, В.А. Полякова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксюзян, Л.П. Тарасовская, Ф.Т. Цангас, Е.И. Федоренко; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1984. 133, [3] с. Из содерж.: (Картофель. С. 116-119).

38. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 423. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1984 г. / составители: С.Н. Бахарева, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, Ф.В. Гуревич, Н.С. Несмеянова; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1984. 131, [5] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 98-107).

39. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 439. Виды картофеля Мексики и их значение для селекции / составители: К.З. Будин, Л.Е. Горбатенко, Л.М. Турулева; под редакцией К.З. Будина; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1989. 88 с.: табл., ил.

40. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 441. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в коллекцию ВИР в 1984 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксюзян, Ф.Т. Цангас, Н.С. Несмеянова, В.А. Полякова, Л.Г. Тарасовская, Е.И. Федоренко; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1986. 145, [1] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 119-122).

41. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 444. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1985 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, Ю.Н. Щербаков; под редакцией Э.Т. Мещерова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1985. 66, [2] с. Из содерж.: (Картофель. С. 48-49).

42. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 448. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1986 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, К.А. Кобылянская, В.А. Чикова, И.Г. Шмараев, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксюзян, Ф.Т. Цангас, Е.И. Казакова, Т.А. Комарова, В.А. Полякова; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1988. 141, [3] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 118-121).

43. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 473. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1987 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.А. Кирьян, Р.А. Оксюзян, Ф.Т. Цангас, Е.И. Казакова, И.Г. Шмараев, М.Х. Галаев, Т.Н. Кожанова, В.А. Полякова; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1988. 135, [3] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 95-103).

44. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 476. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1987 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, К.А. Кобылянская, М.Х. Галаев, Т.А. Комарова, Л.А. Бавтунова; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1988. 31, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 22-25).

45. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 477. Межвидовые гибриды картофеля – генетические источники и доноры устойчивости к патогенам / составители: К.З. Будина, Н.А. Житлова, Т.И. Соболева; под редакцией К.З. Будина; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1989. 17, [2] с.

46. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 487. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1988 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, И.Г. Шмараев, Т.Н. Кожанова, М.Х. Галаев; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1989. 36, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 25-27).

47. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 497. Сорты сельскохозяйственных культур селекции Дальневосточной опытной станции / составители: А.Н. Тимофеев, В.П. Царенко, А.К. Новоселов, В.Т. Богинич, Н.М. Бочкарникова, Р.И. Живчикова, П.П. Булах, Л.П. Толкачева, Л.А. Новоселова, О.Т. Слободчикова, А.Ш. Сабитов; под редакцией В.П. Царенко; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 71, [1] с.: ил. Из содерж.: Сорты, находящиеся в государственном сортоиспытании: (Картофель. С. 37).

48. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 501. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1988 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.А. Бурмистров, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Р.А. Оксужан, Ф.Т. Цангас, Е.И. Казакова, И.Г. Шмараев, М.Х.-М. Галаев, Т.Н. Кожанова, В.А. Полякова, Н.А. Ткаченко, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова, Н.Д. Василенко, А.Э. Ниязов, М.А. Гриценко; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1989. 159, [1] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 108-126).

49. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 519. Сельскохозяйственные растения и их сородичи Северной Америки / составитель Ю.Н. Щербаков; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 333, [3] с.: ил., [1] л. карт. Из содерж.: (Картофель. С. 9-12).

50. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 523. Примитивные культурные виды картофеля Южной Америки / составители: Н.Ф. Бавыко; под редакцией К.З. Будина; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1989. 172, [2] с.

51. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 533. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1989 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, Т.Н. Кожанова, И.Г. Шмараев, М.Х. Галаев; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 44, [2] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 31-37).

52. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 540. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1989 г. / Л.А. Бурмистров, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, Т.Н. Кожанова, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Р.А. Оксужан, Ф.Т. Цангас, И.Г. Шмараев, М.Х.-М. Галаев, В.А. Полякова, Н.А. Ткаченко, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова, Н.Д. Василенко, А.Э. Ниязов, М.А. Гриценко; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 102, [2] с. (Экспресс-информация / ВАСХНИЛ, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 72-78).

53. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 548. Картофель: (сорты зарубежной селекции с химико-биологической и кулинарно-технологической характеристикой) / составители: В.И. Шинкарев, Л.И. Костина, В.Е. Фомина; под редакцией: К.З. Будина, В.И. Комарова; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 177, [1] с.: табл.

54. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 562. Информация о внутрисоюзных и зарубежных экспедициях ВИР в 1981–1985 г. / составитель К.А. Кобылянская; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 67, [1] с.: табл.

55. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 563. Селекционные сорта картофеля / составители: Л.И. Костина, В.Е. Фомина; под редакцией К.З. Будина; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 73, [2] с.

56. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 569. Южноамериканские виды картофеля (секция *Petota Dumort.* рода *Solanum L.*) / составитель Л.Е. Горбатенко; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1990. 398, [2] с.

57. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 586. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1990 г. / составители: С.Н. Бахарева, Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеева, Т.Н. Кожанова, И.Н. Делюкина, М.А. Гриценко; под редакцией С.Н. Бахаревой; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Ленинград: ВИР, 1991. 63, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 36-55).

58. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 655. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 1989 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.А. Бурмистров, Н.М. Зотеева, С.Г. Иванова, С.В. Кузнецов, А.И. Танцюра, Ф.Т. Цангас, Н.А. Шестакова, Г.Т. Мезенцева, Т.А. Комарова, Н.Г. Галкина, В.Н. Омельченко, Н.Д. Василенко, В.А. Полякова, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова, Н.В. Черкасова; под редакцией: Л.Е. Горбатенко, Н.М. Зотеевой; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 1994. 92, [2] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 58-63).

59. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 681. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1992–1994 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, А.Н. Афонин, И.О. Никифорова, Л.В. Ковалева, Е.А. Колюшева, Г.Т. Мезенцева; под редакцией Л.Е. Горбатенко; РАСХН, Всероссийский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 1996. 61, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 58-60).

60. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 682. Информация об экспедициях ВИР, проведенных на территории России, стран Ближнего и Дальнего зарубежья в 1986–1994 г. / составители: Н.М. Зотеева, Т.А. Комарова; под редакцией Л.Е. Горбатенко; РАСХН, Всероссийский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 1995 [1996]. 65, [3] с.: табл.

61. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 695. Сорта картофеля, устойчивые к картофельной нематоде *Globodera rostochiensis* Woll. и *Globodera pallida* Woll. / составители: Л.И. Костина, В.Е. Фомина; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 1999. 84, [2] с.

62. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 702. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1997 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, В.Г. Фунтова; под редакцией Л.Е. Горбатенко; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 1999. 51, [1] с.: табл. Из содерж.: (Картофель. С. 47-50).

63. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 705. Образцы картофеля *in vitro* / составители: Э.В. Трускинов, Д.В. Фролова; под редакцией Л.И. Костиной; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2000. 21, [1] с.: табл.

64. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 707. Картофель. Культурный вид *Solanum andigenum* Juz. et Buk. Образцы с ценными селекционными признаками / составители: С.Д. Киру, В.П. Сдвижкова; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 1999. 22, [2] с.

65. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 710. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1998 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, В.Г. Фунтова; под редакцией Л.Е. Горбатенко; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2000. 39, [1] с. Из содерж.: (Картофель. С. 37-38).

66. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 716. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 1999 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, В.Г. Фунтова; под редакцией Л.Е. Горбатенко; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2000. 54, [2] с. Из содерж.: (Картофель. С. 49-50).

67. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 719. Картофель: (Сорта с высоким содержанием крахмала) / составители: Л. И. Костина, В. Е. Фомина, Д. А. Бычков, Т. В. Кирпичева; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2002. 22, [2] с.

68. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 721. Сорта картофеля России и стран СНГ / составители: Л.И. Костина, В.Е. Фомина; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2000. 26, [4] с.

69. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 732. Краткая характеристика новых забытых образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 2000 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, Л.В. Багмет, В.Г. Фунтова, С.Г. Иванова, А.И. Танцюра, Н.Н. Петровская, Н.Д. Василенко, Т.Ф. Савченко, Е.В. Малиновская, Н.Д. Дульнева, И.И. Конюхова; под редакцией Л.Е. Горбатенко; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2000. 46, [2] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 43-45).

70. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 738. Культурные виды картофеля: Образцы с ценными селекционными признаками / составители: С.Д. Киру, Н.Ф. Бавыко, С.В. Палева, Л.П. Евстратова; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2002. 72, [2] с.

71. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 753. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 2001 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, В.Г. Фунтова, Л.В. Багмет, А.И. Танцюра, Н.Н. Петровская, Н.Д. Василенко, Н.Д. Дульнева, Т.И. Вальяникова, И.И. Конюхова; под редакцией Л.Е. Горбатенко; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2004. 29, [3] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 29).

72. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 754. Образцы сельскохозяйственных культур, поступившие в 2001 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, В.Г. Фунтова, Т.М. Озерская; под редакцией: Л.Е. Горбатенко, Т.Н. Смекаловой; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург: ВИР, 2004. 26, [2] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 22-24).

73. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 758. Краткая характеристика новых зарубежных образцов сельскохозяйственных культур, поступивших в 2002 г. / составители: Л.Е. Горбатенко, В.Г. Фунтова, Т.М. Озерская,

А.И. Танцюра, Н.Н. Петровская, Н.Д. Василенко, Н.Д. Дульнева, Т.И. Вальяникова, И.И. Конюхова ; под редакцией Л.Е. Горбатенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2004. 37, [3] с. (Экспресс-информация / РАСХН, ВИР). Из содерж.: (Картофель. С. 37).

74. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 761. Устойчивость образцов диких видов картофеля к болезням и вредителям / составители: Н.М. Зотева, М. Хжановска, Л.П. Евстратова, С.Р. Фасулати, Т.М. Юсупов ; под редакцией: Л.И. Костиной, Е.Е. Радченко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2004. 87, [1] с. : табл.

75. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 766. Дикие родичи культурных растений России / составители: Т.Н. Смекалова, И.Г. Чухина ; под редакцией Н.И. Дзюбенко ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2005. 53, [1] с. : табл.

76. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 770. Картофель : Нематодоустойчивые сорта / составители: Л.И. Костина, В.Е. Фомина, О.С. Косарева ; под редакцией С.Д. Киру ; РАСХН, Государственный научный центр Российской Федерации Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2005. 66, [2] с.

77. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 800. Информация об экспедициях, проведенных в 1991–2009 г. / составители: Т.М. Озерская, О.А. Лисовская ; под редакцией Н.И. Дзюбенко ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 49, [1] с. : табл.

78. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 804. Картофель : Селекционные сорта картофеля : (исходный материал, выделенный на основе новой технологии) / составители: Л.И. Костина, В.Е. Фомина, Л. В. Королева, Д.А. Бычков, О.С. Косарева ; под редакцией С.Д. Киру ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2010. 53, [1] с.

79. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 809. Картофель : Генетическая коллекция / Л.И. Костина, Л.В. Королева ; под редакцией С.Д. Киру ; РАСХН, Всероссийский научно-исследовательский институт растениеводства им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2012. 42, [1] с. : табл.

80. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 816. Клоновая коллекция диких видов картофеля / [составители: Е.В. Рогозина, Э.Е. Хавкин, М.А. Кузнецова, Т.А. Гавриленко, Н.А. Чалая, М.П. Бекетова, Е.А. Соколова, О.А. Антонова, О.А. Фадинова, М.С. Хлопук ; под редакцией Е.Е. Радченко ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2015. 44, [2] с. : табл.

81. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 829. Картофель : Селекционные сорта России и стран СНГ / составители: Л.И. Костина, Л.В. Королева, О.С. Косарева, В.Е. Фомина ; под редакцией С.Д. Киру ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2016. 43, [1] с. : табл.

82. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 833. Номенклатурные типы, хранящиеся в Гербарии ВИР: *Solanum* L. (семейство Solanaceae Juss.) / И.Г. Чухина, Т.А. Гавриленко, Т.Н. Смекалова ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2016. 28, [1] с.

83. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 852. Раннеспелые сорта картофеля, пригодные для возделывания в Мурманской области / Т.Э. Жигadlo, С.Н. Травина ; под редакцией С.Д. Киру ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова ; Филиал Полярная опытная станция ВИР. Санкт-Петербург : ВИР, 2017. 27, [1] с. : ил.

84. Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 866. Картофель : Межвидовые гибриды картофеля устойчивые к возбудителям болезней = Potato. Interspecific potato hybrids resistant to disease causative agents / Е.В. Рогозина, Н.А. Чалая, М.П. Бекетова, В.А. Бирюкова, Т.В. Кирпичева, М.А. Кузнецова, В.В. Мананков, О.А. Фадинова, М.С. Хлопук, Э.Е. Хавкин ; под редакцией Е.В. Рогозиной ; Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2018. 35 с., [1] : табл.

**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 20.03.2024. Формат 70×100¹/₈.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 31. Тираж 100 экз. Заказ № 382/1.

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

000 «Р-КОПИ»
190000, Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д. 6, литер Б

