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

ТРУДЫ ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ, ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ, том 184

выпуск 4

(основаны Р. Э. Регелем в 1908 г.)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023

PROCEEDINGS ON APPLIED BOTANY, GENETICS AND BREEDING, vol. 184

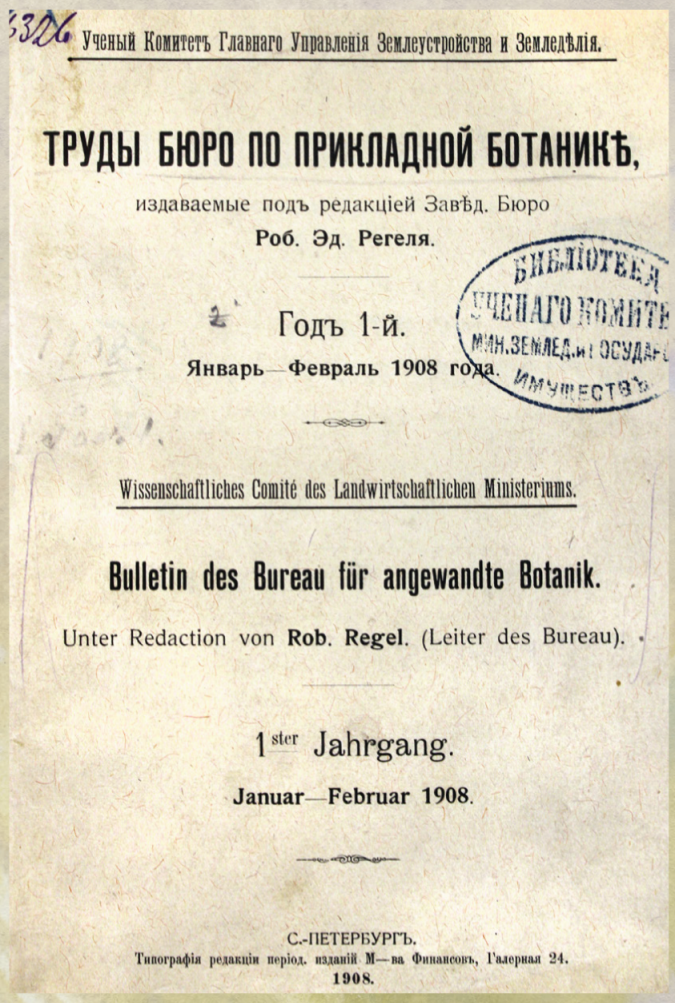
issue 4

(founded by Robert Regel in 1908)

ST. PETERSBURG
2023

ТРУДЫ
ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКЕ, ГЕНЕТИКЕ И СЕЛЕКЦИИ

115 лет
со дня основания журнала



Ученый Комитетъ Главнаго Управленія Землеустройства и Земледѣлія.

ТРУДЫ БЮРО ПО ПРИКЛАДНОЙ БОТАНИКѢ,

издаваемые подъ редакціей Завѣд. Бюро
Роб. Эд. Регеля.

Библіотека Ученаго Комитета Мин. Земледѣлія и Государственныхъ Имуществъ

Годъ 1-й.
Январь—Февраль 1908 года.

Wissenschaftliches Comité des Landwirtschaftlichen Ministeriums.

Bulletin des Bureau für angewandte Botanik.

Unter Redaction von Rob. Regel. (Leiter des Bureau).

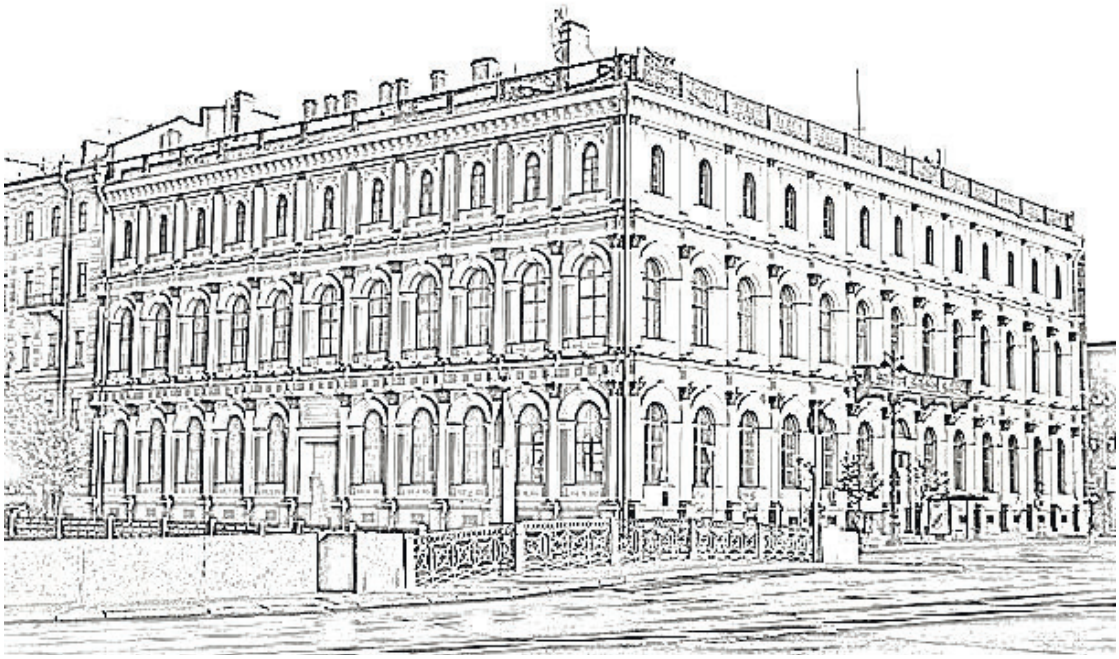
1ster Jahrgang.
Januar—Februar 1908.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Типографія редакціи період. изданій М—ва Финансовъ, Галерная 24.
1908.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · 2023

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

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



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

Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции

2023 Том 184 выпуск 4

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4
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)
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)
Туруспеков Ерлан Кенесбекович, канд. биол. наук, профессор (Казахстан)
Ухатова Юлия Васильевна, канд. биол. наук (Россия)
Филипенко Галина Ивановна, канд. с.-х. наук (Россия)
Хатефов Эдуард Балилович, д-р биол. наук (Россия)
Чухина Ирена Георгиевна, канд. биол. наук (Россия)

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

© Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 2023

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

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding

2023 Volume 184 issue 4

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4
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. Silantyeva, Dr. Sci. (Biology), Russia
Diana V. Sokolova, Cand. Sci. (Biology), Russia
Ol'ga V. Soloduhina, Dr. Sci. (Biology), Russia
Nadezhda G. Tikhonova, Cand. Sci. (Biology), Russia
Erlan K. Turuspekov, Cand. Sci. (Biology), Professor, Kazakhstan
Yulia V. Ukhatova, Cand. Sci. (Biology), Russia
Nadezhda M. Zoteeva, Cand. Sci. (Biology), Russia

Editorial council
Olga S. Afanasenko, Dr. Sci. (Biology), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
Galina A. Batalova, Dr. Sci. (Agriculture), Full Member (Academician) of the RAS, Russia
Andre Jean Berville, Dr., France
Lyudmila A. 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

© Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 2023

УДК 58:575:631.522/.524:633/635:632(066)

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

Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции / Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова. Санкт-Петербург : ВИР, 2023. Т. 184, вып. 4. 262 с.

Вступительное слово главного редактора посвящено 115-летию журнала. Исследованы: выполненность, всхожесть и жизнеспособность плодов и семян редких растений Якутии; анатомия, уровень плоидности и компонентный состав эфирного масла *Hyssopus officinalis* 'Никитский Белый' *in vitro* и *ex situ*. Рассмотрена динамика изменчивости хозяйственных признаков проса сорта 'Горлинка' в климатических условиях южной части Восточно-Европейской равнины. Рекомендован весовой метод определения растворимых β-глюканов в зерне ячменя. Обсуждается влияние частоты полива на рост и урожайность *Taraxacum kok-saghyz* Rodin. Дана оценка признаковой коллекция крупноплодного подсолнечника ВИР для селекции. Проведено ранжирование генотипов яровой мягкой пшеницы по дате колошения и продолжительности вегетации в разных эколого-географических условиях. Изучена самоплодность новых сортов черной смородины коллекции ВИР в условиях Северо-Запада России. Проведен сравнительный анализ стародавних сортов пшеницы – источников высокого качества и питательных свойств зерна. Определено наследование ювенильной устойчивости коллекционных образцов ячменя из Эфиопии к мучнистой росе. Изучено аллельное разнообразие SSR-локуса VVIB23, сцепленного с полом цветка, в генотипах дикорастущего винограда Краснодарского края. Исследована встречаемость локуса устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7* у образцов диких видов яблони (*Malus* Mill.). Охарактеризованы новые сорта овощной вигны (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) селекции ВИР. Проанализированы показатели качества и фракционный состав зерна сортов озимой ржи по крупности в условиях Нижнего Поволжья. Дана типификация внутривидовых таксонов *Solanum andigenum* Juz. et Buk. Разработаны номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. Приведены данные о разнообразии дагестанской популяции возбудителя желтой ржавчины пшеницы по вирулентности. Выделены образцы стародавней озимой мягкой пшеницы, устойчивые к желтой пятнистости. Изучено разнообразие образцов ячменя из азиатской части Российской Федерации по устойчивости к обыкновенной злаковой тле. Рекомендована среда для микроклонального размножения элитных технических сортов винограда (*Vitis vinifera* L.). Рассмотрен вопрос получения удвоенных гаплоидов столовой свеклы *Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef. Обсуждены генетические основы компактных форм у бахчевых культур. Опубликован список приложений к журналу «Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции».

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

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

© Федеральный исследовательский центр Всероссийский
институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 2023

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

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding / N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. St. Petersburg : VIR, 2023. Vol. 184, iss. 4. 262 p.

The introductory article by the Editor-in-chief is dedicated to the 115th anniversary of the journal. Plants rare for Yakutia have been studied to assess their fruit and seed plumpness, germination, and viability. Anatomy, ploidy level, and essential oil composition of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' have been analyzed *in vitro* and *ex situ*. Dynamics of variability in agronomic characters is shown for millet 'Gorlinka' under the climate conditions of the southern part of the East European Plain. A weight method is recommended for determination of soluble *β*-glucans in barley grain. The effects of irrigation frequency on growth and yields of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin are discussed. The trait-specific collection of large-seeded sunflower at VIR is evaluated in the context of its value for breeding. Spring bread wheat genotypes have been ranked according to their heading dates and growing season duration in various ecogeographic environments. New black currant cultivars from the VIR collection have been studied for their self-fertility in Northwestern Russia. Wheat landraces are compared as sources of high grain quality and nutritional properties. Inheritance of juvenile resistance to powdery mildew has been analyzed in barley accessions from Ethiopia. Allelic diversity of the SSR locus VVIB23 linked to the flower sex is described in wild-growing grapevine genotypes of Krasnodar Territory. The *FBF7* fire blight resistance locus has been examined for its occurrence in apple wild species (*Malus* Mill.) accessions. New cultivars of vegetable cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) developed at VIR are characterized. Grain quality indicators and size-dependent fractional composition have been analyzed in winter rye cultivars under the conditions of the Lower Volga region. Typification of intraspecific taxa in *Solanum andigenum* Juz. et Buk. is reported. Nomenclature standards and genetic certificates have been developed for apple-tree cultivars bred at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making. Virulence diversity data are presented for the wheat yellow rust pathogen population in Dagestan. Accessions of old winter bread wheat landraces have been selected for their resistance to tan spot. The diversity of barley accessions from the Asian part of Russia is described in the context of greenbug resistance. A microclonal propagation medium is recommended for elite industrial grape (*Vitis vinifera* L.) cultivars. The issue of producing doubled haploids of table beet (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef.) is reviewed. Genetic bases of compact forms among cucurbit crops are discussed. The list of supplements to the journal *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding* is published.

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

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

© Federal Research Center
the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ОТ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Хлесткина Е.К.
Вступительное слово главного редактора, посвященное 115-летию журнала «*Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*» 11

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Андросова Д.Н., Данилова Н.С., Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю.
Выполненность, всхожесть и жизнеспособность плодов и семян редких растений Якутии. 12

Булавин И.В., Иванова Н.Н., Мирошниченко Н.Н., Саплев Н.М., Феськов С.А.
Анатомия, уровень плоидности и компонентный состав эфирного масла *Hyssopus officinalis* ‘Никитский Белый’ *in vitro* и *ex situ* 21

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Кулемина Т.В.
Динамика изменчивости хозяйственных признаков проса сорта ‘Горлинка’ в климатических условиях южной части Восточно-Европейской равнины. 31

Попов В.С., Конарев А.В., Ковалева О.Н., Конькова Н.Г., Хорева В.И.
Весовой метод определения растворимых β-глюканов в зерне ячменя 45

Шень Г., Чжэн Ф., Чжоу Л., Цзэн С., Конькова Н.Г.
Влияние частоты полива на рост и урожайность *Taraxacum kok-saghyz* Rodin 53

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Ступникова Т.Г., Алпатьева Н.В., Кузнецова Е.Б., Анисимова И.Н.
Признаковая коллекция крупноплодного подсолнечника ВИР для селекции сортов и гибридов 64

Новикова Л.Ю., Зуев Е.В., Брыкова А.Н.
Ранжирование генотипов яровой мягкой пшеницы по дате колошения и продолжительности вегетации в разных эколого-географических условиях 79

Тихонова О.А.
Изучение самоплодности новых сортов черной смородины коллекции ВИР в условиях Северо-Запада России 90

Шаманин В.П., Потоцкая И.В., Ессе С.А., Гладких М.С., Шепелев С.С., Зуев Е.В., Виниченко Н.А., Коксель Х., Моргунов А.И.
Стародавние сорта пшеницы – источники высокого качества и питательных свойств зерна 103

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Абдуллаев Р.А., Яковлева О.В., Лебедева Т.В.
Наследование ювенильной устойчивости коллекционных образцов ячменя из Эфиопии к мучнистой росе 116

Ильницкая Е.Т., Макаркина М.В., Кожевников Е.А., Горбунов И.В.
Аллельное разнообразие SSR-локуса VVIB23, сцепленного с полом цветка, в генотипах дикорастущего винограда Краснодарского края 124

Лыжин А.С., Савельева Н.Н.
Встречаемость локуса устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7* у образцов диких видов яблони (*Malus* Mill.) 133

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Гуркина М.В., Бурляева М.О.
Новые сорта овощной вигны (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) селекции ВИР 143

Нуждина Н.Н., Жиганов Д.А., Ермолаева Т.Я., Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н., Андреева Л.В., Куликова В.А.,Салманова Н.А., Нечаев В.Н.
Показатели качества и фракционный состав зерна сортов озимой ржи по крупности в условиях Нижнего Поволжья 153

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Оськина Н.А., Гавриленко Т.А., Чухина И.Г.
Типификация внутривидовых таксонов *Solanum andigenum* Juz. et Buk 163

Ульяновская Е.В., Супрун И.И., Богданович Т.В., Чернуцкая Е А., Токмаков С.В., Таловина Г.В.
Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия 174

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Смирнова Р.Е., Абдуллаев К.М., Куркиев К.У.
Разнообразие дагестанской популяции возбудителя желтой ржавчины пшеницы по вирулентности 190

Мироненко Н.В., Коваленко Н.М., Баранова О.А., Митрофанова О.П.
Устойчивость стародавней озимой мягкой пшеницы к желтой пятнистости 205

Радченко Е.Е., Абдуллаев Р.А., Дятлова К.Д., Акимова Д.Е., Звейнек И.А.
Разнообразие образцов ячменя из азиатской части Российской Федерации по устойчивости к обыкновенной злаковой тле 215

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Физикова А.Ю.
Микроклональное размножение элитных технических сортов винограда (*Vitis vinifera* L.) 222

ОБЗОРЫ

Зарецкий А.М., Курина А.Б., Соколова Д.В.
К вопросу о получении удвоенных гаплоидов столовой свеклы *Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef. (обзор) 232

Иноземцева А.В., Елацкова А.Г., Хлесткина Е.К., Швачко Н.А.
Генетические основы компактных форм у бахчевых культур (обзор) 241

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

Приложения к «*Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции*»: к 115-летию со дня основания журнала 251

CONTENTS

FROM THE EDITOR-IN-CHIEF

Khlestkina E.K.
Introductory article by the Editor-in-chief, dedicated to the 115thanniversary of the journal 11

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

Androsova D.N., Danilova N.S., Tkachenko K.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu.
Fruit and seed plumpness, germination and viability of rare plants in Yakutia 12

Bulavin I.V., Ivanova N.N., Miroshnichenko N.N., Saplev N.M., Feskov S.A.
Anatomy, ploidy level, and essential oil composition of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' *in vitro* and *ex situ* 21

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Kulemina T.V.
Dynamics of variability in agronomic characters of millet cv. 'Gorlinka'
under the climate conditions of the southern part of the East European Plain 31

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 45

Shen G., Zheng F., Zhou L., Zeng X., Konkova N.G.
Effects of irrigation frequency on growth and yields of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin 53

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

Gavrilova V.A., Makarova L.G., Stupnikova T.G., Alpatieva N.V., Kuznetsova E.B., Anisimova I.N.
The trait-specific collection of large-seeded sunflower at VIR: a source for breeding cultivars and hybrids 64

Novikova L.Yu., Zuev E.V., Brykova A.N.
Ranking of spring bread wheat genotypes according to the heading date
and growing season duration in different ecogeographic environments 79

Tikhonova O.A.
Studying self-fertility in new black currant cultivars from the VIR collection in Northwestern Russia 90

Shamanin V.P., Pototskaya I.V., Esse S.A., Gladkih M.S., Shepelev S.S., Zuev E.V., Vinichenko N.A., Koksel H., Morgounov A.I.
Wheat landraces as sources of high grain quality and nutritional properties 103

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Abdullaev R.A., Yakovleva O.V., Lebedeva T.V.
Inheritance of juvenile resistance to powdery mildew in barley accessions from Ethiopia 116

Ilnitskaya E.T., Makarkina M.V., Kozhevnikov E.A., Gorbunov I.V.
Allelic diversity of the SSR locus VVIB23 linked to the flower sex
in wild-growing grapevine genotypes of Krasnodar Territory 124

Lyzhin A.S., Saveleva N.N.
Occurrence of the *FBF7* fire blight resistance locus in accessions of apple wild species (*Malus* Mill.) 133

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Gurkina M.V., Burlyaeva M.O.
New cultivars of vegetable cowpea (V*igna unguiculata* (L.) Walp.) developed at VIR 143

Nuzhdina N.N., Zhiganov D.A., Ermolaeva T.Y. Kulevatova T.B., Zlobina L.N., Andreeva L.V., Kulikova V.A., Salmanova N.A., Nechaev V.N.
Grain quality indicators and size-dependent fractional composition
in winter rye cultivars under the conditions of the Lower Volga region 153

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

Oskina N.A., Gavrilenko T.A., Chukhina I.G.
Typification of intraspecific taxa in *Solanum andigenum* Juz. et Buk. 163

Ulyanovskaya E.V., Suprun I.I., Bogdanovich T.V., Chernutskaya E.A., Tokmakov S.V., Talovina G.V.
Nomenclatural standards and genetic certificates for apple-tree cultivars
developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making 174

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Gultyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Smirnova R.E., Abdullaev K.M., Kurkiev K.U.
Virulence diversity of the yellow rust pathogen population in Dagestan 190

Mironenko N.V., Kovalenko N.M., Baranova O.A., Mitrofanova O.P.
Resistance of old winter bread wheat landraces to tan spot 205

Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Dyatlova K.D., Akimova D.E., Zveinek I.A.
Diversity of barley accessions from the Asian part of Russia in greenbug resistance 215

BRIEF REPORTS

Fizikova A.Yu.
Microclonal propagation of elite industrial grape cultivars (*Vitis vinifera* L.) 222

SURVEYS

Zaretsky A.M., Kurina A.B., Sokolova D.V.
On the issue of producing doubled haploids of table beet (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef.) (a review) 232

Inozemtseva A.V., Elatskova A.G., Khlestkina E.K., Shvachko N.A.
Genetic bases of compact forms among cucurbit crops (a review) 241

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

Supplements to the *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*:
dedicated to the 115th anniversary of the journal 251

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-11-11

CC BY

Вступительное слово главного редактора, посвященное 115-летию журнала *«Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции»*

Е. К. Хлесткина



ДОРОГИЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журналу «*Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*» в 2023 году исполнилось 115 лет со дня основания. Оглядываясь назад, можно сказать, что наш журнал, прошедший столь длительный для научного периодического издания путь, на каждом этапе развивался и продолжает развиваться в ногу со своим учредителем – ВИР[1]. Журнал, как и его учредитель, ставит сегодня перед собой важнейшие задачи по усилению интеграции фундаментальной науки и прикладных исследований в области ботаники, генетики и селекции; по освещению результатов междисциплинарных исследований в сфере биологических и сельскохозяйственных наук.

Изначально названный своим основателем, заведующим Бюро по прикладной ботанике Робертом Эдуардовичем Регелем «*Труды Бюро по прикладной ботанике*», журнал с 1927 года стал носить название, идентичное сегодняшнему, – «*Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*». Так журнал стал одним из первых в нашей стране периодическим изданием, опубликовавшим работы по генетике.

В состав редакционного комитета (затем – редакционной коллегии) в разные годы входили ученые с мировым именем (К. А. Фляксбергер, А. И. Мальцев, В. В. Пашкевич, Г. А. Левитский, Н. А. Максимов, П. М. Жуковский, В. В. Таланов, В. Е. Писарев, Н. Н. Иванов, Г. Д. Карпеченко, С. М. Букасов и другие), главными редакторами были – Р. Э. Регель, Н. И. Вавилов и каждый последующий руководитель ВИР.

Издание всегда включало в себя не только оригинальный научный, но и уникальный иллюстративный материал: карты, чертежи, таблицы, рисунки, выполненные профессиональными художниками и учеными специалистами. И сегодня, следуя этим традициям, над изданием журнала трудится профессиональная команда научных редакторов, переводчиков и дизайнеров.

Мы заботимся о том, чтобы полнотекстовые версии статей были доступны широкому кругу специалистов – последние пять лет работа журнала ведется на платформе электронной редакции, издание стало индексироваться в ключевых базах данных научных журналов. Журнал представлен в формате Open Access. Возросла его популярность среди авторов и читателей, существенно выросла и цитируемость публикуемых в нем статей (так, в 2022 году число цитирований статей предыдущих двух лет, в сравнении с аналогичным показателем по версии РИНЦ в 2017 году, выросло в 16 раз).

В минувшем году на базе ВИР создан первый в стране Национальный биоресурсный центр (https://doi.org/10.30901/2227-8834-2022-1-9-30), и у журнала появилась новая задача – укрепление бренда ВИР как Национального центра генетических ресурсов растений через актуальные публикации авторов, через скорейшее повышение позиции в журнальных рейтингах.

Поздравляем вас, дорогие наши авторы и читатели, с юбилеем журнала, все вместе приглашаем новых авторов и читателей присоединиться к нашей команде единомышленников и с нетерпением ждем сообщений о новых результатах ваших исследований!

Главный редактор, профессор РАН,
доктор биологических наук Е. К. Хлесткина

[1] Приложение доступно в онлайн версии статьи: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-4-1-11 / Supplementary materials are available in the online version of the paper: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2023-4-1-11

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 631.53.001:502.752:581.9(571.56)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-12-20

CC BY

Выполненность, всхожесть и жизнеспособность плодов и семян редких растений Якутии

Д. Н. Андросова[1], Н. С. Данилова[1], К. Г. Ткаченко[2], Н. Е. Староверов[3], А. Ю. Грязнов[3]

[1] Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Институт биологических проблем криолитозоны, Якутск, Россия

[2] Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

[3] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дария Николаевна Андросова, darija_androsova@mail.ru

Актуальность. В связи с возрастающим антропогенным воздействием на природу остро стоит проблема сохранения и возобновления редких и исчезающих растений в природных ценозах. Оценка качества, выявление выполненных и полноценных семян, определение их жизнеспособности – путь к разработке технологий воспроизводства и возможности репатриации этих видов в места их естественного произрастания. Изучение и мобилизация видов природной флоры в ботанических садах позволяет сохранять биоресурсы полезных видов и рекомендовать их для выращивания в городском озеленении.
Материалы и методы. Оценку качества семян проводили с учетом классических методик. Рентгенографический анализ был использован для оценки выполненности и наличия скрытых дефектов семян редких видов флоры Якутии – *Adonis sibirica* Patrin, *Phlojodicarpus sibiricus* (Steph. ex Spreng.) Koso-Pol., *Iris laevigata* Fisch. et C.A. Mey., *Iris sanguinea* Donn, *Paeonia anomala* L. Рентгеноскопический анализ плодов и семян проводили согласно разработанным методам применения микрофокусной рентгенографии для семян и плодов.
Результаты. Показано, что плоды и семена изученных редких видов в условиях Якутии формируются полнозерными (выполненными), но ввиду наличия у них морфофизиологического типа покоя они могут прорастать только после холодной или многоэтапной стратификации.
Заключение. Оценка качества и жизнеспособности плодов и семян редких и исчезающих видов флоры Якутии позволит разработать технологии повышения их всхожести и восстановления природных популяций этих видов.

Ключевые слова: всхожесть, стратификация, *Adonis sibirica*, *Phlojodicarpus sibiricus*, *Iris laevigata*, *Iris sanguinea, Paeonia anomala*

Благодарности: работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки России по проектам «Растительный покров криолитозоны таежной Якутии: биоразнообразие, средообразующие функции, охрана и рациональное использование» (FWRS-2021-0023; АААА-А21-121012190038-0) и «Коллекции живых растений Ботанического института им. В.Л. Комарова (история, современное состояние, перспективы использования)» (АААА-А18-118032890141-4). Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Андросова Д.Н., Данилова Н.С., Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю. Выполненность, всхожесть и жизнеспособность плодов и семян редких растений Якутии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):12-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-12-20

© Андросова Д.Н., Данилова Н.С., Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., 2023

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-12-20

Fruit and seed plumpness, germination and viability of rare plants in Yakutia

Darija N. Androsova[1], Nadezhda S. Danilova[1], Kirill G. Tkachenko[2], Nikolay E. Staroverov[3], Artem Yu. Gryaznov[3]

[1] Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Yakutsk, Russia,

[2] Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

[3] St. Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: Darija N. Androsova, darija_androsova@mail.ru

Background. With the increasing anthropogenic impact on nature, conservation and renewal of rare and endangered plants in natural cenoses is an urgent problem. Quality assessment, identification of full-fledged plump seeds, and determination of their viability is the way to develop reproduction technologies and provide a possibility of repatriating these species to their natural habitats. Collecting and studying natural flora species in botanical gardens helps to save biological resources of useful species and recommend them for urban landscaping.
Materials and methods. X-ray techniques were used to analyze seed quality and viability of rare species in the flora of Yakutia: *Adonis sibirica* Patrin, *Phlojodicarpus sibiricus* (Steph. ex Spreng.) Koso-Pol., *Iris laevigata* Fisch. et C.A. Mey., *Iris sanguinea* Donn, and *Paeonia anomala* L. Methods developed for the application of microfocus radiography to fruits and seeds were used in the X-ray analysis.
Results. Seed quality was assessed according to guidelines. It was shown that fruits and seeds of the studied species developed under the conditions of Yakutia were full-fledged (plump), but due to the presence of a morphophysiological type of dormancy in them, they could germinate only after a cold or multistage stratification.
Conclusion. Assessment of reproductive diaspore quality and viability in rare and endangered plant species of Yakutia will make it possible to develop technologies for increasing their seed germination rates and restoring the natural populations of these species.

Keywords: germination, stratification, *Adonis sibirica*, *Phlojodicarpus sibiricus*, *Iris laevigata*, *Iris sanguinea, Paeonia anomala*

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of the state task assigned by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the Projects "Vegetation cover in the cryolithozone of taiga in Yakutia: biodiversity, environmental functions, protection, and sustainable utilization" (FWRS-2021-0023; AAAA-A21-121012190038-0) and "Collections of live plants at the Komarov Botanical Institute (history, modern status, and utilization prospects)" (AAAA-A18-118032890141-4).
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Androsova D.N., Danilova N.S., Tkachenko K.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu. Fruit and seed plumpness, germination and viability of rare plants in Yakutia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):12-20. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-12-20

Введение

В сохранение биоразнообразия растительного мира, одним из направлений которого является изучение воспроизводства редких видов, вносят весомый вклад ботанические сады с их коллекциями живых растений и семенными фондами (O'Donnell, Sharrock, 2017; Viktorov et al, 2018; Tkachenko, 2019). Репродуктивные диаспóры (плоды и семена – мерикарпии, зерновки, эремы, костянки, семянки, крылатки, орешки и др., которые далее по тексту условно называем семенами) многих редких видов растений имеют низкую всхожесть, часто находятся в органическом глубоком морфофизиологическом покое. Семена некоторых видов имеют недоразвитый зародыш, бывают невыполненные (пустые или щуплые). Это может быть обусловлено отсутствием специфических опылителей во время цветения или погодными условиями года. Оценка выполненности репродуктивных диаспор актуальна для определения их жизнеспособности. Этот параметр является важным критерием перед закладкой на хранение (краткосрочное и длительное) плодов и семян в генетические банки. Знания об особенностях латентного периода важны для выращивания новых растений в ботанических садах, специализированных питомниках и для проведения работ по репатриации этих видов в места их естественного произрастания (Obrucheva, 1982, 1991). Одним из современных и наиболее перспективных недеструктивных методов оценки степени выполненности, выявления поражения вредителями и отбора из партии плодов и семян лишь выполненных, полноценных, которые можно использовать для посева или закладки на хранение, является микрофокусная рентгенография (Tkachenko et al, 2018).

Цель настоящего исследования – оценка выполненности, всхожести и жизнеспособности плодов и семян редких видов растений флоры Якутии.

Материалы и методы исследования

Изучены качество и жизнеспособность пяти редких видов природной флоры Якутии (*Iris laevigata* Fisch. et C.A. Mey., *Iris sanguinea* Donn, *Phlojodicarpus sibiricus* (Steph. ex Spreng.) Koso-Pol., *Adonis sibirica* Patrin, *Paeonia anomala* L.) в период с 2014 по 2021 г. В указанный период сбор материала осуществляли среди растений, выращиваемых в Ботаническом саду Института биологических проблем криолитозоны СО РАН (ИБПК СО РАН). Первые четыре вида – растения, численность которых сокращается в результате чрезмерного использования хозяйственно полезных видов (категория 2б), последний вид – редкий в Якутии, произрастает на северной границе его естественного распространения, образуя периферические или изолированные популяции (категория 3г) (Danilova, 2017).

Основной особенностью климата Центральной Якутии является его суровость и резкая континентальность, которая проявляется в больших годовых колебаниях температуры и относительно малом количестве выпадающих осадков. Амплитуда температур (разница между абсолютным максимумом и минимумом) достигает 102°С. Всего за год выпадает 192 мм осадков, что немного больше, чем в полупустынной зоне (Gavrilova, 1973). Вегетационный сезон короткий, продолжительность периода вегетации соответствует в среднем 90–98 дням.

Всхожесть семян определяли в лаборатории при комнатной температуре (22–24°С), при естественном освещении, с учетом рекомендаций Б. С. Лихачёва (Khoroshailov, Likhachev, 1975; Likhachev, Zhukova, 1978) и работы М. М. Ишмуратовой и К. Г. Ткаченко (Ishmuratova, Tkachenko, 2009); выполненность – рентгенографическим методом (Gryaznov et al, 2015; Staroverov et al., 2015; Firsov et al., 2016; Tkachenko et al, 2018). Семена после сбора и чистки хранили в бумажных пакетиках в лабораторных условиях. При проращивании и при стратификации семян использовали фильтровальную бумагу, смоченную дистиллированной водой. Опыты проводили в чашках Петри в четырех повторностях по 50–100 штук (в зависимости от размеров семян). Проросшими считали семена, размер корешков которых равен диаметру семени или превышает его. Опыты по стратификации, давшие хорошие результаты, были проверены в четырех повторностях.

Семена исследуемых видов подвергали стратификации – одноэтапной (холод) и двухэтапной (тепло – холод), которую проводили при разных температурных условиях: 0 ÷ +3°С в режиме климатической камеры (16 ч на свету и 8 ч в темноте), 23 ± 1°С в комнатной температуре с различной продолжительностью (от 21 до 90 суток) в восьми вариантах стратификации:

1) от 0 до +3°С в течение 30 суток;

2) от 0 до +3°С в течение 90 суток;

3) I этап – в тепле (+22…+24°С) в течение 21 суток

II этап – при пониженной переменной температуре (от 0 до +3°С) в течение 60 суток;

4) +7°С в течение 14 суток (для *Phlojodicarpus sibiricus*);

5) +8°С в течение 14 суток (для *Iris sanguinea*);

6) +2 ÷ +5°С в течение 30 суток.

Кроме того, в 2015 г. семена подвергали естественной стратификации (под открытым небом):

7) стратификация семян под открытым небом в течение 60 суток (апрель – май; температура апреля – от –18,7 до +5,7°С; мая – от +0,6 до +12,4°С);

8) стратификация семян под открытым небом в течение 90 суток (март – май; температура марта – от –28,9 до +2,1; апреля – от –18,7 до +5,7°С; мая – от +0,6 до +12,4°С).

Рентгенографический анализ репродуктивных диаспор проводили на установке ПРДУ (передвижная рентгеноскопическая диагностическая установка). Режим для исследования образцов: напряжение, подаваемое на трубку – 17 кВ; ток трубки – 70 мкА; экспозиция – 2 секунды (Arkhipov, Potrakhov, 2008; Potrakhov et al, 2012; Staroverov et al., 2015; Firsov et al., 2016; Tkachenko et al., 2018). Анализировали максимально возможное число семян каждого изучаемого вида.

Названия видов приведены в соответствии с «Определителем высших растений Якутии» (Nikolin, 2020).

Результаты исследований

Касатик сглаженный, или *ирис сглаженный* (*Iris laevigata*). Образец пересажен в 1967 г. из окрестностей г. Якутска. В культуре ежегодно цветет и плодоносит. Самосева не образует. Вид в культуре устойчив.

Проращивание семян разного года урожая якутской популяции (без проведения стратификации) показало нулевую и низкую всхожесть (таблица). В то же время рентгенограмма свидетельствует, что почти все семена нормально сформированы и лишь 1,4% оказались невыполненными. Ежегодно (в период наблюдений) выполненность семян в среднем составляет 98,6% (от 97 до 99%). Семена не поражены вредителями (рис. 1).

Таблица. Влияние режимов стратификации на всхожесть семян редких видов растений
Table. The effect of stratification modes on seed germination in rare plant species

Год / Year		Режим стратификации / Stratification mode	День начала прорастания / Day when germination started	Длительность прорастания, дни / Duration of germination, days	Лабораторная всхожесть, % / Laboratory germination rate, %
сбора семян / when the seeds were collected	начала опыта / when the experiment started				
***Iris laevigata* Fisch. et C.A. Mey.**					
2014	2015	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2015	2016	Без стратификации / Without stratification	30–31	21–23	3,0 ± 0,0
2017	2018	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2019	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2018	0 ÷ +3°C, Км (30 сут.)	3	13	95,8 ± 2,5
2018	2019	0 ÷ +3°C, Км (90 сут.)	4	5	95,8 ± 1,3
2018	2019	I – +22 ÷ +24°C (21 сут.) II – 0 ÷ +3°C, Км (60 сут.)	3	6	95,3 ± 0,9
***Iris sanguinea* Donn**					
2014	2015	Без стратификации / Without stratification	56	1	0,25 ± 0,5
2015	2016	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2017	2018	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2019	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2018	0 ÷ +3°C, Км (30 сут.)	11	1	0,25 ± 0,5
2018	2019	0 ÷ +3°C, Км (90 сут.)	9	2	3,0 ± 0,0
2018	2019	I – +22 ÷ +24°C (21 сут.) II – 0 ÷ +3ºC, Км (60 сут.)	0	0	0
2015	2016	+8°C, Х (14 сут)	32–43	86–127	78,0 ± 8,1
***Phlojodicarpus sibiricus* (Steph. ex Spreng.) Koso-Pol.**					
2014	2015	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2018	Без стратификации / Without stratification	23	29	15,0 ± 5,0
2018	2019	Без стратификации / Without stratification	12	7	7,0 ± 1,0
2018	2018	0 ÷ +3°C, Км (30 сут.)	5	25–26	22,8 ± 0,9
2018	2019	0 ÷ +3°C, Км (90 сут.)	4	25–28	36,3 ± 2,5
2018	2019	I – +22 ÷ +24°C (21 сут.) II – 0 ÷ +3°C, Км (60 сут.)	3	9	8,0 ± 0,0
2021	2022	+2 ÷ +5°C, Км (30 сут.)	0–4	11–35	72,3 ± 12,8
2021	2022	+7°C, Х (14 сут.)	4	39-40	73,0 ± 2,6

Таблица. Окончание
Table. The end

Год / Year		Режим стратификации / Stratification mode	День начала прорастания / Day when germination started	Длительность прорастания, дни / Duration of germination, days	Лабораторная всхожесть, % / Laboratory germination rate, %
сбора семян / when the seeds were collected	начала опыта / when the experiment started				
***Adonis sibirica* Patrin**					
2014	2015	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2015	2015	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2017	2018	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2018	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2019	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2018	0 ÷ +3°C, Км (30 сут.)	0	0	0
2018	2019	0 ÷ +3°C, Км (90 сут.)	0	0	0
2018	2019	I – +22 ÷ +24°C (21 сут.) II – 0 ÷ +3°C, Км (60 сут.)	0	0	0
2014	2015	–18,7 ÷ +12,4°C (60 сут.)	-	-	35,0 ± 0,8*
2014	2015	–28,9 ÷ +12,4°C (90 сут.)	-	-	10,0 ± 3,6*
***Paeonia anomala* L.**					
2014	2015	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2015	2016	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2017	2017	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2017	2018	Без стратификации / Without stratification	0	0	0
2018	2018	0 ÷ +3ºC, Км (30 сут.)	0	0	0
2018	2019	0 ÷ +3°C, Км (90 сут.)	0	0	0
2018	2019	I – +22 ÷ +24°C (21 сут) II – 0 ÷ +3°C, Км (60 сут.)	0	0	0
2014	2015	–18,7 ÷ +12,4°C (60 сут.)	–	–	–
2014	2015	–28,9 ÷ +12,4°C (90 сут.)	–	–	67,5 ± 1,7*

Примечание: Км – климатокамера, Х – холодильник; * – грунтовая всхожесть
Note: Км – climate chamber, X – refrigerator; * – soil germination

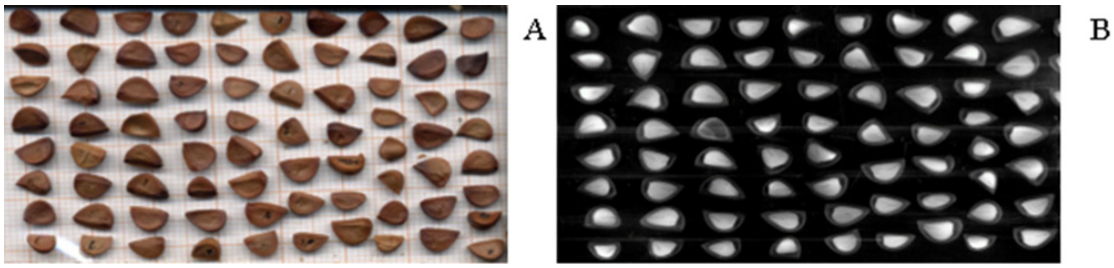


Рис. 1. Семена *Iris laevigata* Fisch. et C.A. Mey.: A – сканированные, B – рентгенограмма
Fig. 1. Seeds of *Iris laevigata* Fisch. et C.A. Mey.: A – scanned seeds, B – X-ray

Для вывода семян из покоя нами были испытаны несколько режимов стратификации (см. таблицу).

Прорастание семян *I. laevigata* (см. таблицу) идет успешно уже при температурах от 0 до +3°C. При переменной температуре (0 ÷ +3°C) семена трогаются в рост на третий день, прорастают за этот период до 95,8 ± 2,5%, процесс продолжается в течение 13 дней. Увеличение длительности холодной стратификации до трех месяцев не оказало положительного эффекта на всхожесть и сроки начала прорастания, но заметно сказалось на продолжительности этого процесса. Так, он сократился с 13 до пяти дней. Подобное действие оказывает двухэтапная стратификация.

Касатик кроваво-красный (*Iris sanguinea*). В культуру привлечен в 1968 г. с прибрежного заливного луга на берегу р. Алдан в 60 км ниже пос. Усть-Мая. Ежегодно цветет и плодоносит. Самосев не отмечен. В культуре устойчив.

Как и у предыдущего вида, свежесобранные семена *I. sanguinea* и семена после хранения не прорастают (см. таблицу). Рентгеноскопический анализ показал их высокую выполненность (от 85 до 98%), число семян с неразвитой структурой колеблется от 2 до 15%. Поражение семян вредителями не отмечено (рис. 2).

В отличие от *I. laevigata*, выход из покоя семян *I. sanguinea* сопряжен с некоторыми трудностями, они прорастают только после воздействия +8°C в течение 14 дней. Семена начинают прорастать мелкими порциями в течение 86–127 дней после 1–1,5 месяцев проращивания (при +22 ÷ +24°C). Лабораторная всхожесть достигает до 78,0 ± 8,1%. Испытание других режимов стратификации оказалось неэффективным в снятии покоя семян (см. таблицу).

Вздутоплодник сибирский (*Phlojodicarpus sibiricus*). Образец пересажен в 1977 г. с каменистого берегового склона на Ленских Столбах. Ежегодно цветет, но плодоносит нерегулярно и слабо. Дает единичные самосевы. В отдельные годы поражается тлей. В культуре устойчив.

При рентгенографии выявлена жизнеспособность 42,3% семян, остальная часть мерикарпиев (57,7%) повреждена вредителями или пустая (рис. 3). В наших опытах лабораторная всхожесть свежесобранных мерикарпиев *P. sibiricus* урожая 2018 г. составила 15,0 ± 5,0%. После хранения в условиях лаборатории всхожесть снижается до 7,0 ± 1,0%, но при этом в 2 раза сокращается период до начала прорастания, то есть семена начинают прорастать быстрее.

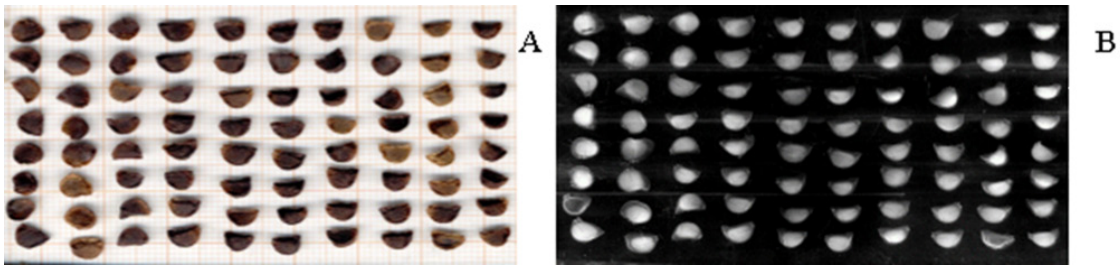


Рис. 2. Семена *Iris sanguinea* Donn: A – сканированные, B – рентгенограмма
Fig. 2. Seeds of *Iris sanguinea* Donn: A – scanned seeds, B – X-ray

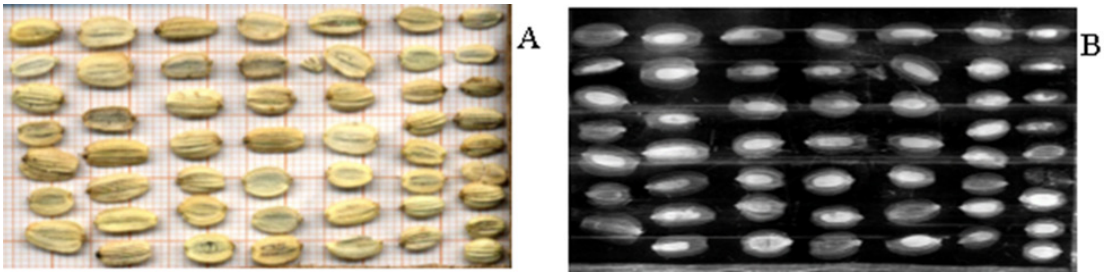


Рис. 3. Мерикарпии *Phlojodicarpus sibiricus* (Steph. ex Spreng.) Koso-Pol.:
A – сканированные семена, B – рентгенограмма
Fig. 3. Seeds of *Phlojodicarpus sibiricus* (Steph. ex Spreng.) Koso-Pol.: A – scanned seeds, B – X-ray

Е. В. Тюрина (Tyurina, 1978) для вывода из покоя семян вздутоплодника рекомендует использовать холодную стратификацию при 0–3°С, которая повышает лабораторную всхожесть семян до 39–42%. Мерикарпии *P. sibiricus* мы подвергали холодной стратификации при разных температурах: от 0 ÷ +3°С до +7°С (см. таблицу). В снятии покоя его семян эффективными оказались температуры +7°С (в течение 14 суток) и +2 ÷ +5°С (в течение 30 суток); лабораторная всхожесть повышается до 72,3 ± 12,8% и 73,0 ± 2,6% соответственно. При этом энергия прорастания семян (на 10-е сутки) после стратификации при +2 ÷ +5°С оказалась выше (55,0 ± 8,4%), чем при температуре +7°С (38,0 ± 1,6%). Стратификация плодов этого вида при более низких температурах (от 0 до +3°С) повысила их лабораторную всхожесть от 7,0 ± 1,0% до 36,3 ± 2,5%. Двухэтапная стратификация (21 сутки – тепло, 60 суток – холод) не дала результата: лабораторная всхожесть семян остается неизменной (см. таблицу).

Горицвет сибирский (*Adonis sibirica*). Интродуцирован в 1970 г. из зарослей кустарников в устье р. Буотама. Ежегодно цветет и плодоносит. Образует обильный самосев. В культуре высокоустойчив.

Свежесобранные семена и после 5–7 месяцев хранения не прорастают, что совпадает с литературными сведениями (Nikolaeva et al., 1985), согласно которым семена характеризуются сочетанием сильного экзогенного и неглубокого эндогенного покоя ($А_2$-Б-$В_1$). Хотя при рентгеноскопическом анализе выявлено, что 79,6% семян выполненные и лишь 20,4% семян оказались с неразвитой внутренней структурой. Повреждений и поражений вредителями не отмечено (рис. 4).

Проращивание семян *A. sibirica* в лабораторных условиях после стратификации при разных режимах не дало результата. Как было отмечено выше, ежегодно в питомнике Ботанического сада отмечается обильное весеннее семенное самовозобновление *A. sibirica*. При естественной (природной) стратификации семена этого вида прорастают, пролежав в почве 2-3 года. Для семян *Adonis sibirica* и *Paeonia anomala* Томской области В. П. Амельченко (Amelchenko, 2010) рекомендует применить более длительную весеннюю стратификацию, то есть промораживать 1,5–2(3) месяца. Был поставлен опыт с естественной стратификацией (под открытым небом) с разной продолжительностью (см. таблицу). Эффективным оказалось выдерживание семян в сыром песке под действием естественного холода в течение 60 дней (апрель – май). Грунтовая всхожесть семян *Adonis sibirica* при таких манипуляциях составила в год посева 35,0 ± 0,8%, при этом значительно сократился период до прорастания – от трех лет до одного года. В последующие годы всходов не отмечено.

Пион уклоняющийся (*Paeonia anomala*). В культуре – с 1966 г., пересажен с опушки смешанного леса в окрестности г. Ленска. Дает устойчивый ежегодный самосев. В культуре высокоустойчив. Ежегодно цветет и плодоносит.

Семена обладают твердой оболочкой. По классификации M. G. Nikolaeva et al. (1985) определен тип покоя пиона как морфофизиологический глубокий эпикотильный (Б-$В^3_3$). Проращивание в лабораторных условиях семян *P. anomala* разного года урожая подтверждают эти данные (см. таблицу). По результатам рентгеноскопического анализа выявлено, что до 99% семян пиона выполнены и не поражены вредителями (рис. 5).

С семенами *Paeonia anomala* был поставлен такой же опыт, как и с *Adonis sibirica*. Семена выдерживали в сыром песке под действием естественного холода в течение 60 и 90 дней (март – май). Эффективной оказалась длительная стратификация в течение 90 дней и с резкими перепадами температур – от –28,9 до +12,4°С. Прорастание семян *Paeonia anomala* началось в год посева и, в отличие от предыдущего вида, длилось в течение трех лет; на третий год грунтовая всхожесть составила 67,5 ± 1,7%.

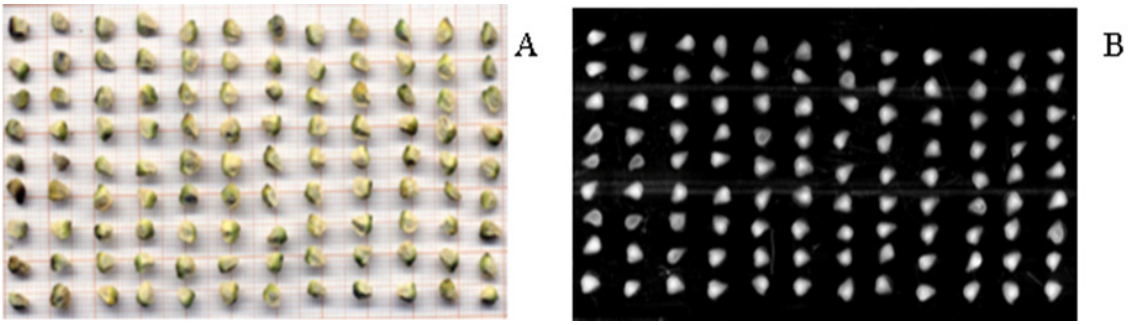


Рис. 4. Семена *Adonis sibirica* Patrin: A – сканированные семена, B – их рентгенограмма

Fig. 4. Seeds of *Adonis sibirica* Patrin: A – scanned seeds, B – X-ray

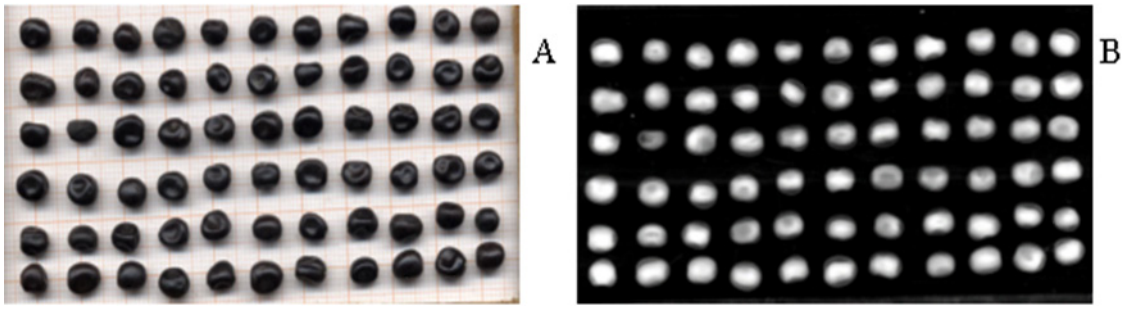


Рис. 5. Семена *Paeonia anomala* L.: A – сканированные, B – рентгенограмма

Fig. 5. Seeds of *Paeonia anomala* L.: A – scanned seeds, B – X-ray

Заключение

Результаты выборочного рентгенографического анализа качества семян показали, что репродуктивные диаспоры изученных пяти редких видов флоры Якутии (*Iris laevigata*, *I. sanguinea*, *Paeonia anomala*, *Adonis sibirica*, *Phlojodicarpus sibiricus*), обладающие разными типами морфофизиологического покоя, формируются вполне развитыми, выполненными на 42–99%, то есть характеризуются средней и высокой жизнеспособностью. Для вывода их из состояния покоя необходимо создание соответствующих условий.

Семена *Iris laevigata* и *Phlojodicarpus sibiricus* реагируют, хотя и в разной степени, на воздействие нескольких режимов стратификации. В отличие от них, семена *Iris sanguinea* выходят из покоя только после выдерживания их в течение двух недель при +8°С. Проращивание семян *Adonis sibirica* и *Paeonia anomala* в лабораторных условиях после стратификации при разных режимах не дало результата; эффективным оказалось выдерживание их семян в сыром песке под открытым небом с апреля по май.

References / Литература

Amelchenko V.P. Rare and endangered plants of Tomsk Province (anatomy, biomorphology, introduction, reintroduction, karyology, and protection). (Redkiye i ischezayushchiye rasteniya Tomskoy oblasti [anatomiya, biomorfologiya, introduktsiya, reintroduktsiya, kariologiya, okhrana]). Tomsk: Tomsk State University; 2010. [in Russian] (Амельченко В.П. Редкие и исчезающие растения Томской области (анатомия, биоморфология, интродукция, реинтродукция, кариология, охрана). Томск: Томский государственный университет; 2010).

Arkhipov M.V., Potrakhov M.N. Microfocus radiography of plants. (Mikrofokusnaya rentgenografiya rasteniy). St. Petersburg: Tekhnolit; 2008. [in Russian] (Архипов М.В., Потрахов М.Н. Микрофокусная рентгенография растений. Санкт-Петербург: Технолит; 2008).

Danilova N.S. (ed.). Red Book of the Republic of Sakha (Yakutia). Vol. 1. Rare and endangered species of plants and mushrooms (Krasnaya kniga Respubliki Sakha (Yakutia). T. 1. Redkiye i nakhodyashchiyesya pod ugrozoy ischeznoveniya vidy rasteniy i gribov). Moscow: Reart; 2017. [in Russian] (Красная книга Республики Саха (Якутия). Т. 1: Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды растений и грибов / под. ред. Н.С. Даниловой. Москва: Реарт; 2017).

Firsov G.A., Volchanskaya A.V., Tkachenko K.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu. *Cydonia oblonga* Mill. (Rosaceae) at the Peter the Great Botanical Garden. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2016;177(4):28-36. [in Russian] (Фирсов Г.А., Волчанская А.В., Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю. Айва обыкновенная (*Cydonia oblonga*, Rosaceae) в Ботаническом саду Петра Великого. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2016;177(4):28-36). DOI: 10.30901/2227-8834-2016-4-28-36

Gavrilova M.K. Climate of Central Yakutia (Klimat Tsentralnoy Yakutii). 2nd ed. Yakutsk: Yakutia Book Publishers; 1973. [in Russian] (Гаврилова М.К. Климат Центральной Якутии. 2-е изд. Якутск: Якутское книжное издательство; 1973).

Gryaznov A.Yu., Staroverov N.E., Zhamova K.K., Kholopova E.D., Tkachenko K.G. Investigation of the quality of reproductive diaspores in species of the genus Apple (*Malus* Mill.) using microfocus radiography. (Issledovaniye kachestva reproduktivnykh diaspor vidov roda Yablonya (*Malus* Mill.) s pomoshchyu mikrofokusnoy rentgenografii). *Proceedings of the Kuban State Agrarian University*. 2015;(55):49-53. [in Russian] (Грязнов А.Ю., Староверов Н.Е., Жамова К.К., Холопова Е.Д., Ткаченко К.Г. Исследование качества репродуктивных диаспор видов рода Яблоня (*Malus* Mill.) с помощью микрофокусной рентгенографии. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2015;(55):49-53).

Ishmuratova M.M., Tkachenko K.G. Seeds of herbaceous plants. Features of the latent period, use in introduction and reproduction *in vitro* (Semena travyanistykh rasteniy. Osobennosti latentnogo perioda, ispolzovaniye v introduktsii i razmnozhenii *in vitro*). Ufa: Gilem; 2009. [in Russian] (Ишмуратова М.М., Ткаченко К.Г. Семена травянистых растений. Особенности латентного периода, использование в интродукции и размножении *in vitro*. Уфа: Гилем; 2009).

Khoroshailov N.G., Likhachev B.S. Guidelines for determination of the growth vigor of cereal crop seeds according to morphophysiological assessment of their seedlings (Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu sily rosta semyan zernovykh kultur morfofiziologicheskoy otsenkoy prorostkov). Leningrad; 1975. [in Russian] (Хорошайлов Н.Г., Лихачёв Б.С. Методические указания по определению силы роста семян зерновых культур морфофизиологической оценкой проростков. Ленинград; 1975).

Likhachev B.S, Zhukova N.V. New method of seed germination (Novy metod prorashchivaniya semyan). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1978;(3):52-54. [in Russian] (Лихачёв Б.С, Жукова Н.В. Новый метод проращивания семян. *Селекция и семеноводство*. 1978;(3):52-54).

Nikolaeva M.G., Lyanguzova I.V., Pozdova L.M. A guide to dormant seeds germination (Spravochnik po prorashchivaniyu pokoyashchikhsya semyan). Leningrad: Nauka; 1985. [in Russian] (Николаева М.Г., Лянгузова И.В., Поздова Л.М. Справочник по проращиванию покоящихся семян. Ленинград: Наука; 1985).

Nikolaeva M.G., Lyanguzova I.V., Pozdova L.M. Seed biology (Biologiya semyan). St. Petersburg: Research Institute of Chemistry, St. Petersburg State University; 1999. [in Russian] (Николаева М.Г., Лянгузова И.В., Поздова Л.М. Биология семян. Санкт-Петербург: НИИ химии Санкт-Петербургского госуниверситета; 1999).

Nikolin E.G. (ed.). Key to higher plants of Yakutia: identification key (Opredelitel vysshikh rasteniy Yakutii: opredelitel). 2nd ed. Moscow: KMK; Novosibirsk: Nauka; 2020. [in Russian] (Определитель высших растений Якутии: определитель / под ред. Е.Г. Николина. 2-е изд. Москва: КМК; Новосибирск: Наука; 2020).

O'Donnell K., Sharrock S. The contribution of botanic gardens to *ex situ* conservation through seed banking. *Plant Diversity*. 2017;39(6):373-378. DOI: 10.1016/j.pld.2017.11.005

Obrucheva N.V. Physiology of the initial seed germination stages in dicotyledonous plants (Fiziologiya nachalnykh etapov prorastaniya semyan dvudolnykh rasteniy) [dissertation]. Moscow: Institute of Plant Physiology, USSR Academy of Sciences; 1991. [in Russian] (Обручева Н.В. Физиология начальных этапов прорастания семян двудольных растений: дис. … докт. биол. наук. Москва: ИФР АН СССР; 1991).

Obrucheva N.V. Seed germination (Prorastaniye semyan). In: *Seed Physiology* (*Fiziologiya semyan*). Moscow: Nauka; 1982. p.223-274. [in Russian] (Обручева Н.В. Прорастание семян. В кн.: *Физиология семян*. Москва: Наука; 1982. С.223-274).

Potrakhov N.N., Trufanov G.E., Vasilyev A.Yu., Anokhin D.Yu., Potrakhov E.N., Akiev R.M., Balitskaya N.V., Boychak D.V., Gryaznov A.Yu. Microfocus radiography (Mikrofokusnaya rentgenografiya). St. Petersburg: ELBI; 2012. [in Russian] (Потрахов Н.Н., Труфанов Г.Е., Васильев А.Ю., Анохин Д.Ю., Потрахов Е.Н., Акиев Р.М., Балицкая Н.В., Бойчак Д.В., Грязнов А.Ю. Микрофокусная рентгенография. Санкт-Петербург: ЭЛБИ; 2012).

Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu., Zhamova K.K., Tkachenko K.G., Firsov G.A. The application of the method of microfocus X-ray for quality control of fruits and seeds reproductive diaspores. *Biotekhnosfera = Biotechnosphere*. 2015;6(42):16-19. [in Russian] (Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Ткаченко К.Г., Фирсов Г.А. Применение метода микрофокусной рентгенографии для контроля качества плодов и семян репродуктивных диаспор. *Биотехносфера*. 2015;6(42):16-19).

Tkachenko K.G. Collections of botanical gardens – a modern practice of conserving and studying the diversity of the plant world. *Hortus Botanicus*. 2019;14:145-155. [in Russian] (Ткаченко К.Г. Коллекции ботанических садов – современная практика сохранения и изучения разнообразия растительного мира. *Hortus Botanicus*. 2019;14:145-155). DOI: 10.15393/j4.art.2019.6385

Tkachenko K.G., Staroverov N.E., Gryaznov A.Yu. X-ray quality control of fruits and seeds. *Hortus Botanicus.* 2018;13:52-66). [in Russian] (Ткаченко К.Г., Староверов Н.Е., Грязнов А.Ю. Рентгенографическое изучение качества плодов и семян. *Hortus Botanicus*. 2018;13:52-66). DOI: 10.15393/j4.art.2018.5022

Tyurina E.V. Introduction of Umbelliferae in Siberia (Introduktsiya zontichnykh v Sibiri). Novosibirsk: Nauka; 1978. [in Russia] (Тюрина Е.В. Интродукция зонтичных в Сибири. Новосибирск: Наука; 1978).

Viktorov V.P., Kuranova N.G., Chernyaeva E.V. Conservation strategy of rare species of plants. *Herald of Tver State University. Series: Chemistry. Series: Biology and Ecology*. 2018;(3):106-129. [in Russian] (Викторов В.П., Куранова Н.Г., Черняева Е.В. Стратегии сохранения редких видов растений. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология*. 2018;(3):106-129). DOI: 10.26456/vtbio9

Информация об авторах

Дария Николаевна Андросова, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Институт биологических проблем криолитозоны – обособленное подразделение ЯНЦ СО РАН, 677980 Россия, Республика Саха, Якутск, пр. Ленина, 41, darija_androsova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1521-0556

Надежда Софроновна Данилова, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Институт биологических проблем криолитозоны – обособленное подразделение ЯНЦ СО РАН, 677980 Россия, Республика Саха, Якутск, пр. Ленина, 41, nad9.5@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6532-7977

Кирилл Гавриилович Ткаченко, доктор биологических наук, старший научный сотрудник, Ботанический институт им. В.Л. Комарова Российской академии наук, 197022 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 2, kigatka@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-6841-6561

Николай Евгеньевич Староверов, кандидат технических наук, ассистент кафедры, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, nik0205st@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4404-5222

Артем Юрьевич Грязнов, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5, ay-gryaznov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2062-2213

Information about the authors

Darija N. Androsova, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, 41 Lenina Ave., Yakutsk, Republic of Sakha 677980, Russia, darija_androsova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-1521-0556

Nadezhda S. Danilova, Dr. Sci. (Biology), Professor, Chief Researcher, Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, 41 Lenina Ave., Yakutsk, Republic of Sakha 677980, Russia, nad9.5@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6532-7977

Kirill G. Tkachenko, Dr. Sci. (Biology), Senior Researcher, Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, 2 Professora Popova Street, St. Petersburg 197022, Russia, kigatka@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0001-6841-6561

Nikolay E. Staroverov, Cand. Sci. (Engineering), Department Assistant, St. Petersburg Electrotechnical University (ETU), 2 Professora Popova Street, St. Petersburg 197376, Russia, nik0205st@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4404-5222

Artem Yu. Gryaznov, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Head of a Department, St. Petersburg Electrotechnical University (ETU), 2 Professora Popova Street, St. Petersburg 197376, Russia, ay-gryaznov@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2062-2213

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 21.11.2022; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 21.11.2022; approved after reviewing on 12.10.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

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

Original article
UDC 633.81:57.085.23:575
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-21-30

CC BY

Anatomy, ploidy level, and essential oil composition of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' *in vitro* and *ex situ*

Iliya V. Bulavin, Natalia N. Ivanova, Natalia N. Miroshnichenko, Nikita M. Saplev, Sergey A. Feskov

Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center of the RAS, Yalta, Russia

Corresponding author: Iliya V. Bulavin, cellbiolnbs@yandex.ru

Background. Clonal micropropagation is a biotechnological method for plant multiplication. The existing data on the structure of organs *in vitro*, genetic stability, and essential oil composition are limited for *Hyssopus officinalis* L., so this study was aimead at investigating these aspects under a short period of *in vitro* culturing.
Materials and methods. Plants of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' cultivated *ex situ*, *in vitro* and *ex vitro* were analyzed. Conventional methods were applied to study plant anatomy, ploidy level, and relative DNA content, as well as to extract and analyze essential oil. Statistical analysis was performed using the Past 4.03 software.
Results. According to the results obtained, with 6-BAP introduced into MS nutrient medium in optimal concentrations (0.3–0.5 mg/L), the general *in vitro* structure of leaf blades in the developed microshoots was similar to those in *ex situ* plants, while the qualitative and quantitative changes observed were induced by the effect of specific culturing conditions and plant rejuvenation. The analysis of the ploidy level and relative DNA content in the nuclei isolated from the leaf tissue cells of the microshoots *ex vitro* after adaptation revealed no changes compared to the *ex situ* leaf parameters. The mass fraction of essential oil and its component composition in the mother plants and *ex vitro* regenerants were similar.
Conclusion. Cultivation of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' microshoots on MS nutrient medium with 6-BAP optimal concentrations promotes morphogenesis without significant deviations in the ploidy level, relative DNA content, essential oil yield, or its component composition. The developed protocol for clonal micropropagation of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' provides clones identical to the *ex situ* plants.

Keywords: clonal micropropagation, adaptation, leaf blade, light microscopy, flow cytometry, chromatography

Acknowledgements: the research was conducted in the framework of State Task No. FNNS-2022-0010 (registration number 122011700347-4) delegated to the Nikita Botanical Gardens – National Research Center of the RAS.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Bulavin I.V., Ivanova N.N., Miroshnichenko N.N., Saplev N.M., Feskov S.A. Anatomy, ploidy level, and essential oil composition of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' *in vitro* and *ex situ*. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):21-30. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-21-30

© Bulavin I.V., Ivanova N.N., Miroshnichenko N.N., Saplev N.M., Feskov S.A., 2023

МОБИЛИЗАЦИЯ И СОХРАНЕНИЕ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-21-30

Анатомия, уровень плоидности и компонентный состав эфирного масла *Hyssopus officinalis* 'Никитский Белый' *in vitro* и *ex situ*

И. В. Булавин, Н. Н. Иванова, Н. Н. Мирошниченко, Н. М. Саплев, С. А. Феськов

Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, Ялта, Россия

Автор, ответственный за переписку: Илья Владимирович Булавин, cellbiolnbs@yandex.ru

Актуальность. Получение идентичных растений при использовании клонального микроразмножения является первостепенной задачей, особенно среди лекарственных культур. Поскольку для *Hyssopus officinalis* L. сведения о структуре органов *in vitro*, генетической стабильности и компонентном составе эфирного масла ограничены, целью нашего исследования было изучение данных аспектов при непродолжительном сроке культивирования *in vitro*.
Материалы и методы. В качестве материала использовали *Hyssopus officinalis* 'Никитский Белый', культивируемый *ex situ*, *in vitro* и *ex vitro*. Исследование анатомии, плоидности, относительного содержания ДНК, извлечение и анализ эфирного масла осуществляли согласно общепринятым методам. Статистический анализ проводили с использованием программного обеспечения Past версии 4.03.
Результаты. Согласно полученным результатам, при введении в состав питательной среды МС 6-БАП в оптимальных концентрациях (0,3–0,5 мг/л) общая структура листовых пластинок микропобегов, в сравнении с таковыми *ex situ*, сохранялась, при этом наблюдали качественные и количественные изменения, связанные с условиями культивирования и омоложением материала. Анализ уровня плоидности и относительного содержания ДНК ядер, выделенных из клеток тканей листьев микропобегов *ex vitro* после адаптации, выявил отсутствие изменений. Массовая доля эфирного масла и его компонетный состав у материнских растений и регенерантов *ex vitro* были подобными.
Заключение. Культивирование микропобегов *Hyssopus officinalis* 'Никитский Белый' *in vitro* на питательной среде МС при введении оптимальных концентраций 6-БАП способствует их нормальному развитию, сохранению уровня плоидности, относительного содержания ДНК, а также не влияет на выход эфирного масла и его компонентный состав. Разработанный протокол для клонального микроразмножения *Hyssopus officinalis* 'Никитский Белый' обеспечивает получение клонов, идентичных растениям *ex situ*.

Ключевые слова: клональное микроразмножение, адаптация, листовая пластинка, световая микроскопия, проточная цитометрия, хроматография

Благодарности: исследование выполнено в рамках Государственного задания № FNNS-2022-0010 (регистрационный номер 122011700347-4) Никитского ботанического сада – Национального научного центра РАН.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Булавин И.В., Иванова Н.Н., Мирошниченко Н.Н., Саплев Н.М., Феськов С.А. Анатомия, уровень плоидности и компонентный состав эфирного масла *Hyssopus officinalis* 'Никитский Белый' *in vitro* и *ex situ*. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):21-30. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-21-30

Introduction

The production of medicinal plants using *in vitro* regeneration techniques became popular due to consumer demand, large-scale production in a considerable period within confined space, stable supply of disease-free elite genotypes, and conservation of plants (Manokari et al., 2021). Common hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) is widely used as an aromatic and medicinal plant. It is mainly utilized for the production of essential oil applied in the pharmaceutical (as an antioxidant, expectorant, antiseptic, antibacterial and antifungal agent) and perfume industries, as well as in aromatherapy, where its main components, such as *trans*-, and *cis*-pinocamphone, exert a muscle relaxant effect (Plugatar et al., 2023). In the Nikita Botanical Gardens, the work on the development of new hyssop cultivars has been carried out. Plants (*H. officinalis* 'Nikitskiy Beliy') with a number of economically valuable traits (drought resistance, late maturation, raw material yield of 11.39 t/ha, essential oil mass fraction of 0.45% wet weight, and essential oil yield of 51.3 kg/ha) were selected. Research on the qualitative and quantitative composition of bioactive compounds (volatile compounds, phenolics, vitamins, etc.) in the aqueous ethanol extract confirmed the prospects of using the released cultivar to develop products with high biological value (Grebennikova et al., 2017).

Traditionally, hyssop plants are reproduced by seeds; however, this method has some limitations for promising forms and cultivars. To preserve economically valuable traits, plant material obtained through selection breeding needs to be propagated using different vegetative technologies that are of interest for production (Kalinichenko et al., 2013). Currently, biotechnological methods are important for mass multiplication, investigation, and conservation of valuable forms obtained during selection (Bulavin et al., 2021). By now, there are published data regarding different stages of clonal micropropagation of *H. officinalis* (Plugatar et al., 2023). The relevance of such studies has been emphasized for further optimization of the process (Maslova et al., 2021).

Anatomical characteristics mostly reflect the environmental conditions under which the plants have developed and are the result of a complex process that reveals the phenotypical plasticity of these organisms (Rodrigues et al., 2014). The environmental conditions during *in vitro* culturing are very specific due to the use of sealed containers. In addition, high relative humidity, reduced gas exchange, artificial temperature, illumination conditions as well as high variations in CO_2 and ethylene accumulation may occur inside such containers. So, *in vitro* plants can demonstrate anatomical and physiological disorders caused by the effect of micro-environmental conditions (Rodrigues et al., 2014; Martins et al., 2019). Moreover, different concentrations of plant growth regulators also influence the plant structure *in vitro*. Therefore, the anatomy of the *in vitro* material is studied to identify anomalies, optimize the cultivation conditions, and assess the possibility of plant adaptation to *ex vitro* conditions (Plugatar et al., 2023).

During the period of culturing, variable responses of plants to an *in vitro* environment may be accompanied by genetic variations (Ai et al., 2023). Generally, multiplication techniques via buds (existing meristems), shoot tips, nodes, internodes, leaves, and petioles are most frequently chosen to maintain genetic stability (Sliwinska, Thiem, 2007; Rohela et al., 2022). However, newly developed microplants grown from the meristems of the *in vitro* propagated shoots may show genetic variability (Sliwinska, Thiem, 2007). So, the plants grown *in vitro* require assessment of their genetic stability using the ploidy level and/or DNA content analysis (Sliwinska, Thiem, 2007; Fritsche et al., 2022b; Catalano et al., 2023), molecular markers (Çetin, 2018; Bulavin et al., 2021), or both methods (Abdolinejad et al., 2020; Raji, Farajpour, 2021).

Currently, there are data available on essential oil components of *in vitro* microshoots/plants (Guedes et al., 2003; Allahverdi-Mamaghani et al., 2022) and field-acclimated regenerants (Kuźma et al., 2009; Shelepova et al., 2021), but for hyssop such information is very limited. It emphasizes the importance of attaining the unchanged composition of these secondary metabolites after micropropagation for medicinal plants as a source of bioactive metabolites (Sliwinska, Thiem, 2007).

Since the information on structural and genetic stability as well as essential oil composition of *Hyssopus officinalis* under *in vitro* conditions is limited, the aim of this study was to investigate these aspects during short-term cultivation.

Materials and methods

The objects of this study included plants of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' grown *ex situ* at the collection plots of the Nikita Botanical Gardens (NBG) located at an altitude of 200 m above sea level under the subtropical climate of the Mediterranean type, and *in vitro* microshoots cultivated on a modified Murashige and Skoog culture medium (MS) with 0.3–0.9 mg/L 6-BAP (Bulavin et al., 2021). The material in culture vessels was kept in the phytochambers of the Unique Scientific Installation "PHYTOBIOGEN" of the NBG or the MLR-352-PE growth chamber (Panasonic, Japan) at a temperature of 24 ± 1°C, 16-h photoperiod, and 37.5 μmol m^{-2} s^{-1} light intensity under basic cool daylight lamps (Ledvance, Smolensk, Russia).

For adaptation, rooted plantlets were transferred into plastic pots with a mixture of soil and perlite (1 : 1), covered with insulators, and grown in a plant growth climate chamber (Conviron, Canada) at 22 ± 1°C, a light intensity of 37.5 μmol m^{-2} s^{-1}, a photoperiod of 16 h, and air humidity of 70–80%. Gradual acclimatization was performed *ex vitro* in a plant growth chamber for two months with subsequent cultivation under greenhouse conditions.

For plant anatomy studies, leaves of the *ex situ* shoots and *in vitro* microshoots were cut and immediately fixed in a solution of formalin, alcohol, acetic acid, and water (1 : 5 : 0.5 : 3.5), dehydrated in alcohols and embedded into paraffin. Sections (8–10 μm) were made on a Rotmic 2A microtome (Orion Medic, Russia), stained with a 0.005% solution of methylene blue, mounted into 60% sucrose, and investigated under the CX-41 light microscope (Olympus, Japan) with a SC 50 digital camera (Olympus, Germany) and the CellSens image processing software version 1.17. In total, 30 cells from ten *ex situ* and *in vitro* leaves were analyzed for each parameter.

The ploidy level and relative DNA content were studied on fresh material. Leaf blades (about 0.5 cm^2) of six *ex situ* and *ex vitro* plants were immersed in a modified WPB buffer (Loureiro et al., 2007) with 2% polyvinylpyrrolidone (K10) supplemented with propidium iodide (50 μg/mL), RNase (50 μg/mL), and *β*-mercaptoethanol (0.3%), grinded up with a safety razor blade. The obtained samples were passed through a 30 mμ CellTrics® filter (Partec, Germany). The analysis was performed using a CyFlow® Ploidy Analyzer (Sysmex, Partec, Germany). *Ficus benjamina* L. plants were used as an external control to determine the relative DNA content (Skaptsov et al., 2016). The measurements were carried out on the same analyzer settings with at least 10.000 nuclei.

In the environments of the South Coast of Crimea, the highest productivity of *H. officinalis* raw materials (yield, and essential oil yield) is observed from the third year of the plants' growing season. Our experiment used five-year-old *ex situ* plants and three-year-old regenerants cultivated in open ground under similar conditions. The biochemical studies of essential oil were carried out on the equipment of the Common Use Center "Physiological and Biochemical studies of Plant Objects" of the NBG (Yalta, Russia). The mass fraction of essential oil was measured in fresh raw materials by hydrodistillation on Ginsberg devices (Shevchuk et al., 2022). The component composition of essential oils was analyzed using a hardware and software complex based on a Chromatek-Crystal 5000.2 chromatograph (Chromatek, Russia) equipped with a mass spectrometric detector (capillary column: CR–5 ms, length: 30 m, inner diameter: 0.25 mm; phase: 5% phenyl 95% polysilphenylenesiloxane, film thickness: 0.25 microns). The temperature of the thermostat was programmed from 75°C to 240°C at a speed of 4°C/min. The evaporator temperature was 250°C. The carrier gas was helium; the flow rate was 1 mL/min. The temperature of the transition line was 250°C. The temperature of the ion source was 200°C. The electronic ionization was 70 eV. The scanning range was 20–450. The scan duration was 0.2. Identification was based on a comparison of the obtained mass spectra with the data from the NIST 14 library (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA) using the NIST MS Search software v. 2.2 (Gaithersburg, USA). Retention indices were obtained by logarithmic interpolation of the reduced retention times using the analytical standard of a mixture of reference n-alkanes (Sigma-Aldrich, Switzerland) and analytical standards (Supelco, USA). The mass fraction of the components in a sample was measured by the percentage normalization method (Adams, 2007; Tkachev, 2008).

Statistical analysis was carried out using the Past 4.03 software (Hammer et al., 2001). Samples were checked for normality of distribution, and either the *t*-test or the U-criterion was used ($p \leq 0.05$).

Results and discussion

It is well known that the morphogenesis of *in vitro* plants depends on the genotype of the plant material, type of the explant, hormonal composition of the nutrient medium, etc. (Bulavin et al., 2020; Mitrofanova et al., 2022a). The optimal concentration of growth regulators in a nutrient medium supports normal organ development, while their high content provokes structural rearrangements in plant organs *in vitro* (Plugatar et al., 2023). For the *in vitro* introduction of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy', shoot segments with a lateral bud were used. Induction of shoot formation was carried out on a modified MS nutrient medium supplemented with 0.5–1.0 mg/L 6-BAP and 0.1 mg/L IBA. Normally formed microshoots were observed after 21 days. They were separated and subcultured on an MS medium supplemented with 0.3–0.9 mg/L 6-BAP. To assess the regenerative potential of hyssop microshoots under *in vitro* culture, their number per explant was analyzed. The optimal concentration of 6-BAP was set at 0.5 mg/L, and 3.3 ± 0.16 normally formed microshoots per explant were obtained. The presence of 0.7–0.9 mg/L 6-BAP in the medium contributed to an increase in the number of microshoots to 4.5 ± 0.18 pieces per explant, while among normally formed organs and their structural parts, the presence of various morphological deviations, such as deformation, thickening, fusion of microshoots, and the formation of single disproportionate leaves were observed. The presence of 0.3–0.4 mg/L 6-BAP in the medium promoted the growth and elongation of microshoots and their spontaneous rooting, as well as a decrease in shoot formation intensity.

Since the leaf is the main photosynthetic organ of *in vitro* and *ex situ* plants, its anatomy was studied. According to the data obtained, epidermis with a cuticle, several subepidermal layers of the collenchyma in the upper and lower parts, oval vascular bundle consisting of the xylem and phloem, and parenchyma were differentiated on the leaf cross-sections along the midrib. In the side part of the leaf, epidermis with the a cuticle, and palisade and spongy mesophyll with lateral veins were distinguished (Fig. 1, A, B). The leaves of *in vitro* microshoots had a similar structure (Fig. 1, C, D). However, among the observed qualitative changes, the cuticular layer, collenchyma, was less developed in the midrib.

Among the quantitative changes, a significant decrease in the leaf height in the midrib and side parts was found *in vitro* compared to *ex situ* (Table 1). Besides, a decrease in the size of the midrib and xylem element number was observed. Under *in vitro* culturing, a reduction in the size of epidermal cells and mesophyll occurred, affecting the general linear parameters.

According to published sources, specific culturing conditions can affect the organ structure of the *in vitro* material. The ecological and anatomical variability analysis of *in vitro* plants revealed mainly quantitative changes (Apóstolo et al., 2005), which is consistent with our data. Photosynthetic tissue structure analyses performed on *in vitro* leaves of ornamental, essential-oil, and fruit crop plants demonstrated the presence of a differentiated mesophyll. One- or two-row palisade cells and two to four rows of spongy mesophyll were found. In some cultivars of *Ficus carica* L., *Lavandula angustifolia* Mill., *Lavandula × intermedia* Emeric ex Loisel. the formation of an isopalisade mesophyll was observed (Mitrofanova et al., 2022b). In this study, the presence of a differentiated mesophyll in *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' *in vitro* leaves was identified. Similar data were obtained for *H. officinalis* f. *cyaneus* leaf blades *in vitro*. Besides, some changes in the structure of the organs, namely an increase in the number of spongy mesophyll layers and cell sizes with increased 6-BAP concentrations, were shown (Plugatar et al., 2023).

Changes in the geometry and structure of conducting bundles are also characteristic of *in vitro* culture. In *Vitex negundo* L., a concave vascular bundle was described, with a few xylem elements and a thin layer of the phloem. Veinlets transversing the mesophyll were represented by inconspicuous collateral bundles surrounded by undistinguished endodermis (Manokari et al., 2021). For *Cynara scolymus* L. leaves *in vitro*, limited development of a conducting bundle consisting of several elements without fibers was shown (Apóstolo et al., 2005).

According to our analysis, the *in vitro* leaf midrib of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' was characterized by the decreasing height and width, and a diminished number of xylem elements, developed to a sufficient extent and observed on the cross-sections. The change in the midrib size was probably associated with the correlative relationships during the lamina development depending on its linear parameters.

In *in vitro* culture, the plant genome can be affected, and somaclonal variation (spontaneous mutagenesis) may occur. It is believed that introduction into *in vitro* culture destabilizes the genetic and epigenetic program of intact plant tissue (Neelakandan, Wang, 2012) and can lead to variations at the level of chromosomes and DNA sequences (Neelakandan, Wang, 2012; Ryabushkina, 2014; Plugatar

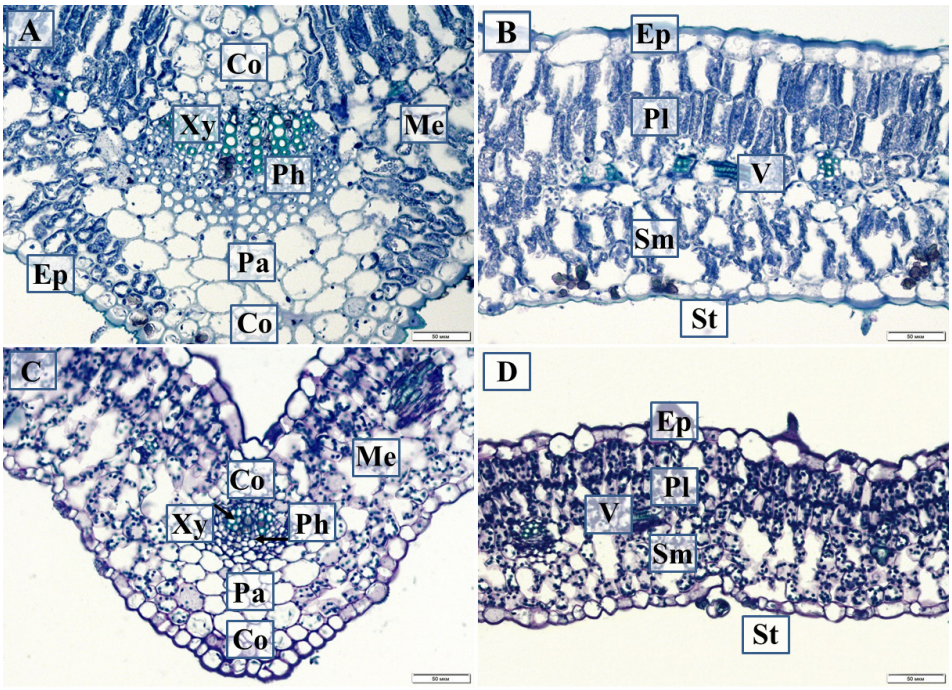


Fig. 1. ***Hyssopus officinalis*** **L. 'Nikitskiy Beliy' cross-sections of the leaf** ***ex situ*** **(A, B) and** ***in vitro*** **(C, D):**
Co – collenchyma; **Ep** – epidermis; **Me** – mesophyll; **Pa** – parenchyma; **Ph** – phloem; **Pl** – palisade; **Sm** – spongy mesophyll; **St** – stomata; **V** – vein; **Xy** – xylem (light microscopy)

Рис. 1. Поперечные срезы листьев ***Hyssopus officinalis*** **L. 'Никитский Белый'** ***ex situ*** **(A, B) и** ***in vitro*** **(C, D):**
Co – колленхима; **Ep** – эпидерма; **Me** – мезофилл; **Pa** – паренхима; **Ph** – флоэма; **Pl** – столбчатый мезофилл; **Sm** – губчатый мезофилл; **St** – устьице; **V** – боковая жилка; **Xy** –ксилема (световая микроскопия)

Table 1. Quantitative anatomical parameters of ***Hyssopus officinalis*** **L. 'Nikitskiy Beliy' leaf blade cross-sections**

Таблица 1. Количественные анатомические показатели поперечных срезов листьев ***Hyssopus officinalis*** **L. 'Никитский Белый'**

Parameter	*Ex situ*	*In vitro*
Leaf cut height, midrib (μm)	403.64 ± 8.87	236.51 ± 10.24*
Midrib height (μm)	97.18 ± 4.61	53.28 ± 2.92*
Midrib width (μm)	157.85 ± 11.17	86.12 ± 2.21*
Vessel number	47.9 ± 4.11	33.6 ± 3.4*
Leaf cut height, side part (μm)	251.16 ± 7.67	171.18 ± 12.46*
Cell height, upper epidermis (μm)	29.75 ± 1.03	24.01 ± 1.11*
Cell width, upper epidermis (μm)	33.66 ± 1.51	30.09 ± 2.25*
Cell height, lower epidermis (μm)	22.29 ± 0.77	14.99 ± 0.67*
Cell width, lower epidermis (μm)	23.44 ± 1.17	17.15 ± 0.84*
Cell height, palisade mesophyll (μm)	41.92 ± 0.83	38.41 ± 1.24*
Cell width, palisade mesophyll (μm)	11.26 ± 0.33	16.97 ± 0.74*
Cell height, spongy mesophyll (μm)	27.69 ± 0.96	17.38 ± 1.06*
Cell width, spongy mesophyll (μm)	12.75 ± 0.64	22.64 ± 1.53*
Number of the palisade mesophyll layer	2.2 ± 0.13	2.0 ± 0.00
Number of the spongy mesophyll layer	3.6 ± 0.16	3.2 ± 0.13
Palisade height (μm)	88.21 ± 5.37	63.43 ± 5.43*
Spongy mesophyll height (μm)	121.03 ± 4.11	61.24 ± 6.07

Note: * – an asterisk indicates a significant difference between the two parameters in a line

Примечание: * – звездочка указывает на существенную разницу между двумя параметрами в строке

et al., 2023). Therefore, the ploidy level of the nuclei isolated from the leaves of *H. officinalis* 'Nikitskiy Beliy' *ex vitro* plants after adaptation was compared with the ploidy of *ex situ* plants. On the histogram comparing the *ex situ* and *ex vitro* leaf nuclei of *H. officinalis*, the main fluorescence peak, corresponding to the G_1/G_0 (2C) phases, and the next small one, conforming to G_2 (4C), were identified (Fig. 2). Since the number of peaks was similar, no changes were detected in the *ex vitro* samples, and their ploidy corresponded to 2x. The relative DNA content analysis did not reveal any changes as well: 2C = 1.02 pg for *ex situ* plants versus 2C = 1.05 for *ex vitro* plants.

The essential oil of *H. officinalis* is the main physiologically active component of the plant. It has antibacterial, antiviral, antifungal, and expectorant effects. Typically, the yield of essential oil obtained by steam hydrodistillation from dried and fresh hyssop plant material is 0.15–0.30% and 0.30–0.80%, respectively. The main components are isomeric pinocamphone, *β*-pinene, pinocarvone, limonene, linalool, *β*-caryophyllene, germacrene D, thujone, and myrtenol (Velikorodov et al., 2015).

According to the data obtained, the mass fraction of essential oil in mother plants and in *ex vitro* regenerants was 0.33% and 0.30% wet weight, respectively. The dominant

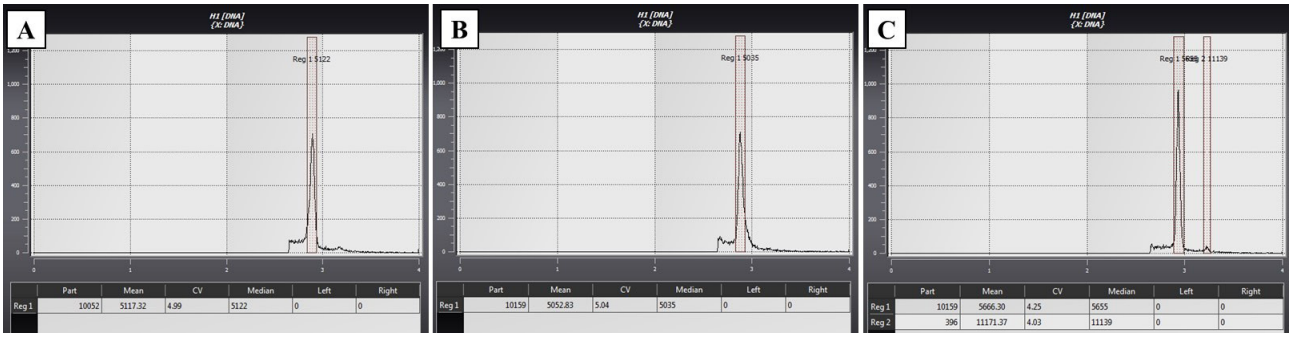


Fig. 2. Ploidy level histograms of the *Hyssopus officinalis* L. 'Nikitskiy Beliy' nuclei isolated from leaves: A – external control of *Ficus benjamina*; **B –** nuclei sample isolated from the leaves of *ex situ* plants; **C –** samples of nuclei obtained from the leaves of *ex vitro* plants after adaptation

Рис. 2. Гистограммы уровня плоидности ядер *Hyssopus officinalis* L. 'Никитский Белый', выделенных из листьев: А – внешний контроль *Ficus benjamina*; **В –** образец с ядрами, выделенными из листьев растений *ex situ*; **С –** образец с ядрами, полученными из листьев побегов растений *ex vitro* после адаптации

Indirect regeneration via callus is considered the main source of somaclonal variation. Thus, for example, FCM-analysis of the nuclei isolated from the shoot segments of *Asparagus officinalis* L. obtained from anther callus revealed that the DNA content in the nuclei had three types of peaks, corresponding to 2x, 4x, and 8x, that represented the diploid, tetraploid and octaploid DNA levels, respectively (Shiga et al., 2009). Meanwhile, no changes in the ploidy level of the callus-derived regenerants of *Eulophia ochreata* Lindl. during micropropagation were shown (Shriram et al., 2014). Cytogenetic studies confirmed that the highest percentage of chromosomal abnormalities were observed, as expected, in callus and protoplast cultures, with a predominance of polyploidy, followed by aneuploidy (Duta-Cornescu, 2023).

In the case of direct regeneration, researchers marked a reduction in the activity of genomic rearrangements, associated with prolonged tissue cultivation in the presence of plant growth regulators (Skaptsov et al., 2016). At the same time, when *Cattleya tigrina* A. Rich. (Orchidaceae) *in vitro* plants were analyzed, regenerants with a doubled ploidy level (26.5%) were identified (Fritsche et al., 2022a). As endopolyploidy is a common feature in orchid tissues, an attempt was made to find evidence of its influence on the cytogenetic stability of regenerated plantlets. Although no direct correlation between the explants' endoploidy and changes in the regenerants' ploidy level was found, the authors emphasized that micropropagation of genetically superior plants can lead to obtaining double ploidy regenerants (Fritsche et al., 2022b). Our data complied with the results earlier obtained on *Hyssopus officinalis* f. *cyaneus* Alef. nuclei isolated from the leaves of *in vitro* microshoots and *ex situ* plants (Plugatar et al., 2023) and attested to the genetic stability of *H. officinalis* 'Nikitskiy Beliy' during short-term *in vitro* culturing.

components in all analyzed samples were bicyclic monoterpene ketones, such as pinocamphone (43.72 and 43.30%) and isopinocamphone (24.97 and 25.88%). Minor components, including mirtenol (5.24 and 5.09%), *β*-pinene (4.20 and 4.70%), elemol (4.57 and 4.40%), and bicyclogermacrene (4.60 and 3.66%), varied slightly (Table 2).

It is known that *in vitro* culture makes it possible to obtain new compounds that have not previously been found in intact plants (Thiem et al., 2011; Luczkiewicz et al., 2015). There are published evidences that demonstrate differences in the chemical composition between *in vitro* material and greenhouse plants (Guedes et al., 2003; Allahverdi-Mamaghani et al., 2022). Meanwhile, a study on *Hypericum androsaemum* L. emphasized that the composition of essential oils was complex, had a variable number of compounds, and depended on the time of harvest and the origin (*in vivo* versus *in vitro*) of the biomass (Guedes et al., 2003).

Clonal micropropagation of valuable essential-oil cultivars implies the production of clones identical not only morphologically and genetically but also biochemically. The results obtained by Kuźma et al. (2009) demonstrated the similarity of chemical profiles and relative amounts of compounds between *in vitro* plants after acclimatization and cultivation for two years in the field and plants propagated from seeds and grown under the same conditions, which is important in view of the biological activity and commercial application of essential oil. According to our data, short-term *in vitro* culturing (six to seven months) of *H. officinalis* 'Nikitskiy Beliy' microshoots on the modified MS nutrient medium containing 6-BAP in optimal concentrations did not significantly affect the biosynthesis pathways of essential oil, which is confirmed by the data obtained by gas chromatography on the regenerated plants after three years of open-ground cultivation.

Table 2. **Component composition of essential oil in *Hyssopus officinalis* L. 'Nikitskiy Beliy'**
Таблица 2. **Компонентный состав эфирного масла *Hyssopus officinalis* L. 'Никитский Белый'**

Component	Retention time	Plant samples	
		Ex situ	*Ex vitro*
		Component mass fraction (%)	
α-pinene	4.56	0.18	0.20
sabinene	5.29	0.96	0.99
β-pinene	5.44	4.20	4.70
β-myrcene	5.54	0.90	0.87
D-limonene	6.56	0.73	0.72
β-phellandrene	6.61	1.08	0.89
(Z)-ocimene	6.90	0.92	0.79
linalool	8.29	1.24	1.22
α-thujone	8.56	0.59	0.64
trans-**pinocamphone**	10.23	43.72	43.30
isopinocamphone *cis*-pinocamphone	10.77	24.97	25.88
terpinene-4-ol	10.81	–	0.21
α-terpineol	11.19	0.74	0.88
myrtenol	11.32	5.24	5.09
methyl myrtenate	14.27	0.36	0.43
β-bourbonene	17.27	0.36	0.41
methyl eugenol	17.44	0.26	0.35
β-caryophyllene	18.37	0.54	0.60
allo-aromadendrene	19.60	0.76	0.54
germacrene D	20.19	1.97	1.72
bicyclogermacrene	20.65	4.60	3.66
elemol	22.06	4.57	4.40
(+)-spathulenol	22.93	0.41	0.47
ledol	23.76	0.26	0.26
γ-eudesmol	24.48	0.44	0.66
Content, %	monoterpenes	8.97	9.16
	sesquiterpenes	8.23	6.93
	Terpenes in total:	**17.20**	**16.09**
	alcohols	12.90	13.19
	ethers	0.62	0.78
	phenols	–	–
	ketones	69.28	69.82
	Terpenoids in total:	**82.80**	**83.79**
Quantitative content of all identified components, %		100	96.15

Conclusion

Cultivation of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' microshoots on an MS nutrient medium with 0.3–0.5 mg/L 6-BAP promotes morphogenesis without significant deviations. Leaf blades *in vitro* retained the overall structure, while some qualitative and quantitative changes associated with the effect of cultivation conditions and material rejuvenation were observed. *Ex vitro* regenerants demonstrated genome stability, which was confirmed by flow cytometry. After *ex situ* cultivation at the collection plot, essential oil yield and component composition of the regenerated plants was similar to the mother plants. The developed protocol for clonal micropropagation of *Hyssopus officinalis* 'Nikitskiy Beliy' provides clones identical to *ex situ* plants.

References / Литература

Abdolinejad R., Shekafandeh A., Jowkar A., Gharaghani A., Alemzadeh A. Indirect regeneration of *Ficus carica* by the TCL technique and genetic fidelity evaluation of the regenerated plants using flow cytometry and ISSR. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2020;143(1):131-144. DOI: 10.1007/s11240-020-01903-5

Adams R.P. Identification of essential oil components by gas chromatography/quadrupole mass spectrometry. 4th ed. Carol Stream, IL: Allured Publishing Corporation; 2007.

Ai X.,Wen Y.,Wang B. Assessment of genetic stability on *in vitro* propagation of *Ardisia crenata* var. *bicolor* using ISSR markers. *International Journal of Plant Biology.* 2023;14(1):218-227. DOI: 10.3390/ijpb14010018

Allahverdi-Mamaghani B., Hesamzadeh Hejazi S.M., Mirza M., Movafeghi A. Comparison of essential oils composition between *in-vitro* plantlets and greenhouse plants from various populations of *Dracocephalum kotschyi* Boiss. *Journal of Medicinal Plants and By-products*. 2022;11(2):219-230. DOI: 10.22092/jmpb.2021.353864.1343

Apóstolo N.M., Brutti C.B., Llorente B.E. Leaf anatomy of *Cynara scolymus* L. in successive micropropagation stages. *In Vitro Cellular and Developmental Biology – Plant*. 2005;41(3):307-313. DOI: 10.1079/IVP2004606

Bulavin I., Brailko V., Zhdanova I. *In vitro* rhizogenesis of the *Lavandula angustifolia* cultivars. *BIO Web of Conferences*. 2020;24:00017. DOI: 10.1051/bioconf/20202400017

Bulavin I.V., Ivanova N.N., Mitrofanova I.V. *In vitro* regeneration of *Hyssopus officinalis* L. and plant genetic similarity. *Doklady Biological Sciences*. 2021;499(1):109-112. DOI: 10.1134/S0012496621040013

Catalano C., Carra A., Carimi F., Motisi A., Sajeva M., Butler A. et al. Somatic embryogenesis and flow cytometric assessment of nuclear genetic stability for *Sansevieria* spp.: an approach for *in vitro* regeneration of ornamental plants. *Horticulturae*. 2023;9(2):138. DOI: 10.3390/horticulturae9020138

Çetin B. Evaluation of the genetic fidelity of *in vitro* raised plants of *Origanum majorana* L. using random amplified polymorphic DNA. *Celal Bayar University Journal of Science*. 2018;14(2):237-239. DOI: 10.18466/cbayarfbe.406873

Duta-Cornescu G., Constantin N., Pojoga D.M., Nicuta D., Simon-Gruita A. Somaclonal variation – Advantage or disadvantage in micropropagation of the medicinal plants. *International Journal of Molecular Sciences.* 2023;24(1):838. DOI: 10.3390/ijms24010838

Fritsche Y., Deola F., da Silva D.A., Holderbaum D.F., Guerra M.P. *Cattleya tigrina* (Orchidaceae) *in vitro* regeneration: main factors for optimal protocorm-like body induction and multiplication, plantlet regeneration, and cytogenetic stability. *South African Journal of Botany*. 2022a;149:96-108. DOI: 10.1016/j.sajb.2022.05.059

Fritsche Y., Ornellas T.S., Stefenon V.M., Guerra M.P. Ploidy mosaics: does endopolyploidy in explants affect the cytogenetic stability of orchids regenerated from PLBs? *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2022b;149(3):697-713. DOI: 10.1007/s11240-022-02238-z

Grebennikova O.A., Paliy A.Y., Khlypenko L.A., Rabotyagov V.D. Biologically active substances of *Hyssopus officinalis* L. *Orbital*. 2017;(1):21-28. [in Russian] (Гребенникова О.А., Палий А.Е., Хлыпенко Л.А., Работягов В.Д. Биологически активные вещества *Hyssopus officinalis* L. *Орбиталь*. 2017;(1):21-28).

Guedes A.P., Amorim L.R., Vicente A.M.S., Ramos G., Fernandes-Ferreira M. Essential oils from plants and *in vitro* shoots of *Hypericum androsaemum* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003;51(5):1399-1404. DOI: 10.1021/jf020872f

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. PAST: paleontological statistics software. Package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):4. Available from: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf [accessed Jan. 26, 2023].

Kalinichenko L.V., Malankina E.L., Przhevalsky N.M., Rozhkova E.N., Gryaznov A.P. How to increase the rooting ability of hyssop (Kak povysit ukorenyayemost issopa). *Potato and Vegetables*. 2013;(8):18-19. [in Russian] (Калиниченко Л.В., Маланкина Е.Л., Пржевальский Н.М., Е.Н. Рожкова, А.П. Грязнов. Как повысить укореняемость иссопа. *Картофель и овощи*. 2013;(8):18-19).

Kuźma Ł; Kalemba D., Różalski M., Różalska B., Więckowska-Szakiel M., Krajewska U. et al. Chemical composition and biological activities of essential oil from *Salvia sclarea* plants regenerated *in vitro. Molecules.* 2009;14(4):1438-1447. DOI: 10.3390/molecules14041438

Loureiro J., Rodriguez E., Doležel J., Santos C. Two new nuclear isolation buffers for plant DNA flow cytometry: a test with 37 species. *Annals of Botany.* 2007;100(4):875-888. DOI: 10.1093/aob/mcm152

Luczkiewicz M., Jesionek A., Kokotkiewicz, A., Migas P., Mardarowicz M., Szreniawa-Sztajnert A. et al. Production of essential oils from *in vitro* cultures of *Caryopteris* species and comparison of their concentrations with *in vivo* plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2015;37(3):58. DOI: 10.1007/s11738-015-1804-0

Manokari M., Priyadharshini S., Shekhawat M.S. Microstructural stability of micropropagated plants of *Vitex negundo* L. *Microscopy and Microanalysis*. 2021;27(3):626-634. DOI: 10.1017/S1431927621000283

Martins J.P.R., Rodrigues L.C.D.A., Conde L.T., Gontijo A.B.P.L., Falqueto A.R. Anatomical and physiological changes of *in vitro*-propagated *Vriesea imperialis* (Bromeliaceae) in the function of sucrose and ventilated containers. *Plant Biosystems.* 2020;154(1):87-99. DOI: 10.1080/11263504.2019.1635223

Maslova E., Gulya N., Perelugina T., Semykina V., Kalashnikova E. Introduction of *Hyssopus officinalis* L. into *in vitro* culture to optimize the conditions for obtaining callus tissues and microclonal propagation as a promising method of innovative agrobiotechnologies. *BIO Web Conferences.* 2021;30:05006. DOI: 10.1051/bioconf/20213005006

Mitrofanova I., Tsyupka V., Jain S.M. Morpho-anatomical characterization of *in vitro* regenerated plants. In: A.C. Rai, A. Kumar, A. Modi, M. Singh (eds). *Advances in Plant Tis-*

sue Culture. Current Developments and Future Trends. Cambridge, MA: Academic Press; 2022. p.175-204.

Mitrofanova I.V., Lesnikova-Sedoshenko N.P., Chelombit S.V., Zhdanova I.V., Ivanova N.N., Mitrofanova O.V. The effect of plant growth regulators on the *in vitro* regeneration capacity in some horticultural crops and rare endangered plant species. *Acta Horticulturae.* 2022;1339:189-191. DOI: 10.17660/ActaHortic.2022.1339.24

Neelakandan A.K, Wang K. Recent progress in the understanding of tissue culture-induced genome level changes in plants and potential applications. *Plant Cell Reports.* 2012;31(4):597-620. DOI: 10.1007/s00299-011-1202-z

Plugatar Y.V., Bulavin I.V., Ivanova N.N., Miroshnichenko N.N., Saplev N.M., Shevchuk O.M. et al. Study of the component composition of essential oil, morphology, anatomy and ploidy level of *Hyssopus officinalis* f. *cyaneus* Alef. *Horticulturae.* 2023;9(4),480. DOI: 10.3390/horticulturae9040480

Raji M.R., Farajpour M. Genetic fidelity of regenerated plants via shoot regeneration of muskmelon by inter simple sequence repeat and flow cytometry. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2021;20(2):88-93. DOI: 10.1016/j.jssas.2020.12.003

Rodrigues S.P., de Toledo Picoli E.A., de Oliveira D.C., da Silva Carneiro R.G., dos Santos Isaias R.M. The effects of in vitro culture on the leaf anatomy of *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae). *Bioscience Journal.* 2014;30(6):1933-1941.

Rohela G.K., Jogam P., Saini P., Sandhya D., Peddaboina V., Shekhawat M.S. Assessing the genetic stability of *in vitro* raised plants. In: S. Gupta, P. Chaturvedi (eds). *Commercial Scale Tissue Culture for Horticulture and Plantation Crops*. Singapore: Springer; 2022. p.245-276. DOI: 10.1007/978-981-19-0055-6_11

Ryabushkina N.A. Clonality and somaclonal variations in plants. *Biotechnology. Theory and practice*. 2014;(2):17-27. [in Russian] (Рябушкина Н.А. Клональная и микроклональная изменчивость растений. *Биотехнология. Теория и практика*. 2014;(2):17-27). DOI: 10.11134/btp.2.2014.3

Shelepova O.V., Dilovarova T.A., Gulevich A.A., Olekhnovich L.S., Shirokova A.V., Ushakova I.T. et al. Chemical components and biological activities of essential oils of *Mentha* × *piperita* L. from field-grown and field-acclimated after *in vitro* propagation plants. *Agronomy*. 2021;11(11):2314. DOI: 10.3390/agronomy11112314

Shevchuk O.M., Isikov V.P., Logvinenko L.A. Methodological and procedural aspects of introduction and breeding of aromatic and medicinal plants (Metodologicheskiye i metodicheskiye aspekty introduktsii i selektsii aromaticheskikh i lekarstvennykh rasteniy). Simferopol: Arial; 2022. [in Russian] (Шевчук О.М., Исиков В.П., Логвиненко Л.А. Методологические и методические аспекты интродукции и селекции ароматических и лекарственных растений. Симферополь: Ариал; 2022).

Shiga I., Uno Y., Kanechi M., Inagaki N. Identification of polyploidy of *in vitro* anther-derived shoots of *Asparagus officinalis* L. by flow cytometric analysis and measurement of stomatal length. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*. 2009;78(1):103-108.

Shriram V., Nanekar V., Kumar V., Kavi Kishor P.B. *In vitro* regeneration and ploidy level analysis of *Eulophia ochreata* Lindl. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2014;52(11):1112-1121.

Skaptsov M.V., Smirnov S.V., Kutsev M.G., Shmakov A.I. Problems of a standardization in plant flow cytometry. *Turczaninowia*. 2016;19(3):120-122. [in Russian] (Скапцов М.В., Смирнов С.В., Куцев М.Г., Шмаков А.И. Проблемы стандартизации в проточной цитометрии растений. *Turczaninowia*. 2016;19(3):120-122). DOI: 10.14258/turczaninowia.19.3.9

Sliwinska E., Thiem B. Genome size stability in six medicinal plant species propagated *in vitro*. *Biologia Plantarum*. 2007;51(3):556-558. DOI: 10.1007/s10535-007-0121-x

Thiem B., Kikowska M., Kurowska A., Kalemba D. Essential oil composition of the different parts and *in vitro* shoot culture of *Eryngium planum* L. *Molecules*. 2011;16(8):7115-7124. DOI: 10.3390/molecules16087115

Tkachev A.V. A study of volatile substances in plants (Issledovaniye letuchikh veshchestv rasteniy). Novosibirsk: Ofset; 2008. [in Russian] (Ткачев А.В. Исследование летучих веществ растений. Новосибирск: Офсет; 2008).

Velikorodov A.V., Kovalev V.B., Kurbanova F.H., Shchepetova E.V. Chemical composition of essential oil of *Hyssopus officinalis* L., cultivated in the Astrakhan region. *Chemistry of Plant Raw Material*. 2015;(3):71-76. [in Russian] (Великородов А.В., Ковалев В.Б., Курбанова Ф.Х., Щепетова Е.В. Химический состав эфирного масла *Hyssopus officinalis* L., культивируемого в Астраханской области. *Химия растительного сырья*. 2015;(3):71-76). DOI: 10.14258/jcprm.201503749

Information about the authors

Iliya V. Bulavin, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of a Laboratory, Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center of the RAS, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, cellbiolnbs@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9929-0946

Natalia N. Ivanova, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center of the RAS, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, nnivanova2017@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7628-9646

Natalia N. Miroshnichenko, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center of the RAS, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, natali_nbs88@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-3650-4010

Nikita M. Saplev, Associate Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center of the RAS, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, saplev.upk@ya.ru, https://orcid.org/0000-0003-1575-6639

Sergey A. Feskov, Researcher, Nikita Botanical Gardens – National Scientific Center of the RAS, 52 Nikitsky Spusk, Nikita, Yalta 298648, Republic of Crimea, Russia, sergey.feskoff@yandex.com, https://orcid.org/0000-0002-0740-6906

Информация об авторах

Илья Владимирович Булавин, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, cellbiolnbs@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9929-0946

Наталия Николаевна Иванова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, nnivanova2017@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7628-9646

Наталья Николаевна Мирошниченко, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, natali_nbs88@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-3650-4010

Никита Максимович Саплев, младший научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, saplev.upk@ya.ru, https://orcid.org/0000-0003-1575-6639

Сергей Александрович Феськов, научный сотрудник, Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН, 298648 Россия, Республика Крым, Ялта, Никита, Никитский спуск, 52, sergey.feskoff@yandex.com, https://orcid.org/0000-0002-0740-6906

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 22.06.2023; approved after reviewing on 12.10.2023; accepted for publication on 05.12.2023.
Статья поступила в редакцию 22.06.2023; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 05.12.2023.

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
УДК633.171
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-31-44

CC BY

Динамика изменчивости хозяйственных признаков проса сорта ‘Горлинка’ в климатических условиях южной части Восточно-Европейской равнины

Т. В. Кулемина

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. Смена температурных режимов характеризуется цикличностью; начиная с 1970-х годов этот процесс стал усиливаться в несколько раз быстрее в сторону глобального потепления климата. Прогнозируется, что влияние высокой температуры и засухи приведет к нежелательным последствиям для экономики, снижению урожайности, угрозе продовольственной безопасности. Данный фактор требует оценки происходящих климатических изменений и выделения причин, определяющих реакцию растений на них.
Материалы и методы. Объектом исследования служил районированный сорт проса ‘Горлинка’. Проведен учет изменчивости таких признаков, как продолжительность вегетационного периода, продуктивность, крупнозерность, высота растения, за период с 2001 по 2019 г. Изучение образца проводили в соответствии с методическими указаниями ВИР. Статистическую обработку выполняли с использованием Microsoft Excel.
Результаты и заключение. Изменение климата в южной части Восточно-Европейской равнины (Тамбовская обл.) с 2001 по 2019 г. в сторону потепления в июне на фоне достаточного увлажнения (ГТК = 1,26) не оказало достоверного влияния на продолжительность периода вегетации и продуктивность зерна районированного сорта проса ‘Горлинка’.

Ключевые слова: просо, погода, урожайность, крупнозерность, скороспелость, корреляция, изменение климата, регрессия

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».
Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Кулемина Т.В. Динамика изменчивости хозяйственных признаков проса сорта ‘Горлинка’ в климатических условиях южной части Восточно-Европейской равнины. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):31-44. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-31-44

© Кулемина Т.В., 2023

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-31-44

Dynamics of variability in agronomic characters of millet cv. 'Gorlinka' under the climate conditions of the southern part of the East European Plain

Tatyana V. Kulemina

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

Corresponding author: Tatyana V. Kulemina, kkku@ya.ru

Background. The change of temperature conditions is cyclic by nature. Since the 1970s this process has been intensifying several times faster towards global climate warming. The effect of high temperature and drought is expected to lead to undesirable consequences for the economy, a decrease in yields, and a threat to food security. This aspect requires an assessment of the ongoing climate changes and identification of the causes that induce the response of plants to them.
Materials and methods. The zoned millet cultivar 'Gorlinka' served as the material for this study. Variability was assessed from 2001 through 2019 for such characters as the duration of the growing season, grain yield, grain size, and plant height. The cultivar was tested according to VIR's guidelines. Statistical data processing was performed using Microsoft Excel.
Results and conclusion. The climate change in the southern part of the East European Plain (Tambov Province) from 2001 to 2019 towards warming in June under sufficient moisture (HTC = 1.26) did not significantly affect the duration of the growing season or grain yield of cv. 'Gorlinka'.

Keywords: millet, weather, yield, grain size, earliness, correlation, climate change, regression

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 author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Kulemina T.V. Dynamics of variability in agronomic characters of millet cv. 'Gorlinka' under the climate conditions of the southern part of the East European Plain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):31-44. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-31-44

Введение

Зерновые культуры играют важную продовольственную и экономическую роль в жизни человека. В настоящее время для посевных площадей сельскохозяйственных культур (пахотные земли и земли под постоянными культурами) используется более 1,5 млрд га земной поверхности (12% мировых площадей), из них под зерновыми культурами – 334,41 млн га (в России – 4,20 млн га, где просо обыкновенное занимает посевную площадь 0,6%, находящуюся в основном в Центральном, Южном, Северо-Кавказском, Приволжском и Сибирском федеральных округах) (Sidorenko et al., 2012; World Food and Agriculture…, 2018; Russian Statistical Yearbook…, 2022; World Agricultural Production…, 2023). Производство сельскохозяйственной продукции базируется на биопродукционном потенциале природной среды, где важнейшим фактором, его определяющим, является климат, который, вместе с почвенным плодородием, влияет на все объекты и процессы сельскохозяйственного производства.

Специалистам сельского хозяйства необходимо уметь эффективно использовать ресурсы климата для повышения продуктивности сельскохозяйственного производства и бороться с неблагоприятными метеорологическими явлениями. Всемирный экономический форум опубликовал списки глобальных рисков, где первую позицию в пятерке главных рисков заняли экстремальные погодные явления (The Global Risks…, 2017). До недавнего времени процесс определения актуального состояния сельского хозяйства, а также будущие оценки его состояния основывались на постоянстве климата. Вследствие достаточно быстрого изменения мирового климата, под воздействием природного, антропогенного и техногенного влияния, гипотеза о его неизменности лишилась практических оснований. Она уже не может служить фундаментом для решения вопроса о дальнейшем процессе развития аграрного сектора экономики России на среднесрочную и долгосрочную перспективу.

Данные наблюдений и модельных расчетов показывают, что климат России более чувствителен к глобальному потеплению, чем климат многих других регионов земного шара. За последние сорок лет скорость роста глобальной температуры составила 0,17°C каждые 10 лет, но температура на территории России растет значительно быстрее – 0,45°C за 10 лет (A report on climate features…, 2017; A report on climate risks…, 2017), потепление в целом по России составило 1,29°C (A report on climate features…, 2020). При этом сделан вывод, что урожайность сельскохозяйственных культур может увеличиться на 10–15% в средних и высоких широтах с повышением глобальной температуры на 1-2°C (Easterling et al., 2007).

Текущее изменение климата России в перспективе может привести к уменьшению увлажнения, особенно в засушливых регионах юга Европейской части страны, которое приведет к увеличению повторяемости засух и развитию опустынивания (Risks and benefits…, 2014). Низкая урожайность, как правило, формируется в регионах с ограниченной водообеспеченностью, с тепловым стрессом и короткой продолжительностью периода созревания зерна. Реакция урожайности сельскохозяйственных растений на дальнейшее потепление будет зависеть от характера изменения увлажнения: при его уменьшении на Европейской части РФ урожайность зерновых и кормовых культур будет уменьшаться; при увеличении – расти.

В настоящее время наблюдаемое потепление климата пока оценивается как благоприятное для сельского хозяйства России. При дальнейшем потеплении возможны улучшение структуры и расширение зоны растениеводства (Government of the Russian Federation…, 2019), то есть увеличится общая площадь земледельческой зоны России, появятся возможности для расширения посевов теплолюбивых сельскохозяйственных культур. В зоне недостаточного увлажнения целесообразно внедрять адаптационные меры, направленные в том числе и на экономное расходование водных ресурсов, путем расширения посевов более засухоустойчивых культур – прежде всего кукурузы, подсолнечника, проса и др. (Ginsburg, Kokorin, 2008; Semenov, 2008).

Просо – теплолюбивое и засухоустойчивое растение. На территории России занимает восьмое место среди посевных площадей и производства важнейших зерновых культур (пшеница, ячмень, кукуруза на зерно, овес, рожь, гречиха, просо, рис, тритикале, сорго) и четвертое место среди производства круп (рис, гречневая крупа, манная крупа, пшено, перловая крупа, овсяная, кукурузная, ячневая крупа) (Industrial production in Russia…, 2021; Russian Statistical Yearbook…, 2022). Выращивают эту культуру в основном в зонах достаточно жаркого и сухого климата, в том числе в Тамбовской области, где средняя урожайность проса достигает 22,6 ц/га. Зерно начинает прорастать при температуре 8–12°C (Yakimenko, 1975; Turusov et al., 2019), тогда как для ранних зерновых культур начальная температура может быть ниже и соответствовать 1–3°C. При температуре 10°C просо прорастает через 8–10 дней, при 15°C – через 4-5 дней, при 20–25°C – через 3 дня. По отношению к высокой температуре просо более устойчиво, чем многие зерновые культуры (пшеница, овес и др.). Даже при температуре воздуха 38–40°C просо способно сохранить в течение двух суток свою регулирующую функцию, особенно во второй половине вегетации – после цветения. При прорастании зерно проса поглощает 25% воды от своего веса, тогда как пшеница – 45%, ячмень – 48%, овес – 65%. Транспирационный коэффициент проса почти в два раза меньше по сравнению с пшеницей, рожью, ячменем и овсом. Размер устьиц проса, через которые испаряется влага, почти в два раза меньше, чем у пшеницы, овса. Поэтому при длительном завядании просо снижает урожай всего на 10%, тогда как овес – до 75% (Yakimenko, 1975).

Взаимодействие температурного режима в период устойчивого перехода температур через 10°C и количества выпавших осадков выражается через гидротермический коэффициент (ГТК).

Цель работы – исследование изменчивости некоторых хозяйственно ценных признаков проса посевного (*Panicum miliaceum* L.) сорта ‘Горлинка’ в условиях изменяющегося климата южной части Восточно-Европейской равнины в многолетнем эксперименте (2001–2019 гг.)

Материал и методы исследования

Исследования были проведены в период 2001–2019 гг. на Екатерининской опытной станции – филиале ВИР (Екатерининская ОС ВИР) (Тамбовская обл., Россия). Объектом исследования служил среднеспелый сорт проса ‘Горлинка’, являющийся единственным стандартом для данного региона.

Екатерининская опытная станция располагается на севере Центральной Черноземной зоны России (в южной части Восточно-Европейской равнины), в пойме реки

Польной Воронеж, в зоне с умеренно континентальным климатом и недостаточным увлажнением, со средней величиной гидротермического коэффициента 0,95–1,10. Средняя температура в январе находится в пределах от –10,8 до –9°С, в июле – от +19 до +20°С. В среднем за год выпадает осадков от 450 до 550 мм. За вегетационный период сумма осадков составляет 50–60% от годовой. Продолжительность периода с температурами выше 10°С колеблется от 141 до 154 дней, сумма температур выше 10°С составляет 2300–2600°С. Почвы – типичные мощные, слабо выщелоченные черноземы, тяжелосуглинистые по механическому составу. Агротехника общепринятая для зоны.

Фенологические наблюдения, оценки и учеты проводили в соответствии с методическими указаниями ВИР (Agafonov, Kurtseva, 1988). Площадь делянки – 1 м^2, повторность 5-кратная. Норма высева семян – 500 шт. Посев выполняли, в зависимости от погодных условий года, от последней декады мая по первую декаду июня. Уборку проводили в фазу полной спелости зерна. Образец оценивали по вегетационному периоду, крупности и продуктивности зерна, высоте растения в соответствии с Международным классификатором СЭВ вида *Panicum miliaceum* L. (Agafonov et al., 1982) по среднему значению признака, полученному за годы изучения. Статистическую обработку данных выполняли с использованием программы Microsoft Excel. Погодные условия оценивали с мая по август, учитывали среднесуточные температуры (t°C), суммы активных температур (Σt > 10°C), суммы осадков (ΣP) и гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова. ГТК рассчитан по формуле:

$$ГТК = \frac{\Sigma_r}{\Sigma_t} 10,$$

где Σr – сумма осадков за период; Σt – сумма температур выше 10°С за тот же период.

Значение ГТК: избыточное увлажнение – > 1,3; обеспеченное увлажнение – 1,0–1,3; засушливая зона – 0,7–1,0; сухое земледелие – 0,5–0,7; ирригация – < 0,5 (Selyaninov, 1966).

Метеоданные за 2001–2019 гг. предоставлены метеорологическим пунктом Екатерининской ОС ВИР.

Результаты и обсуждения

Метеорологические условия в годы проведения исследований характеризовались разнообразием как по объему выпавших осадков и сумме температур, так и по характеру их распространения за весь вегетационный период (рис. 1).

Посев зерна проса производился в наиболее оптимальные для этого сроки. Температура в фазу прорастания была в пределах 13–22°С, кроме 2004 г., когда температура опустилась до 7,8°С.

В период кущения для проса требуется оптимальная температура 15–22°С (Promising resource-saving…, 2010; Turusov et al., 2019), в период выметывания – около 28°С (Turusov et al., 2019). При температуре ниже 18°С выметывание запаздывает на 5–10 дней, что, следовательно, может снижать урожай (Yakimenko, 1975). За все время наблюдения средняя температура выметывания (июнь) была 20°С, что на 2,2°С выше средней многолетней. Во время цветения и созревания благоприятна температура не менее 17–18°С (Turusov et al., 2019), наиболее оптимальна – на уровне 20–23°С (Yakimenko, 1975). В наших исследованиях средняя температура цветения (июль) была 22,6°С (выше средней многолетней на 2,6°С), созревания (август) – 20,2°С (выше средней многолетней на 1,9°С) (см. рис. 1). Достоверное увеличение температуры за период 2001–2019 гг. наблюдалось только в июне (на 4,24°С, p = 0,048), в июле и августе достоверных изменений температуры не было (p = 0,39 и p = 0,81 соответственно). Продолжительность периода «выметывание – созревание» была достоверно связана с температурой мая и июня (r = 0,68, $t_{факт.}$ 3,83 > t_{01} 2,90 и r = 0,66, $t_{факт.}$ 3,67 > t_{01} 2,90 соответственно при 17-ти степенях свободы), у остальных периодов достоверная корреляция с температурой воздуха отсутствовала (табл. 1).

Самыми низкими значениями влагообеспеченности характеризовались 2002, 2010, 2019 г. – 80, 71, 95% соответственно от средней многолетней. В 2002 г. недостаточность влаги ощущалась в июле и августе, в 2010 – с июня по август, в 2019 – в июне и августе. Прочие годы по количеству осадков превышали среднее многолетнее на 8–87% (см. рис. 1, табл. 2). Достоверное изменение осадков в июне, июле и августе (p = 0,26, p = 0,15 и p = 0,66 соответственно), а также значимая корреляция выпавших осадков с периодами вегетации за все годы исследований не наблюдались (см. табл. 1).

Проведенный анализ гидротермического коэффициента в течение всего периода вегетации по месяцам за 2001–2019 гг. выявил колебание значения ГТК от сухого (ГТК = 0,61) до избыточного увлажнения (ГТК = 2,1), среднее значение составило 1,26, что соответствует обеспеченной увлажненности. В 2001–2010 гг. самым засушливым месяцем оказался август (ГТК = 0,9), самым увлажненным – июнь (ГТК = 1,8); май, июль находились в зоне обеспеченного увлажнения. В период 2011–2019 гг. май был самым засушливым (ГТК = 0,97), июнь – август находились в зоне обеспеченного увлажнения. Показатели ГТК по месяцам соответствовали многолетнему значению. Период вегетации был самым засушливым в 2010 г. (ГТК = 0,61), менее засушливым – в 2002 (ГТК = 0,75), 2008 (ГТК = 0,99), 2014 (ГТК = 0,89), 2018 (ГТК = 0,93) и 2019 г. (ГТК = 0,77) (см. рис. 1, табл. 3). Изменение гидротермического коэффициента в июне, июле и августе не было достоверным (p = 0,16, p = 0,42 и p = 0,91).

Просо относится к засухоустойчивым культурам, экономно расходуя воду на протяжении вегетационного периода, начиная с прорастания семян. Так, в засушливом 2010 г. (ГТК = 0,61), когда пострадали многие зерновые культуры на Екатерининской ОС ВИР, просо сорта ‘Горлинка’ сохранилось и дало урожай. Однако просо очень отзывчиво и на увлажнение. Существует мнение, что в критический период развития проса от выметывания до созревания, особенно в первые 20 дней, если выпадет менее 30 мм осадков, то урожай зерна получится ниже среднего (Yakimenko, 1975), что мы и наблюдали в 2010 г., когда в течение всего вегетационного периода, особенно в период созревания, количество осадков было ниже среднего многолетнего на 27%, что привело к снижению урожая (91 г/м^2) по сравнению с другими исследуемыми годами. Например, в 2017 г. продуктивность зерна составила 647 г/м^2 (самый максимальный показатель многолетнего изучения), что оказалось в 7 раз больше, чем в 2010 г. при ГТК = 1,62 и количестве осадков 404 мм (на 58% выше многолетнего показателя). Корреляция между количеством осадков и продуктивностью зерна имела достоверную значимость в межфазный период «всходы – выметывание» (r = 0,58, $t_{факт.}$ 2,93 > t_{01} 2,90 при 17-ти степенях свободы), в остальные периоды данная связь была недостоверной (см. табл. 1).

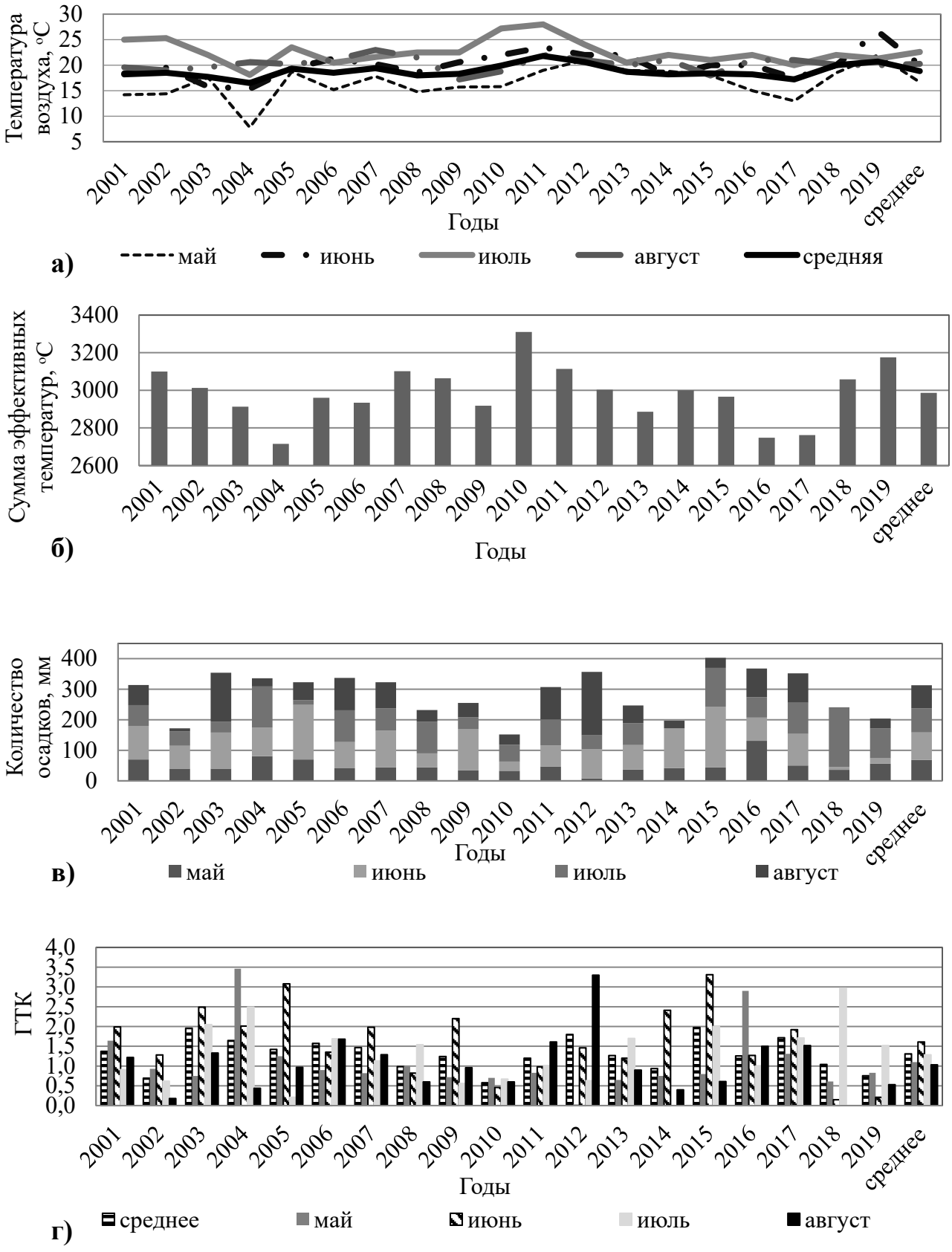


Рис. 1. Изменение режима погоды – температура воздуха (а), сумма эффективных температур (б), количество осадков (в), ГТК (г) – за период 2001–2019 гг. (Тамбовская обл., Россия)

Fig. 1. Changes of weather conditions – air temperature (a), sum of effective temperatures (б), precipitation (в), and hydrothermal coefficient (г) – during the period of 2001–2019 (Tambov Province, Russia)

Таблица 1. Анализ корреляций между хозяйственно ценными признаками проса сорта 'Горлинка' и климатическими условиями на Екатерининской опытной станции – филиале ВИР в 2001–2019 гг. (Тамбовская обл., Россия)

Table 1. Analyzed correlations between useful agronomic characters of millet cv. 'Gorlinka' and climate conditions at Yekaterinino Experiment Station of VIR in 2001–2019 (Tambov Province, Russia)

Параметры	Вегетационный период			Масса 1000 зерен	Продуктивность зерна	Высота растений
	Всходы – выметывание	Выметывание – созревание	Всходы – созревание			
Всходы – выметывание	–	–0,31 ± 0,23	0,67** ± 0,18	0,21 ± 0,24	0,34 ± 0,23	0,12 ± 0,24
Выметывание – созревание	–0,31 ± 0,23	–	0,34 ± 0,23	–0,53* ± 0,21	0,08 ± 0,24	–0,26 ± 0,24
Всходы – созревание	0,67** ± 0,18	0,34 ± 0,23	–	0,36 ± 0,23	0,20 ± 0,24	–0,27 ± 0,24
ГТК:						
май	0,13 ± 0,24	–0,35 ± 0,23	–0,23 ± 0,24	0,16 ± 0,24	–0,04 ± 0,24	0,24 ± 0,24
июнь	0,17 ± 0,24	–0,36 ± 0,23	–0,23 ± 0,24	0,58** ± 0,20	0,59** ± 0,20	0,46* ± 0,21
июль	0,08 ± 0,24	–0,16 ± 0,24	0,25 ± 0,24	–0,37 ± 0,23	–0,17 ± 0,24	0,05 ± 0,24
август	–0,02 ± 0,24	–0,01 ± 0,24	–0,13 ± 0,24	0,15 ± 0,24	–0,04 ± 0,24	0,20 ± 0,24
вегетационный период	0,19 ± 0,24	–0,48 ± 0,23	–0,19 ± 0,24	0,30 ± 0,23	0,21 ± 0,24	0,50* ± 0,21
Осадки:						
май	0,14 ± 0,24	–0,01 ± 0,24	–0,02 ± 0,24	–0,10 ± 0,24	0,03 ± 0,24	0,06 ± 0,24
июнь	0,10 ± 0,24	–0,29 ± 0,23	–0,27 ± 0,24	0,44 ± 0,22	0,58** ± 0,20	0,44 ± 0,22
июль	0,06 ± 0,24	–0,07 ± 0,24	0,22 ± 0,24	–0,38 ± 0,22	–0,21 ± 0,24	0,03 ± 0,24
август	0,04 ± 0,24	–0,04 ± 0,24	–0,01 ± 0,24	0,31 ± 0,23	–0,12 ± 0,24	0,12 ± 0,24
вегетационный период	–0,06 ± 0,24	–0,15 ± 0,24	–0,16 ± 0,24	0,28 ± 0,24	0,35 ± 0,23	0,31 ± 0,23
Температура:						
май	–0,28 ± 0,23	0,68** ± 0,17	–0,28 ± 0,23	–0,37 ± 0,23	–0,14 ± 0,24	–0,29 ± 0,23
июнь	–0,44 ± 0,22	0,66** ± 0,18	–0,01 ± 0,24	–0,47* ± 0,21	–0,3 ± 0,24	–0,33 ± 0,23
июль	–0,05 ± 0,24	0,13 ± 0,24	–0,01 ± 0,24	0,19 ± 0,24	–0,07 ± 0,24	–0,34 ± 0,23
август	–0,07 ± 0,24	0,23 ± 0,24	0,05 ± 0,24	0,05 ± 0,24	0,07 ± 0,24	–0,05 ± 0,24
среднее	–0,34 ± 0,23	0,53* ± 0,21	0,12 ± 0,24	–0,22 ± 0,24	–0,29 ± 0,24	–0,43 ± 0,22
Масса 1000 зерен	0,21 ± 0,24	–0,53* ± 0,21	–0,36 ± 0,23	–	0,39 ± 0,23	0,20 ± 0,24
Продуктивность зерна	0,34 ± 0,23	0,08 ± 0,24	0,20 ± 0,24	0,39 ± 0,23	–	0,37 ± 0,23
Высота растений	0,12 ± 0,24	–0,26 ± 0,24	–0,27 ± 0,24	0,20 ± 0,24	0,37 ± 0,23	–

Примечание: * – значимо на 5-процентном уровне; ** – значимо на 1-процентном уровне; число наблюдений – 17

Note: * – statistically significant at the 5% level; ** – statistically significant at the 1% level; number of observations: 17

Таблица 2. Метеорологический обзор периода вегетации проса (2001–2019 гг., Тамбовская обл., Россия)
Table 2. Meteorological overview of the millet growing season (2001–2019, Tambov Province, Russia)

Месяцы	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Многолетнее
Среднесуточная температура воздуха, °С																				
Май	14,2 (102)	14,4 (104)	17,6 (127)	7,8 (56)	18,7 (135)	15,2 (109)	17,8 (128)	14,8 (107)	15,7 (113)	15,8 (114)	19 (137)	21 (151)	19 (137)	18,8 (135)	18 (130)	15 (108)	13 (94)	18,5 (133)	22 (158)	13,9
Июнь	18,4 (103)	19,5 (110)	15,8 (89)	15,4 (87)	19,4 (109)	21,3 (120)	20,2 (114)	18,6 (105)	20,6 (116)	22 (124)	23,5 (132)	22 (124)	22 (124)	18 (101)	20 (112)	20 (112)	17,5 (98)	20 (112)	26,6 (149)	17,8
Июль	25 (125)	25,3 (127)	22 (110)	18,1 (91)	23,5 (118)	20,5 (103)	21,6 (108)	22,5 (113)	22,5 (113)	27,2 (138)	28 (140)	24 (120)	20,5 (103)	22 (110)	21 (105)	22 (110)	20 (0)	22 (110)	21,3 (107)	20
Август	19,6 (107)	19 (104)	19,6 (107)	20,6 (113)	20,2 (110)	21 (115)	23 (126)	21,5 (118)	17,2 (94)	18,8 (103)	22 (120)	21 (115)	20 (109)	21 (115)	18 (98)	21 (115)	21 (115)	20,1 (110)	20 (109)	18,3
Среднее	19,3 (109)	19,6 (111)	18,8 (108)	15,5 (87)	20,5 (118)	19,5 (112)	20,7 (119)	19,4 (111)	19,0 (120)	21,0 (120)	23,1 (132)	22,0 (128)	20,4 (118)	20,0 (115)	19,3 (111)	19,5 (111)	17,9 (77)	20,2 (116)	22,5 (131)	19,9
Сумма	77,2 (109)	78,2 (111)	75 (108)	61,9 (87)	81,8 (118)	78 (112)	82,6 (119)	77,4 (111)	76 (120)	83,8 (120)	92,5 (132)	88 (282)	81,5 (118)	79,8 (115)	77 (111)	78 (111)	71,5 (77)	80,6 (116)	89,9 (131)	79,5
Сумма осадков за месяц, мм																				
Май	70 (163)	40 (93)	40 (93)	81 (188)	70 (163)	41 (95)	44 (102)	44 (102)	34 (79)	33 (77)	47 (109)	8 (19)	37 (86)	42 (98)	44 (102)	131 (305)	50 (116)	36 (84)	56 (130)	43
Июнь	110 (193)	75 (132)	118 (207)	93 (163)	179 (314)	86 (151)	120 (211)	46 (80)	136 (239)	30 (53)	69 (121)	96 (168)	80 (140)	130 (228)	199 (349)	76 (133)	104 (183)	9 (16)	18 (32)	57
Июль	68 (108)	47 (75)	36 (57)	135 (214)	15 (24)	104 (165)	73 (116)	104 (75)	38 (60)	55 (87)	85 (135)	45 (71)	72 (114)	0 (0)	127 (202)	67 (106)	102 (162)	196 (311)	98 (156)	63
Август	66 (127)	10 (19)	160 (308)	27 (52)	59 (114)	106 (204)	86 (165)	38 (73)	47 (90)	34 (65)	106 (204)	208 (400)	58 (112)	25 (48)	33 (64)	94 (181)	96 (185)	0 (0)	32 (62)	52
Сумма	314 (146)	172 (80)	354 (164)	336 (156)	323 (150)	337 (157)	323 (150)	232 (108)	255 (119)	152 (71)	307 (143)	357 (166)	247 (115)	368 (171)	401 (187)	368 (171)	352 (164)	241 (112)	204 (95)	215

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Месяцы	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Многолетнее
Гидротермический коэффициент																				
Май	1,64 (151)	0,93 (85)	0,76 (70)	3,46 (317)	1,25 (115)	0,9 (83)	0,82 (75)	0,99 (91)	0,72 (66)	0,7 (64)	0,83 (76)	0,03 (3)	0,65 (60)	0,75 (71)	0,8 (73)	2,9 (266)	1,31 (120)	0,61 (56)	0,83 (76)	1,09
Июнь	1,99 (128)	1,28 (83)	2,49 (161)	2,01 (130)	3,08 (199)	1,35 (87)	1,98 (128)	0,82 (53)	2,2 (142)	0,46 (30)	0,98 (63)	1,46 (94)	1,21 (78)	2,41 (156)	3,31 (214)	1,27 (82)	1,92 (124)	0,15 (10)	0,21 (14)	1,55
Июль	0,91 (72)	0,62 (49)	2,05 (163)	2,49 (198)	0,21 (17)	1,69 (134)	1,13 (90)	1,54 (122)	0,56 (44)	0,67 (53)	1,01 (80)	0,63 (50)	1,71 (136)	0 (0)	2,0 (159)	1,0 (79)	1,71 (136)	2,97 (236)	1,52 (121)	1,26
Август	1,22 (104)	0,18 (15)	1,33 (114)	0,44 (38)	0,97 (83)	1,68 (144)	1,29 (110)	0,6 (55)	0,91 (78)	0,6 (51)	1,61 (138)	3,3 (282)	0,97 (83)	0,4 (34)	0,61 (52)	1,5 (128)	1,52 (130)	0 (0)	0,53 (45)	1,17
Среднее	1,44 (114)	0,75 (60)	1,66 (132)	2,1 (167)	1,38 (110)	1,4 (111)	1,3 (103)	0,99 (79)	1,1 (87)	0,61 (48)	1,1 (87)	1,36 (108)	1,13 (90)	0,89 (71)	1,68 (133)	1,67 (133)	1,62 (129)	0,93 (74)	0,77 (61)	1,26

Примечание: в скобках – процент к стандарту
Note: parenthesized are the percentages relative to the reference

Таблица 3. Данные многолетнего (2001–2019 гг.) изучения проса сорта 'Горлинка' (Тамбовская обл., Россия)

Table 3. Data of the long-term (2001–2019) study on millet cv. 'Gorlinka' (Tambov Province, Russia)

Месяцы	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Среднее
Всходы – выметывание, дни	45	40	49	43	52	45	34	56	47	42	42	42	33	43	43	45	54	47	40	44,3
Выметывание – созревание», дни	30	31	29	21	30	31	32	28	28	29	38	30	36	38	30	34	34	33	45	32,0
Всходы – созревание», дни	73	72	87	63	80	76	65	84	75	70	80	72	69	81	73	79	88	95	84	77,2
Продуктивность, г/м^2	380	450	410	250	440	320	450	480	500	91	538	202	261	524	601	332	647	209	250	386
Высота растений, см	98	95	95	125	95	80	100	111	100	100	93	122	108	108	140	108	138	77	90	104
Масса 1000 зерен, г	8	9	8,6	9	9,5	8	8	8	8	8	9	8	7	8	8	7	8	6	6	8,0
Σt > 10ºC	3100	3013	2913	2715	2960	2934	3102	3064	2918	3310	3114	3003	2886	3000	2966	2748	2762	3058	3175	2986
Σ осадков, мм	314	172	354	336	323	337	323	232	255	152	307	357	247	368	401	368	352	241	204	215
ГТК	1,44	0,75	1,66	2,1	1,38	1,4	1,3	0,99	1,1	0,61	1,1	1,36	1,13	0,89	1,68	1,67	1,62	0,93	0,77	1,26

В течение последних двадцати лет в России наблюдается тенденция увеличения суммы активных (свыше 10°С) температур, необходимых просу для развития. Сумма активных температур, требуемая для формирования урожая зерна, у среднеспелых сортов проса составляет свыше 1800°С, у позднеспелых – свыше 2000°С (Promising resource-saving…, 2010; Antimonova, Syrkina, 2020). В 2001–2019 гг. сумма температур, фактически накапливаемых сортом 'Горлинка', составила в среднем 2971°С (на 281°С больше средней многолетней): в самый холодный год (2016) – 2748°С, в самый жаркий (2010) – 3310°С, что выше суммы эффективных температур, необходимой для роста и развития растений, на 948° и 1510° соответственно (см. рис. 1).

В среднем продолжительность вегетационного периода сорта 'Горлинка' за 19 лет исследования составляла 77,2 дня при среднем ГТК = 1,26. Наименьшая продолжительность периода (63 дня) наблюдалась в 2004 г., при сумме активных температур 2715 (ГТК = 2,1), максимальная – в 2017 г. (88 дней) (ГТК = 1,62) и 2018 г. (95 дней) (ГТК = 0,93), при сумме активных температур 2762 и 058°С соответственно. Среднесуточная температура вегетационного периода в 2017 г. равнялась 17,9°С (ГТК = 1,62), в 2007 – 20,7°С (ГТК = 1,3), в 2018 – 20,2°С (ГТК = 1,03). В 2001–2019 гг. продолжительность вегетационного периода в среднем увеличилась на 12,1 дней (p = 0,062) (рис. 2), при этом ГТК уменьшился на 0,15 (p = 0,561). Продолжительность периода «выметывание – созревание» достоверно (p = 0,004) увеличилась на 6,8 дней, изменение периода «всходы – выметывание» незначимо (p = 0,9). Связь между продолжительностью периодов «всходы – созревание» и «всходы – выметывание» была наибольшей (r = 0,67 ± 0,18, $t_{факт}$. 3,75 > t_{01} 2,9 при 17-ти степенях свободы). Достоверное влияние ГТК на продолжительность фаз периода вегетации не наблюдалось (см. табл. 1). По данным регрессионного анализа, коэффициент регрессии (b = –4,0467) имеет незначимую (p = 0,43) отрицательную связь продолжительности вегетационного периода с гидротермическим коэффициентом этого периода. Имеется тенденция, что при увеличении ГТК (май – август) на одну единицу продолжительность вегетационного периода уменьшится на 4,1 дня (R^2 = 0,0364) (рис. 3).

Высота растения за 2001–2019 гг. изучения в среднем составляла 104 см при минимальном значении 77 см в 2018 г., когда влажный теплый июль (t = 22°С, 196 мм осадков, ГТК = 2,97) сменился сухим августом (20,1°С, осадков не было, ГТК = 0), и максимальном значении 140 см в 2015 г., когда теплый влажный июнь и июль (20°С, 199 мм, ГТК = 3,31 и 21°С, 127 мм, ГТК = 2,0 соответственно) сменились более прохладным сухим августом (t = 18°С, осадки = 33 мм, ГТК = 0,61). Высота растений за весь период наблюдений недостоверно (p = 0,39) увеличилась на 11,97 см (см. рис. 2). Влияние ГТК июня на высоту растения было достоверно положительным – r = 0,46 ± 0,21, $t_{факт}$. 2,19 > t_{05} 2,11 при 17-ти степенях свободы (см. табл. 1). Коэффициент регрессии (b = 22,137) показал значимую (p = 0,03) положительную связь высоты растения с ГТК вегетационного периода. Наблюдается тенденция, что увеличение ГТК всего периода вегетации на одну единицу в среднем приведет к увеличению высоты растения на 22,1 см (R^2 = 0,25) (см. рис. 3).

Продуктивность зерна за 19 лет изучения в среднем составила 393,6 г/м^2. Минимальное значение (91 г/м^2) отмечалось в 2010 г., когда наблюдалась значительная засуха (ГТК = 0,61), максимальная (647 г/м^2) – в 2017 г., в котором зафиксировано вполне достаточное увлажнение (ГТК = 1,62) (см. табл. 2, 3). Период 2011–2019 гг. в среднем оказался на 19 г/м^2 более продуктивным (396 г/м^2), чем 2001–2010 гг. (377,1 г/м^2). В 2001–2019 гг. продуктивность зерна, по данным линии тренда, недостоверно (p = 0,91) уменьшилась на 13,7 г (см. рис. 2).

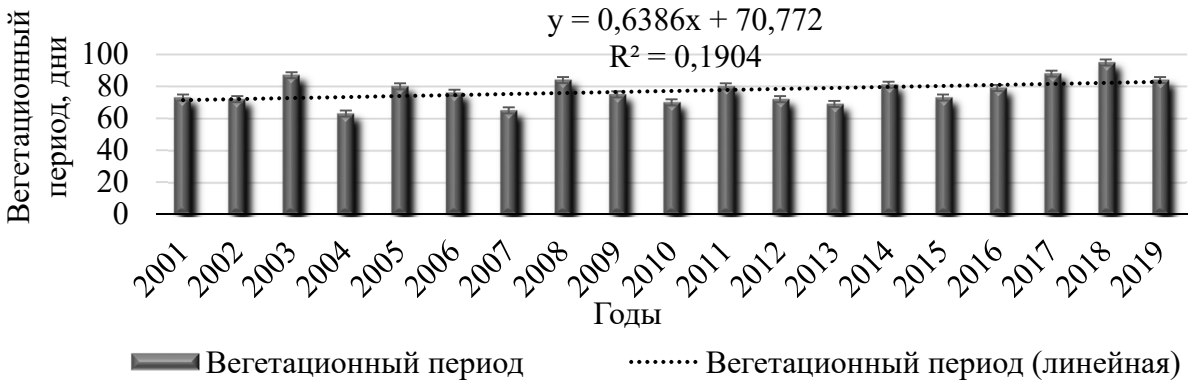
Наибольшее воздействие на урожайность проса оказывают гидротермические условия июня (Chekmarev, Zeleneva, 2016). В нашем исследовании на продуктивность сорта достоверно сильное влияние оказали июньские осадки и ГТК июня (период «всходы – выметывание») – r = 0,58 ± 0,21 и 0,59 ± 0,20, $t_{факт}$. 2,93 > t_{01} 2,90 и $t_{факт}$. 3,01 > t_{01} 2,90 соответственно при 17-ти степенях свободы (см. табл. 1). Продуктивность имела слабую зависимость от продолжительности фаз вегетационного периода (см. табл. 1 и рис. 3). Регрессионный анализ показал незначимую (p = 0,39) зависимость продуктивности зерна от ГТК (май – август), где коэффициент регрессии (b = 80,618) имеет положительную связь. Наблюдается тенденция, что увеличение ГТК всего периода вегетации на одну единицу приведет к увеличению продуктивности зерна в среднем на 81 г/м^2 (R^2 = 0,04) (см. рис. 3).

За 19 лет изучения среднее значение массы 1000 зерен составило 7,9 г. Минимальное значение (6 г) отмечалось в 2018 и 2019 г., когда в августе 2018 г. наблюдалось полное отсутствие осадков, а в 2019 г. осадки были скудными (32 мм, ГТК = 0,53). Максимальная масса (9 г) проявилась в 2002–2005 и 2011 г. Погодные условия в августе были разнообразными – от сильной засухи до избыточного увлажнения, за всю вегетацию – от умеренной засухи до вполне достаточного увлажнения (см. рис. 1). ГТК оказал достоверно большее влияние на крупность зерна в июне (период «всходы – выметывание») – r = 0,58 ± 0,20 ($t_{факт.}$ 2,93 > t_{01} 2,90 при 17-ти степенях свободы). Количество выпавших осадков достоверное влияние на массу 1000 зерен не оказало. Температура достоверно отрицательно (r = –0,47, $t_{факт}$. 2,2 > t_{05} 2,11 при 17-ти степенях свободы) влияла на крупность зерна в июне (см. табл. 1). Период «всходы – созревание» и крупность зерна имели достоверную сильную отрицательную связь (r = –0,53 ± 0,21, $t_{факт}$. 2,58 > t_{05} 2,11 при 17-ти степенях свободы). За весь период наблюдений масса 1000 зерен достоверно (p = 0,0005) снизилась на 2,2 г (см. рис. 2). Коэффициент регрессии (b = 0,7144) показал незначимую (p = 0,21) прямую связь крупности зерна от ГТК всего периода вегетации. Наблюдается тенденция, что при росте гидротермического коэффициента на единицу увеличивается крупность зерна на 0,7 г (R^2 = 0,089) (см. рис. 3).

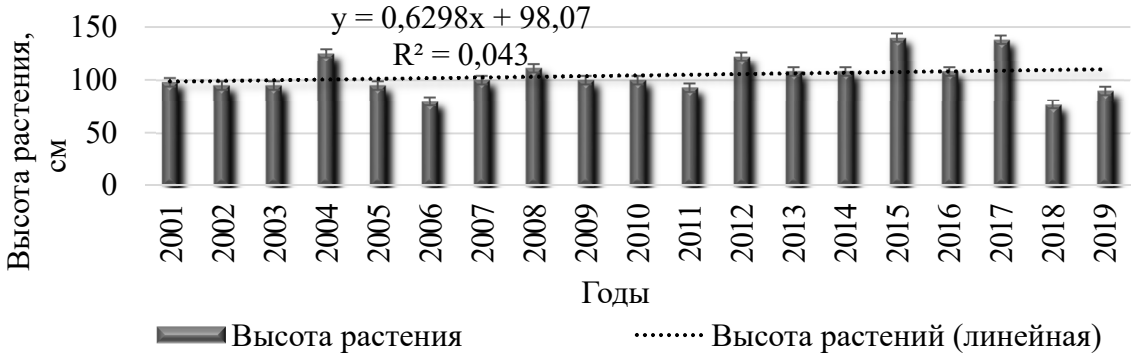
Заключение

Изучение проса сорта 'Горлинка' с 2001 по 2019 г. в условиях Тамбовской области показало, что при росте температур июня (период выметывания) на 4,24°С при p = 0,048 достоверно увеличивалось продолжительность межфазного периода «выметывание – созревание» на 6,8 дней при p = 0,004 и наблюдалась тенденция увеличения продолжительности всего периода вегетации на 12,1 дней при p = 0,062, а также достоверное уменьшение крупности зерна на 2,2 г при p = 0,001. Прослеживалось недостоверное сокращение продолжительности межфазного периода «всходы – выметывание», уменьшение продуктивности зерна и увеличение высоты растения (p = 0,912, p = 0,394 и p = 0,832 соответственно).

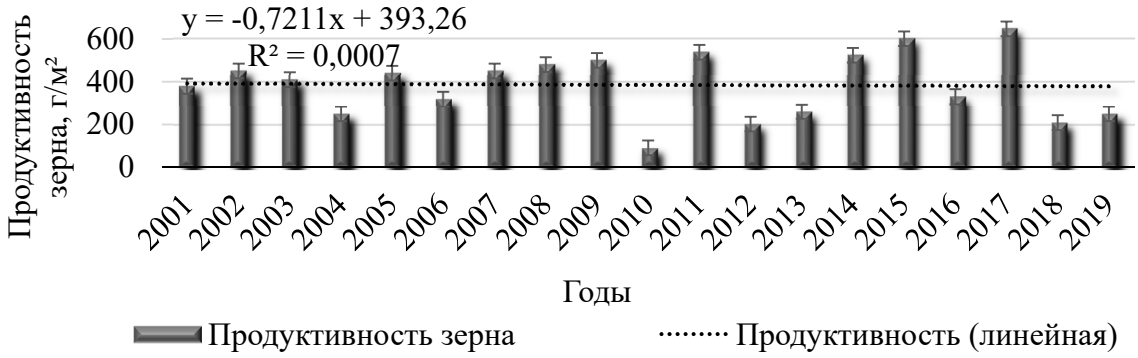
Рассмотрение двух режимов, водного и температурного, выраженных через ГТК, показало, что 2001–2019 гг.



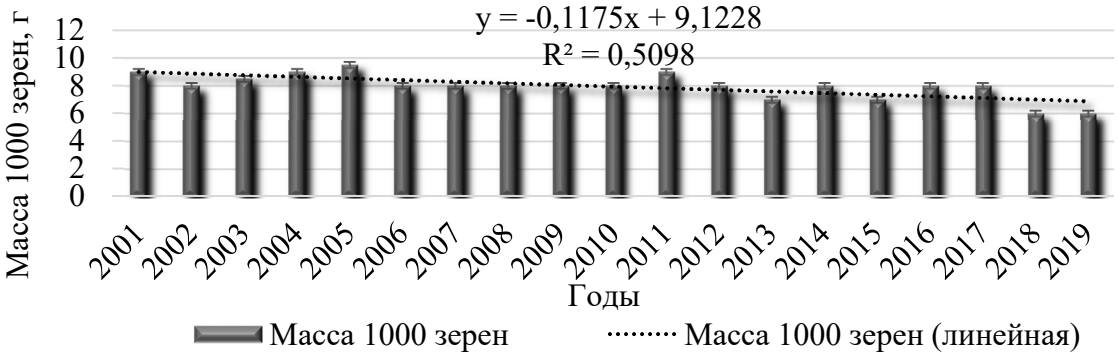
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Динамика продолжительности периода вегетации (а) и значений хозяйственно ценных признаков проса сорта 'Горлинка': высота растений (б), продуктивность (в), масса 1000 зерен (г) (2001–2019 гг., Тамбовская обл., Россия)

Fig. 2. Dynamics of the growing season duration (a), and the values of useful agronomic characters – plant height (б), grain yield (в), and 1000 grain weight (г) – of millet cv. 'Gorlinka' (2001–2019, Tambov Province, Russia)

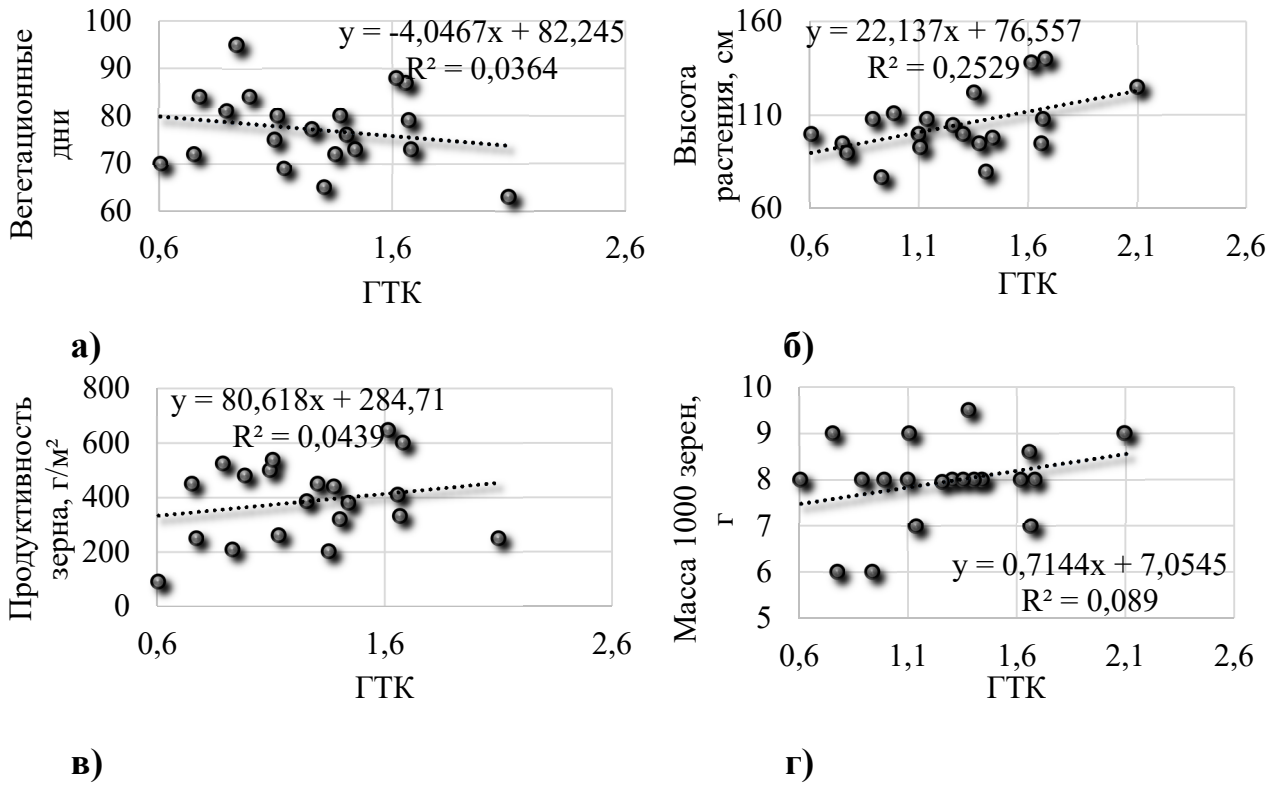


Рис. 3. Зависимость вегетационного периода (а), высоты растения (б), продуктивности зерна (в) и массы 1000 зерен (г) проса сорта 'Горлинка' от ГТК (май – август) (2001–2019 гг., Тамбовская обл., Россия)

Fig. 3. Dependence of the growing season (a), plant height (б), grain yield (в), and 1000 grain weight (г) of millet cv. 'Gorlinka' on the hydrothermal coefficient (May – August) (2001–2019, Tambov Province, Russia)

характеризовались средним значением коэффициента – 1,26 (обеспеченное увлажнение). Достоверная зависимость прослеживалась между ГТК июня и продуктивностью зерна (r = 0,58 при p = 0,01), массой 1000 зерен (r = 0,58 при p = 0,01), высотой растения (r = 0,46 при p = 0,05).

Изменение климата в южной части Восточно-Европейской равнины (Тамбовская обл.) с 2001 по 2019 г. в сторону потепления в июне на фоне достаточного увлажнения (ГТК = 1,26) не оказало достоверного влияния на продолжительность периода вегетации и продуктивность зерна районированного сорта проса 'Горлинка'.

References / Литература

A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2016. Moscow: Roshydromet; 2017. [in Russian] (Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. Москва: Росгидромет; 2017). URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/Доклад2016.pdf [дата обращения: 12.07.2022].

A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2019 Moscow: Roshydromet; 2020. [in Russian] (Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2019 год. Москва: Росгидромет; 2020). URL: https://meteoinfo.ru/images/news/2020/03/12/o-klimate-rf-2019.pdf [дата обращения: 06.07.2022].

A report on climate risks on the territory of the Russian Federation (Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii). St. Petersburg: Roshydromet; 2017. [in Russian] (Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург: Росгидромет; 2017). URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2017/riski.pdf [дата обращения: 12.07.2022].

Agafonov N.P., Kurtseva A.F. The study of the global millet collection (guidelines) (Izucheniye mirovoy kollektsii prosa [metodicheskiye ukazaniya]). Leningrad: VIR; 1988. [in Russian] (Агафонов Н.П., Курцева А.Ф. Изучение мировой коллекции проса: (методические указания). Ленинград: ВИР; 1988).

Agafonov N.P., Kurtseva A.F., Korneichuk V.A., Banyai L. Broad unified COMECON list of descriptors and international COMECON list of descriptors for sp. *Panicum miliaceum* L. (Shirokiy unifitsirovanny klassifikator SEV i mezhdunarodny klassifikator SEV vida *Panicum miliaceum* L.). Leningrad: VIR; 1982. [in Russian] (Агафонов Н.П., Курцева А.Ф., Корнейчук В.А., Баняи Л. Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ вида *Panicum miliaceum* L. Ленинград: ВИР; 1982).

Antimonova O.N, Syrkina L.F. The formation of crop yield of millet varieties depending on hydrothermal conditions. *The Bulletin of KrasGAU*. 2020;(10):74-82. [in Russian] (Антимонова О.Н., Сыркина Л.Ф. Формирование урожайности сортов проса посевного в зависимости от гидротермических условий. *Вестник КрасГАУ*. 2020;(10):74-82). DOI: 10.36718/1819-4036-2020-10-74-82

Chekmarev V.V., Zeleneva Y.V. The dependence of the yield of millet on the weather factors in the conditions of the Tambov Province. *Tambov University Reports. Series: Natural*

and Technical Sciences SU. 2016;21(2):603-605. [in Russian] (Чекмарев В.В., Зеленева Ю.В. Зависимость урожайности проса от факторов погоды в условиях Тамбовской области. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016;21(2):603-605). DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-2-603-605

Easterling W.E., Aggarwal P.K., Batima P., Brander K.M., Erda L., Howden S.M. et al. Food, fibre and forest products. In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson (eds). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press; 2007. p.273–313.

Ginsburg A.S., Kokorin A.O. Causes and forecasts of climate change (Prichiny i prognozy izmeneniya klimata). In: I.E. Chestin, N. Colloff (eds). *Russia and Neighboring Countries: Environmental, Economic and Social Consequences of Climate Change (Rossiya i sopredelnye strany: prirodookhrannye, ekonomicheskiye i sotsialnye posledstviya izmeneniya klimata)*. Moscow: WWF of Russia; Oxfam; 2008. p.5-12. [in Russian] (Гинзбург А.С., Кокорин А.О. Причины и прогнозы изменения климата. В кн.: *Россия и сопредельные страны: природоохранные, экономические и социальные последствия изменения климата* / под ред. И.Е. Честина, Н. Коллоффа. Москва: WWF России; Oxfam; 2008. С.5-12). URL: https://wwf.ru/upload/iblock/702/oxfam_rus_end_2.pdf [дата обращения: 06.07.2022].

Government of the Russian Federation. Directive of December 25, 2019, No. 3183-r (Pravitelstvo Rossiyskoy Federatsii. Rasporyazheniye ot 25 dekabrya 2019 g. N 3183-r). Moscow; 2019. [in Russian] (Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 25 декабря 2019 г. № 3183-р. Москва; 2019). URL: http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf [дата обращения: 30.06.2022].

Industrial production in Russia. 2021: Statistical handbook (Promyshlennoye proizvodstvo v Rossii. 2021: Statisticheskiy sbornik). Moscow: Rosstat; 2021. [in Russian] (Промышленное производство в России. 2021: Статистический сборник. Москва: Росстат; 2021). URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prom_proiz-vo_2021.pdf [дата обращения: 05.07.2022].

Promising resource-saving technology of millet production. Guidelines (Perspektivnaya resursosberegayushchaya tekhnologiya proizvodstva prosa. Metodicheskiye rekomendatsii). Moscow: Rosinformagrotech; 2010. [in Russian] (Перспективная ресурсосберегающая технология производства проса. Методические рекомендации. Москва: Росинформагротех; 2010). URL: https://rosinformagrotech.ru/data/itpk/zernovye-kultury-i-kukuruza/send/17-zernovye-kultury-i-kukuruza/460-perspektivnaya-resursosberegayushchaya-tekhnologiya-proizvodstva-prosa [дата обращения: 05.07.2022].

Risks and benefits for the Russian Federation from global climate change (Riski i vygody dlya Rossiyskoy Federatsii ot globalnogo izmeneniya klimata). Moscow: Roshydromet; 2014. [in Russian] (Риски и выгоды для Российской Федерации от глобального изменения климата. Москва: Росгидромет; 2014). URL: https://meteoinfo.ru/novosti/10150-24112014- [дата обращения: 06.07.2022].

Russian Statistical Yearbook 2022: Statistical handbook. Moscow: Rosstat; 2022. [in Russian] (Российский статистический ежегодник. 2022: Статистический сборник. Москва: Росстат; 2022). URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ejegodnik_2022.pdf [дата обращения: 06.07.2022].

Selyaninov G.T. Agro-climatic map of the world (Agroklimaticheskaya karta mira). Leningrad: Gidrometeoizdat; 1966. [in Russian] (Селянинов Г.Т. Агроклиматическая карта мира. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1966).

Semenov S.M. (ed.). Assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Vol. II. Consequences of climate change (Otsenochny doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. T. II. Posledstviya izmeneniya klimata). Moscow: Roshydromet; 2008. [in Russian] (Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Последствия изменения климата / под. ред. С.М. Семенова. Москва: Росгидромет; 2008). URL: http://climate2008.igce.ru/v2008/htm/2.htm [дата обращения: 05.07.2022].

Sidorenko V.S., Bobkov S.V., Kotlyar A.I., Gurinovich S.O., Starikova Z.V. Millet area in Russia. *Zemledelie = Crop Farming*. 2012;(5):9-12. [in Russian] (Сидоренко В.С., Бобков С.В., Котляр А.И., Гуринович С.О., Старикова Ж.В. Ареал проса посевного в России. *Земледелие*. 2012;(5):9-12).

The Global Risks Report 2017. 12th ed. Geneva: World Economic Forum; 2017. Available from: https://www3.weforum.org/docs/GRR17_Report_web.pdf [accessed July 05, 2022].

Turusov V.I., Novichikhin A.M., Surkov A.Yu., Surkova I.V. Technology of millet cultivation in Voronezh Province (Tekhnologiya vozdelyvaniya prosa v Voronezhskoy oblasti). Kamennaya Step; 2019. [in Russian] (Турусов В.И., Новичихин А.М., Сурков А.Ю., Суркова И.В. Технология возделывания проса в Воронежской области. Каменная Степь; 2019). URL: https://niidokuchaeva.ru/wp-content/uploads/2019/01/Технология-возделывания-проса-2018.pdf [дата обращения: 06.07.2022].

World Agricultural Production. Global Market Analysis. Washington DC: USDA Foreign Agricultural Service; 2023. Available from: https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf [accessed July 06, 2022].

World Food and Agriculture. Statistical Pocketbook 2018. Rome: FAO of the United Nations; 2018. Available from: https://www.fao.org/3/CA1796EN/ca1796en.pdf [accessed July 05, 2022].

Yakimenko A.F. Millet (Proso). Moscow: Rosselkhozizdat; 1975. [in Russian] (Якименко А.Ф. Просо. Москва: Россельхозиздат; 1975).

Информация об авторе

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, kkku@ya.ru, https://orcid.org/0000-0002-5069-7390

Information about the author

Tatiana V. Kulemina, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kkku@ya.ru, https://orcid.org/0000-0002-5069-7390

Статья поступила в редакцию 16.09.2022; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 16.09.2022; approved after reviewing on 12.10.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
UDC 633.16:581.192
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-45-52

CC BY

Weight method for determination of soluble β-glucans in barley grain

Vitaliy S. Popov, Alexey V. Konarev, Olga N. Kovaleva, Nina G. Konkova, 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. Barley (*Hordeum vulgare* L.) is an important source of nutrients, such as starch, protein, and various dietary fibers. β-Glucans are soluble fibers found in high amounts in oat and barley grain, so they are becoming increasingly interesting due to their numerous functional and bioactive properties. The increased interest in β-glucans as a dietary supplement and a functional component of food calls for a convenient, inexpensive and affordable method for quantitative determination of these compounds.
Materials and methods. An overview is given on the existing techniques for determining and isolating β-glucans in cereals: IR spectroscopy, enzymatic, colorimetric, and alkaline-enzymatic methods. Their advantages and disadvantages are shown. The disadvantages of the methods considered include high costs of reagents and equipment, duration of performance, and labor intensity.
Results. This study promotes the weight method for isolation and quantitative determination of β-glucans in the grain of covered and naked barley. It is based on the modified alkaline method adapted to barley; we developed it earlier for oat grain. The amount of β-glucans in the grain of the studied barley accessions ranged from 4.12±0.23% to 5.34 ± 0.31% for naked cultivars, and from 3.57 ± 0.18% to 4.29 ± 0.32% for covered ones.
Conclusion. Based on the conducted research, optimal conditions for the isolation and quantitative determination of β-glucans from barley grain were selected: centrifugation modes, temperature and extraction ratio, concentration of compounds, precipitation and drying procedures. The main advantage of the described method is its accessibility and practical applicability when conducting mass analysis, including studying a collection of cereal crops.

Keywords: β-glucans, *Hordeum vulgare* L., nonstarch polysaccharides, naked barley, covered barley, alkaline method

Acknowledgments: the study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2020-911 dated November 16, 2020, on providing a grant in the form of subsidies from the Federal Budget of the Russian Federation. The grant was provided as governmental support for the establishment and development of the World-Class Scientific Center "Agrotechnologies for the Future".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: 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

© Popov V.S., Konarev A.V., Kovaleva O.N., Konkova N.G., Khoreva V.I., 2023

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-45-52

Весовой метод определения растворимых β-глюканов в зерне ячменя

В. С. Попов, А. В. Конарев, О. Н. Ковалева, Н. Г. Конькова, 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. Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) является важным источником питательных веществ, таких как крахмал, белок и различные пищевые волокна. β-Глюканы представляют собой растворимые волокна, в большом количестве присутствующие в зерновках овса и ячменя; они вызывают все больший интерес благодаря своим функциональным и биологически активным свойствам. В связи с повышенным интересом к β-глюканам как к биологически активной добавке и функциональному компоненту пищи существует потребность в удобном, недорогом и доступном методе количественного определения данных веществ.
Материалы и методы. В статье приводится обзор существующих методов определения и способов выделения β-глюканов из зерновых культур: ИК-спектроскопия, ферментативный, колориметрический, щелочно-ферментативный. Показаны их достоинства и недостатки. Среди недостатков рассмотренных методов необходимо отметить высокую стоимость реактивов и оборудования, длительность выполнения, трудоемкость.
Результаты. В данном исследовании приводится разработка весового метода для выделения и количественного определения β-глюканов в зерне пленчатого и голозерного ячменя. За основу взят модифицированный и адаптированный для ячменя щелочной метод, разработанный нами ранее для овсяного зерна. Количество β-глюканов в зерне исследованных образцов ячменя составило от 4,12 ± 0,23% до 5,34 ± 0,31% для голозерных сортов и от 3,57 ± 0,18% до 4,29 ± 0,32 % для пленчатых.
Заключение. На основе проведенного исследования подобраны оптимальные условия выделения и количественного определения β-глюканов в зерне ячменя: установлены режимы центрифугирования, температура и соотношение экстрагирующих веществ, их концентрация, порядок осаждения и сушки. Основным преимуществом описанного метода является его доступность и практичность при проведении массового анализа, в том числе при изучении коллекции зерновых культур.

Ключевые слова: β-глюканы, *Hordeum vulgare* L., некрахмальные полисахариды, голозерный ячмень, пленчатый ячмень, щелочной метод

Благодарности: статья подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в соответствии с соглашением № 075-15-2020-911 от 16.11.2020 о предоставлении гранта в виде субсидий из федерального бюджета РФ. Грант предоставлен для государственной поддержки создания и развития Научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Попов В.С., Конарев А.В., Ковалева О.Н., Конькова Н.Г., Хорева В.И. Весовой метод определения растворимых β-глюканов в зерне ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):45-52. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-45-52

Introduction

Barley (*Hordeum vulgare* L.) is considered a valuable food, fodder, and industrial crop. In recent years, this cereal has been recognized as a rich source of various functional ingredients due to its high content of fiber, minerals, and antioxidants, and its ability to have a beneficial effect on consumer health and reduce the risk of various diseases (Shewry et al., 2009).

There are opportunities to expand the application range of barley grain through the development of cultivars with new grain characteristics for the processing industry. It is possible due to the donors and genetic sources, indirect and direct methods for evaluating grain material for the breeding of barley cultivars with the following properties: high protein content (Kovaleva et al., 2017); low gluten content (the first highly productive cultivars have been obtained, which would diversify the diet of patients with celiac disease); high activity of phytinases or low phytin content; a high level of anthocyanidins (for example, with purple grain color); decreased or increased content of *β*-glucans (Konarev et al., 2019).

Beta-glucans ([1,3;1,4]-*β*-D-glucans) belong to the class of indigestible polysaccharides contained in cereals, yeast, bacteria, algae and fungi (Wood, Beer, 1998). The beneficial role of *β*-glucans in insulin resistance, hypertension, obesity, and dyslipidemia has been proven (Wood, 2010; Regand et al, 2011). The ability of *β*-glucans to form highly viscous solutions in the intestine is the basis of their health benefits. These compounds contribute to the nutrition and growth of intestinal bacteria that synthesize vitamins, enzymes, and other compounds. The physiological effects of *β*-glucans are mainly explained by their physicochemical and structural characteristics (Bechtel et al., 2009; Regand et al., 2011; Chang et al., 2013; Harland, 2014; Krasilnikov et al., 2014).

Along with other insoluble dietary fibers (lignin, fiber, hemicelluloses, etc.), insoluble *β*-glucans are not exposed to digestive enzymes, and therefore they are not broken down and are not absorbed by the body (Dikeman, Fahey, 2006). A research study (Gajdošová et al., 2007) showed that the content of soluble (the most valuable) glucans decreased in the following order: barley (3.75–7.96% DW) > naked oats (3.91–7.47%) > covered oats (1.97–4.09%), while the content of insoluble glucans in covered oat forms (33.73 – 13.79%) > barley (10.89 – 21.70%) > naked oats (5.15 – 10.80%).

Cereals are a valuable source of glucans and thus they can satisfy the first and decisive condition of their use – nutritional supplements and ingredients to functional foods. In addition, no side effects have been reported for humans after consuming a diet rich in *β*-glucans from oatmeal, or barley flour, or their extracts. At the same time, there are antinutritional properties in feed grains, and it needs to be heeded by feed producers (Faure et al., 2015; Loskutov, Polonskiy, 2017). In addition, for brewing technology, it is necessary that malt (wort) contained as few *β*-glucans as possible, since they contribute to an increase in the viscosity of wort and beer, reducing output and filterability.

Such facts indicate the importance of the quantitative determination of *β*-glucans in various grain raw materials. However, separation and determination of pure *β*-glucan is a complex and expensive process since in cereals they are present in the bound form and concentrated mainly in the aleurone and subaleurone layers, which also contain starch, proteins and lipids that interfere with their determination (Bechtel et al., 2009).

The objective of the study was to develop an affordable and inexpensive method for quantitative assessment of *β*-glucans in the grain of naked and covered barleys for mass analysis.

Materials and methods

A number of methods for the quantitative determination of glucans are discussed in publications. The most widely used is the biophysical enzymatic method using lichenase and *β*-glucosidase (McCleary, Codd, 1991; Lee et al., 1997). However, this method is considered time-consuming and requires many operations. In addition, the cost of a set of reagents supplied by Megazyme can be quite significant if you need to analyze a large number of samples, which is not always convenient for everyday and frequent analyses. At the moment, the availability of imported reagents supplied by foreign companies is also an important factor.

There is a method for photometric determination of *β*-glucans using the fluorescent brightening agent calcofluor white. The method is based on the formation of a complex of *β*-glucans with a dye, subsequent photometric measurement of the optical density of the modified liquid phase, and subsequent determination of the concentration of *β*-glucans (Tikanoja et al., 2014).

Currently, the potential of the method in the near-infrared region for the determination of *β*-glucans in various cereals is being studied; it is considered as fast, accurate, and cost-effective. However, this technique requires device tuning, and preliminary construction of calibration curves obtained on a large volume of material using classical analysis methods (Blakeney, Flinn, 2005).

Another interesting method is the extraction of *β*-glucans from grain by alkaline and two-stage alkaline-enzymatic methods. In published sources (Salomatov, 2015; Gematdinova et al., 2017), the main stages of the alkaline extraction method were studied. However, the proposed methods have a number of disadvantages associated with the duration of the procedure and the lack of a possibility to accurately determine *β*-glucans due to the presence of accompanying compounds. These methods are mainly intended for the isolation, purification and concentration of glucans, which can then be used as a dietary supplement.

In our study, we used a modified alkaline method for oat grain based on the previously developed technique (Popov et al., 2021), since each crop has its own characteristics and requires appropriate adaptation and specific extraction modes. The time of the experiment and the number of operations are reduced, while the yield and purity of the final product are increased, which makes it possible to quantify the glucans in barley grain.

The results were compared with the data obtained on the same barley accessions by the arbitration enzymatic method AOAC 995.16 and ICC Standard Method No. 168 for *β*-glucans (Megazyme) (Polonskiy et al., 2021). The developed method was tested on naked and covered barley cultivars (Table 1).

Devices and materials used for the determination of *β*-glucans:

– a centrifuge for large volumes with cooling SL16R, Thermo FS or similar;

– a pH meter, ANION-4100 or similar;

– a laboratory mill, LMT-1 or similar;

– reagents: hydrochloric acid (chemically pure CP); sodium hydroxide (CP); phosphoric acid (CP); ethyl alcohol (CP).

Flour was obtained by direct grinding of whole barley grain (naked) and with husks (for covered cultivars).

Table 1. Description of the accessions used in the study

Таблица 1. Характеристика образцов используемых в исследовании

Accession name (*Hordeum vulgare* L.)	VIR catalogue No.	Type of grain	Variety	Origin
Korona Laschego	27471	Naked	*celeste*	Poland
Nudum 7566	29453		*nudum*	Kyrgyzstan
Omsky Golozerny 1	30919		*nudum*	Omsk Province
Nudum 95	31125		*nudum*	Chelyabinsk Province
Mayak	29622	Covered	*nutans*	Krasnoyarsk Territory
Acha	30243		*nutans*	Novosibirsk Province
Zolotnik	30845		*medicum*	Altai Territory
Biom	30984		*nutans*	Novosibirsk Province

Results and discussion

The weight method for determining *β*-glucans in barley grain includes sequential step-by-step separation of related compounds from flour samples (protein, starch, sugars, and nonstarch polysaccharides), isolation of *β*-glucans with alcohol, drying them to a constant mass followed by weighing and determination of the percentage content in flour with further conversion to dry matter.

Stages of quantitative determination of β-glucans in barley:

1. Preground barley (whole flour) was weighed in plastic centrifuge tubes, treated with 50% ethyl alcohol in a ratio of 1:10 (m/v) to extract free sugars, part of proteins, lipids, and other substances. Extraction was carried out at a temperature of 60°C for 20 minutes, which also contributes to the inactivation of *β*-glucanase, which destroys glucans (Skendi et al., 2003). Then the suspension was centrifuged at a rotation speed of 5 thousand rpm for 10 minutes and a temperature of +20°C. Thereafter, the ethyl alcohol was drained and the resulting precipitate was used for further research.

2. The release of *β*-glucans from the flour endosperm and aleurone layer was carried out in an alkaline solution by holding the precipitate in the same test tubes in a 5% sodium hydroxide solution at a ratio of 1:20 (m/v) and a temperature of 45°C for 60 minutes. For better mixing and lump formation prevention the precipitate must first be dissolved in a small amount of an alkali solution, carefully kneading the lumps formed with a glass stick. The suspension was stirred every 10 minutes.

3. Then the alkaline extract was neutralized with concentrated hydrochloric acid in centrifuge tubes to pH 2.0...3.0 controlling the acidity using a pH meter or litmus test. The mixture was thoroughly mixed until a homogeneous milky white color. The acidic environment further contributes to the formation of a dense precipitate consisting of protein substances and polysaccharides, and a better separation and transition of *β*-glucans into the supernatant.

4. Phosphotungstic acid (10%) was added to the resulting solution in a ratio of 1:1.5 (m/v), mixed, and centrifuged with cooling in the same tubes at a rotation speed of 10,000 rpm for 20 minutes and a temperature of +10°C. Phosphotungstic acid contributes to the formation of a dense precipitate, more complete precipitation of protein and polysaccharides, while simple sugars, amino acids and *β*-glucans remain in the supernatant (Fig. 1).

5. *Beta*-glucans were isolated from the pellet by adding a 2-fold volume of 96% ethyl alcohol and holding the mixture for 30 minutes at a temperature of +20°C (Fig. 2). For better mixing, the pellet from centrifuge tubes was poured into ethyl alcohol measured in measuring cylinders by 50 or 100 cm^3.

6. After the *β*-glucan fibers surfaced, they were extracted and placed in predried and weighed porcelain cups and dried

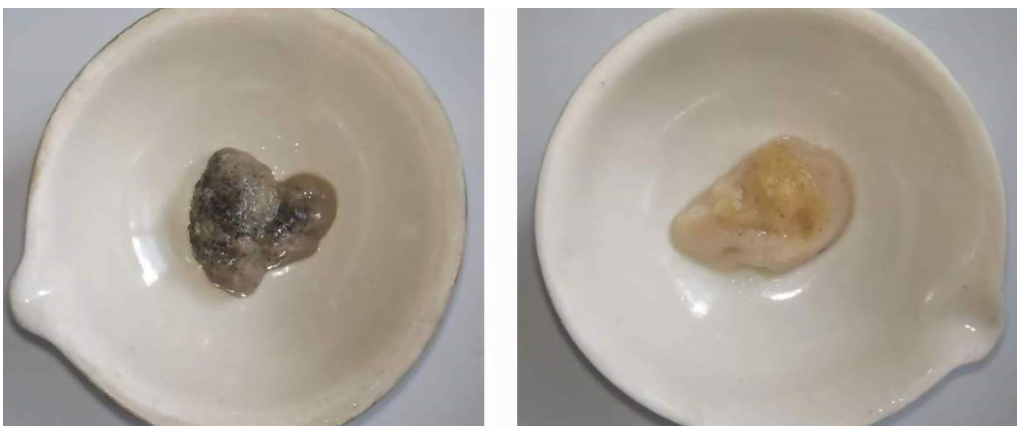


Fig. 1. A precipitate consisting of insoluble fiber, protein, and starch

Рис. 1. Осадок, состоящий из нерастворимых волокон, белка и крахмала

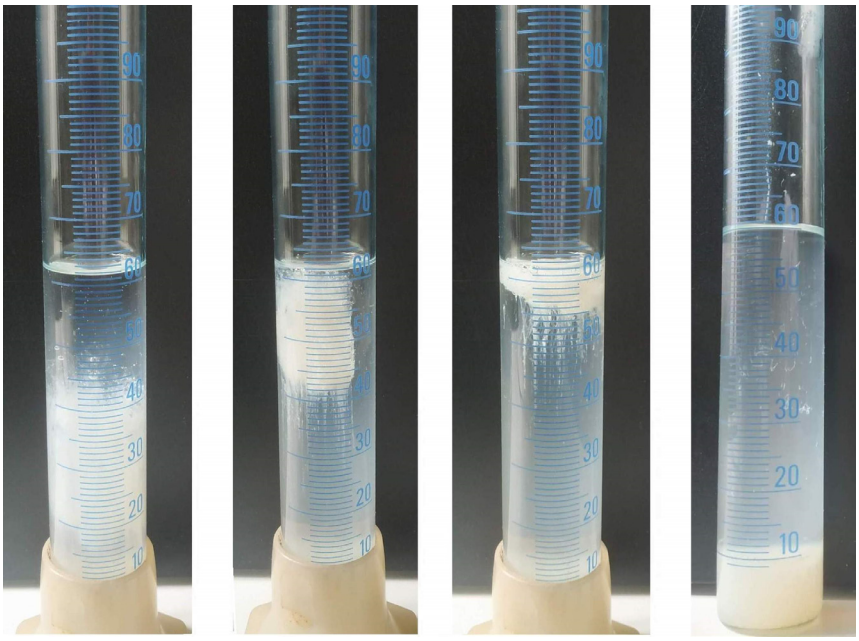


Fig. 2. The stages of the surfacing of *β*-glucans fibers in ethanol
Рис. 2. Этапы всплытия волокон β-глюканов в этаноле



Fig. 3. *Beta*-glucan fibers before (left) and after (right) drying
Рис. 3. Волокна β-глюканов до (слева) и после (справа) высушивания

at a temperature of 75°C to a constant mass (Fig. 3). The precipitate containing sugars, oligosaccharides and other fractions was not taken into account.

7. The quantitative content of *β*-glucans in terms of dry flour weight (x, %) was calculated by the formula:

$$x = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100 \cdot 100}{m \cdot c},$$

where
m_1 is the mass of the porcelain cup with dried *β*-glucans, g;
m_2 is the mass of the porcelain cup, g;
m is the mass of the flour sample, g;
c is the dry matter content in the flour sample, %.

The dry matter content of flour was determined by a method based on weighing a part of the grinded medium sample before and after drying to a constant mass at a temperature of 100–102°C (Ermakov, 1987).

The obtained *β*-glucans were tested for the presence of impurities and compared with barley accessions with a known content of soluble glucans determined by the standard enzymatic method (Table 2). A qualitative reaction to starch with Lugol's reagent did not reveal a characteristic blue color, nitrogenous substances investigated by the Kjeldahl method were also not detected.

As seen in Table 2, the content of glucans according to the developed gravimetric method ranged from 4.12 ± 0.23% to 5.34 ± 0.31% for naked barley cultivars and from 3.57 ± 0.18% to 4.29 ± 0.32% for covered barley cultivars, which is comparable to the data obtained by the standard enzymatic method.

Thus, the developed weight method for determining *β*-glucans in barley grain provides direct isolation of *β*-glucans from samples, purification from various accompanying substances, and calculation of the percentage content of the sample's weight.

Table 2. ***Beta*-glucans in barley accessions**

Таблица 2. Бета-глюканы в образцах ячменя

Type of grain	VIR catalogue No.	*β*-glucans (DW), %			Difference	
		Weight method	Standard method. Average data for 3 years*		Abs.	%
			$\bar{X}$	Cv		
Naked	к-27471	4.12±0.23	3.81	8.7	+0.31	8.1
	к-29453	4.44±0.19	4.27	14.4	+0.17	4.0
	к-30919	4.55±0.12	4.30	10.1	+0.25	5.8
	к-31125	5.34±0.31	5.21	4.9	+0.13	2.5
Covered	к-29622	3.57±0.18	3.43	7.0	+0.14	4.1
	к-30243	4.17±0.08	4.51	10.4	-0.34	8.2
	к-30845	4.29±0.32	4.38	14.7	-0.09	2.1
	к-30984	3.70±0.24	3.89	14.0	-0.19	5.1

Note: * – standard method for *β*-glucans (Polonskiy, 2021)

Примечание: * – стандартный метод для β-глюканов (Polonskiy, 2021)

Conclusion

Published data on the quantity of *β*-glucans in the grains of different crops vary greatly and exhibit significant intervarietal differences. The quantitative content of *β*-glucans in barley ranges from 3 to 11%, in oats from 1.8 to 7.5%, in rye from 1 to 2%, and in wheat < 1%, while trace amounts are found in other types of grains (Loskutov, Polonskiy, 2017). Considering such a significant varietal range of variability in the content of glucans in different crops, it is necessary to study the genetic diversity of cereals and cereal crops in order to isolate accessions (sources) for different directions in breeding, particularly for use in feed production, food, and brewing industries.

The proposed method for determining *β*-glucans from barley grain can be successfully used to analyze naked and covered cultivars during screening. The advantages of the method include the availability of the reagents and equipment, as well as insignificant time costs for preparation and performance of the analysis. It should be noted separately that the method provides an opportunity of quantitative determination of the product obtained, thanks to the virtually complete absence of accompanying impurities.

When studying a cereal gene pool, particularly barley as a crop characterized by high quantitative content of glucans, this method can be useful for constructing calibration curves using near infrared spectroscopy, which would help to preserve valuable breeding material and possibly lead to the discovery of new, highly specialized and versatile uses of these crops in food industry. This will contribute to the development of commercial barley cultivars for feed and food production (Zhu et al., 2016).

References / Литература

Bechtel D.B., Abecassis J., Shewry P.R, Evers A.D. Development, structure, and mechanical properties of the wheat grain. In: P.R. Shewry, K. Khan (eds). *Wheat: Chemistry and Technology.* 4th ed. St. Paul, MN: American Association of Cereal Chemists; 2009. p.51-95. DOI: 10.1016/B978-1-891127-55-7.50010-0

Blakeney A.B., Flinn P.C. Determination of non-starch polysaccharides in cereal grains with near-infrared reflectance spectroscopy. *Molecular Nutrition and Food Research*. 2005;49(6):546-550. DOI: 10.1002/mnfr.200500038

Chang H.C., Huang C.N., Yeh D.M., Wang S.J., Peng C.H., Wang C.J. Oat prevents obesity and abdominal fat distribution, and improves liver function in humans. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2013;68(1):18-23. DOI: 10.1007/s11130-013-0336-2

Dikeman C.L., Fahey G.C. Viscosity as related to dietary fiber: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2006;46(8):649-663. DOI: 10.1080/10408390500511862

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).

Faure A.M., Koppeno W.H., Nyström L. Iron(II) binding by cereal beta-glucan. *Carbohydrate Polymers*. 2015;115:739-743. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.07.038

Gajdošová A., Petruláková Z., Havrlentová M., Červená V., Hozová B., Šturdík E. et al. The content of water-soluble and water-insoluble β-D-glucans in selected oats and barley varieties. *Carbohydrate Polymers*. 2007;70(1):46-52. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.03.001

Gematdinova V.M., Kanarskii A.V., Kanarskaya Z.A., Smetanskaya I.I. The influence of alkaline and enzymatic processing of oat grain and oat bran on the yield of *beta*-glucan. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies.* 2017;79(3):164-168. [in Russian] (Гематдинова В.М., Канарский А.В., Канарская З.А., Сметанская И.И. Влияние щелочной и ферментативной обработки зерна овса и овсяных отрубей на выход бета-глюкана. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2017;79(3):164-168). DOI: 10.20914/2310-1202-2017-3-164-168

Harland J. Authorised EU health claims for barley and oat beta-glucans. In: M.J. Sadler (ed.). *Foods, Nutrients and Food Ingredients with Authorised EU Health Claims.* 1st ed. Cambridge: Woodhead Publishing; 2014. p.25-45. DOI: 10.1533/9780857098481.2.25

Konarev A.V., Loskutov I.G., Shelenga T.V., Horeva V.I., Konarev Al.V. Plant genetic resources as an inexhaustible source of healthy food products. *Agrarian Russia*. 2019;(2):38-48. [in Russian] (Конарев А.В., Лоскутов И.Г., Шеленга Т.В., Хорева В.И., Конарев Ал.В. Генетические ресурсы растений – неисчерпаемый источник продуктов здорового питания. *Аграрная Россия*. 2019;(2):38-48). DOI: 10.30906/1999-5636-2019-2-38-48

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. 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*. Санкт-Петербург: ВИР; 2017).

Krasilnikov V.N., Barsukova N.V., Popov V.S. Roles of oat *beta*-glucans in functional and dietetic food. *Problemy ekonomiki i upravleniya v torgovle 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).

Lee C.J., Horsley R.D., Manthey F.A., Schwarz P.B. Comparison of β-glucan content of barley and oat. *Cereal Chemistry*. 1997;74(5):571-575. DOI: 10.1094/CCHEM.1997.74.5.571

Loskutov I.G., Polonskiy V.I. Content of β-glucans in oat grain as a perspective direction of breeding for health products and fodder (review). *Agricultural Biology*. 2017;52(4):646-657. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.4.646eng

McCleary B.V., Codd R. Measurement of (1→3),(1→4)-β-D-glucan in barley and oats: A streamlined enzymic procedure. *Journal of Science Food and Agriculture*. 1991;55(2):303-312. DOI: 10.1002/jsfa.2740550215

Polonskiy V.I., Surin N.A., Gerasimov S.A., Lipshin A.G., Sumina A.V., Zute S.A. Evaluation of barley genotypes for the content of *β*-glucans in grain and other valuable features in Eastern Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(1):48-58. [in Russian] (Полонский В.И., Сурин Н.А., Герасимов С.А., Липшин А.Г., Сумина А.В., Зюте С.А. Оценка образцов ячменя на содержание β-глюканов в зерне и другие ценные признаки в условиях Восточной Сибири. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(1): 48-58). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-1-48-58

Popov V.S., Perchuk I.N., Khoreva V.I. A gravimetric method for the quantitative determination of soluble β-glucan content in oat grain. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(1):5-12. [in Russian] (Попов В.С., Перчук И.Н., Хорева В.И. Гравиметрический метод количественного определения растворимых *β*-глюканов в зерне овса. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(1):5-12). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-1-o1

Regand A., Chowdhury Z., Tosh S.M., Wolever T.M.S., Wood P. The molecular weight, solubility and viscosity of oat beta-glucan affect human glycemic response by modifying starch digestibility. *Food Chemistry*. 2011;129(2):297-304. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.04.053

Salomatov A.S. Acidic extraction of β-glucan from barley. *Bulletin of Altai State Agricultural University.* 2015;6(128):130-134. [in Russian] (Саломатов А.С. Получение β-глюкана из ячменя методом кислотной экстракции. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета.* 2015;6(128):130-134).

Shewry P.R., Piironen V., Lampi A.M., Nyström L., Li L., Rakszegi M. et al. Phytochemical and fiber components in oat varieties in the health grain diversity screen. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008;56(21):9777-9784. DOI: 10.1021/jf801880d

Skendi A., Biliaderis C.G., Lazaridou A., Izydorczyk M.S. Structure and rheological properties of water soluble β-glucans from oat cultivars of *Avena sativa* and *Avena bysantina*. *Journal of Cereal Science*. 2003;38(1):15-31. DOI: 10.1016/S0733-5210(02)00137-6

Tikanoja S., Suoniemi-Kähärä A., Otama L. Method for determining the concentration of beta-D-glucan. Finland; patent number: EP2810051A1; 2014.

Wood P.J. Oat and rye beta-glucan: properties and function. *Cereal Chemistry*. 2010;87(4):315-330. DOI: 10.1094/CCHEM-87-4-0315

Wood P.J., Beer M.U. Functional oat products. In: G. Mazza (ed.). *Functional Foods: Biochemical and Processing Aspects*. Lancaster, PA: Technomic Publishing Co.; 1998. p.1-37.

Zhu F., Du B., Xu B. A critical review on production and industrial applications of beta-glucans. *Food Hydrocolloids*. 2016;52(2):275-288. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.07.003

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

Alexey V. Konarev, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.konarev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-2938-1014

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

Nina G. Konkova, Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, ninakonkova.1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4920-3904

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

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

Алексей Васильевич Конарев, 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, a.konarev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-2938-1014

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

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, ninakonkova.1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4920-3904

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests*:* the authors declare no conflicts of interests.
Конфликт интересов*:* авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.06.2023; одобрена после рецензирования 13.07.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 06.06.2023; approved after reviewing on 13.07.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

STUDYING AND UTILIZATION OF PLANT GENETIC RESOURCES

Original article
UDC 633.913.322:631.559
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-53-63

CC BY

Effects of irrigation frequency on growth and yields of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin

Guang Shen[1], Fuyun Zheng[1], Lin Zhou[1], Xiangjun Zeng[2], Nina G. Konkova[3]

[1] *Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China*

[2] *Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China*

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

Corresponding author: Guang Shen, shen19772@163.com

Taraxacum kok-saghyz (TKS) is one of the most promising rubber plants in the world. The question of how irrigation affects its yields and biochemical composition has not yet been studied well. The effects of irrigation frequency on the growth and yield of *Taraxacum kok-saghyz* were analyzed. According to the obtained results, it was established that an increase in irrigation frequency (extension of the watering interval) gradually decreased TKS rubber and total sugar yields. With the soil water content increasing from 22.8 to 38.9%, TKS rubber and sugar yields were changing in line with a cubic polynomial equation. Regular watering once every 6 days maintains soil moisture at a level above 28.0%, which makes it possible to increase the yield of *Taraxacum kok-saghyz* while enhancing the water-use efficiency under the conditions of Northeastern China (Harbin).

Keywords: *Taraxacum kok-saghyz*, irrigation frequency, leaf biomass, rubber content, sugar content

Acknowledgements: the work was supported by the Scientific Research Fund of Heilongjiang Academy of Sciences under Grant No. KY2019ZR02, and performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. NFGEM-2022-0005.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Shen G., Zheng F., Zhou L., Zeng X., Konkova N.G. Effects of irrigation frequency on growth and yields of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):53-63. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-53-63

© Shen G., Zheng F., Zhou L., Zeng X., Konkova N.G., 2023

ИЗУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ РАСТЕНИЙ

Научная статья
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-53-63

Влияние частоты полива на рост и урожайность *Taraxacum kok-saghyz* Rodin

Г. Шень[1], Ф. Чжэн[1], Л. Чжоу[1], С. Цзэн[2], Н. Г. Конькова[3]

[1] *Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Харбин, Китай*

[2] *Академия наук провинции Хэйлунцзян, Харбин, Китай*

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

Автор, ответственный за переписку: Гуан Шень, shen19772@163.com

Taraxacum kok-saghyz – одно из самых перспективных каучуконосных растений. Недостаточно изучено влияние полива на урожайность и биохимический состав кок-сагыза. В исследовании изучалось влияние частоты полива на рост и урожайность *Taraxacum kok-saghyz*. Согласно полученным результатам было установлено, что увеличение частоты полива (увеличение интервала полива) постепенно снижало содержание каучука и общий выход сахара у кок-сагыза. С увеличением содержания воды в почве с 22,8 до 38,9% выход каучука и сахара существенно менялся в соответствии с кубической зависимостью (уравнением кубического полинома). Регулярный полив один раз в 6 дней поддерживает влажность почвы на уровне 28%, что позволяет увеличить урожайность кок-сагыза при одновременном повышении эффективности водопользования в условиях северо-восточного Китая (Харбин).

Ключевые слова: *Taraxacum kok-saghyz*, частота полива, биомасса листьев, содержание каучука, содержание сахара

Благодарности: работа была поддержана Фондом научных исследований Академии наук провинции Хэйлунцзян в рамках гранта № KY2019ZR02; работа выполнялась в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № NFGEM-2022-0005.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Шень Г., Чжэн Ф., Чжоу Л., Цзэн С., Конькова Н.Г. Влияние частоты полива на рост и урожайность *Taraxacum kok-saghyz* Rodin. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):53-63. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-53-63

Introduction

Taraxacum kok-saghyz Rodin (TKS) is a perennial plant which adapts to mid-temperate continental monsoon climate and moderately cold climatic zones. Its root contains 2.89–27.89% of rubber (Cornish, 2017; Taiz et al., 2015) and 25–40% of inulin (Oki, Kanae, 2006). It is one of the most promising rubber plants in the world (Cornish, 2017). TKS leaves have high antioxidant capacity because of their significant content of phenolic compounds, including flavonoid and tannin content (Vörösmarty et al., 2000). Because of its short growth cycle, TKS can be a natural model for studying the mechanism of rubber accumulation (Sinclair et al., 1984). Therefore, TKS is a multi-application plant with important economic and scientific values.

Water is the most important factor affecting plant growth and yield of agricultural crops (Taiz et al., 2015). The growth of the human population, environmental pollution, and climate change are making water resources more and more scarce (Oki, Kanae, 2006; Vörösmarty et al., 2000) for many countries, especially for the developing ones, so the enhancement of water-use efficiency is one of the most important scientific tasks (Sinclair et al., 1984).

One of the urgent modern trends in science is the investigation of the influence of various irrigation schemes on the growth, development and yield of rubber plants. Although *Hevea brasiliensis* is the main source of natural rubber, the effects of different watering schemes on its development are less studied (Carr, 2012). For example, increasing the frequency of irrigation increases the gain of aboveground biomass of *Hevea brasiliensis* (Devakumar et al., 1999), but excessive water can hinder development and cause the root rot (Gomes, Kozlowski, 1988). Investigations into the influence of draught stress and different irrigation schemes on the guayule (*Parthenium argentatum* L.) growth confirm that an increase in irrigation frequency accelerates the development of *Parthenium hysterophorus* aboveground and belowground biomass, and increases the rubber yield (Nakayama et al., 1991; Miyamoto, Bucks, 1985; Veatch-Blohm et al., 2006). Some studies estimated the ratio of guayule harvest to water consumption (Bucks et al., 1985; Fangmeier et al., 1950) to provide theoretical guidelines for crop production. Before the 1960s, the research on water impact on TKS development was mainly concentrated on the effects of climate, soil environment, and irrigation methods. The current study indicated that irrigation frequency affected rubber content, but not inulin, biomass, and other morphological characteristics (Arias et al., 2016).

The aim of this study was to provide theoretical support for the development of new TKS irrigation technologies:

1) determination of the minimum water amount that is necessary to maintain a high TKS yield, and

2) assessment of the effect of irrigation frequency on TKS yield parameters.

Experimental design and methods

Study site

The experiment was carried out at the Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy, in Harbin (E 126°38’45.5”, N 45°42’45.4”) in 2015. Harbin region has a mid-temperate continental monsoon climate with a mean annual temperature of 4.2°C, annual precipitation of 569 mm, and frost-free period of 145 days.

The cultivation soil type is black soil with the following physical and chemical properties: organic carbon = 62.3 g kg^{-1}; alkali-hydrolysable nitrogen = 223.0; available phosphorus = 156.3; available potassium = 552.0 mg kg^{-1}; bulk density = 1.68 g m^{-3}.

Plant materials

All plant materials were obtained from accession k-445 provided by the N.I. Vavilov Institute of Plant Genetic Resources (VIR), Russia, in 2012. After 2 years of domestication and cultivation in Harbin for complete adaptation to the local soil and climate environment of Harbin region, the seeds were harvested and stored at 4°C after cleaning in 2014. During the experiment, the seedlings were raised in the greenhouse in mid-April (16–22°C), and seeds were planted in the field on July 1 (2 months after germination, at the stage of 5–7 leaves).

Experimental design

This study was carried out according to a potted single-factor randomized block experimental design.

In early July 2015, in a ventilated plastic shed, 2-month-old TKS seedlings were transplanted into pots (upper diameter = 20.7 cm; lower diameter = 14.5 cm; height = 17.8 cm; volume = 3.1 L), with sufficient watering. After 1 month of normal growth management, the main irrigation frequency experiment was carried out.

The experiment included four irrigation frequency gradients with watering once every 12, 9, 6, and 3 days (treatments Nos. 1, 2, 3, and 4, respectively), 400 mL of water was added to each plant for the proper water soil saturation. Each treatment had 3 replications, with 10 TKS plants per replication, 120 plants in total (Fig. 1).

Research methods

During the experiment, soil water content and plant growth parameters were dynamically monitored. After the aboveground part withered in early November, the underground part was taken out of the pot, and other indicators were measured after cleaning.

Monitoring of soil water content: after treatment 1 was fully watered, 5 soil samples were randomly taken every day, and the corresponding soil water content was measured by the weighing method for 12 consecutive days.

Monitoring of plant growth status: measuring the crown width and number of leaves of each plant every 20 days (August 6, August 24, September 6, and September 24, respectively).

Other indicators:

After the rhizomes of TKS were taken out of the pot and cleaned, the stem diameter, root length, root number, underground biomass, rubber content, total sugar and reducing sugar content for each TKS plant were measured, and water-use efficiency of each treatment was calculated.

Water-use efficiency (WUE) = underground dry matter (B) / water consumed (WU) (Sinclair et al., 1984).

Soil organic carbon content was determined by the potassium dichromate–external heating method, total nitrogen by the Kjeldahl method, available nitrogen by the indophenol blue colorimetric method, total phosphorus by the molybdenum antimony anti-colorimetric method, total potassium by the sodium hydroxide melting method, available potassium by the sodium acetate extraction method, available phosphorus by the sodium bicarbonate method, and bulk density the by ring knife method (Ehrler et al., 1985; Hunsaker, Elshikha, 2017).

Data processing and analysis

All measured data were input into Excel, and then R language (R Core Team, 2020) was used to clean the data in the



Fig. 1. ***Taraxacum kok-saghyz*** **Rodin (TKS) plants included in the irrigation frequency experiment. Greenhouse stage**

Рис. 1. Растения ***Taraxacum kok-saghyz*** **Rodin (TKS), включенные в эксперимент по частоте полива. Тепличный этап**

R Studio (R Studio Team, 2015) environment, and the missing values and outliers were removed. In order to test the trend of the influence of irrigation frequency on TKS yield and its constituent factors within the variation range of each index value, we used the trend analysis method to test whether the change trend conformed to a linear, quadratic, or cubic equation. Based on the *P* value and variance weight (η^2), we determined which model is more suitable. The specific calculation method refers to the work by Roger E. Kirk (Kirk, 2013). Since the trend analysis is to carry out the variance analysis within the numerical variation range of the current measurement index, the fitted equation model is only applicable to the current numerical range. The variance analysis was performed using the aov() function in the R language, and ggplot2 (Wickham, 2016) was used in combination with the patchwork software package for plotting.

Results and analysis

Changes in soil water content

The soil water content began to decrease rapidly, the decreasing slowed down only after the 8th day after irrigation.

On the 1st day after watering the soil moisture content was 38.9%, on the 4th day it decreased to 34.5%, on the 7th day to 28.0% (treatment 4), on the 10th day to 24.5% (treatment 3), on the 13th day to 22.8% (treatment 2) and to 22.8% (treatment 1) (Fig. 2).

Impact of irrigation frequency on the parameters of TKS aboveground parts

At the early stage of growth, the TKS leaf rosette diameter at treatment 4 was the largest and appeared significantly larger than that at treatment 1, followed by treatment 2, and treatment 3. As the growth continued, the difference between treatment 4 and treatment 3 was not significant ($P > 0.05$), these parameters were significantly larger compared with the other numbers of treatments.

The final leaf rosette parameters at all treatments reached 20.8–30.3 cm, increasing 1.2–1.7 times compared to the initial growth stage, while the maximum value was approximately 1.4 times higher than the minimum (Fig. 3).

In the early stage of growth, leaf biomass at treatment 4 was the largest, being significantly larger than that at other treatments. The differences between parameters of treat-

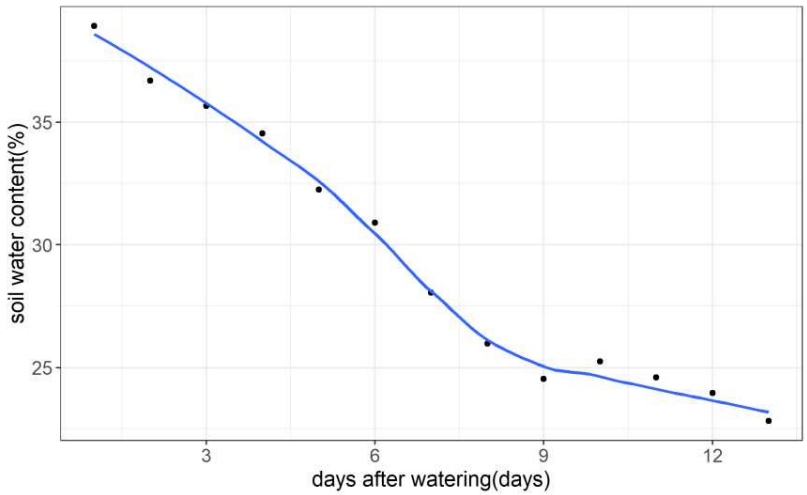


Fig. 2. Dynamics of changes in soil water concentration over 12 days

Рис. 2. Динамика изменения концентрации воды в почве за 12 дней

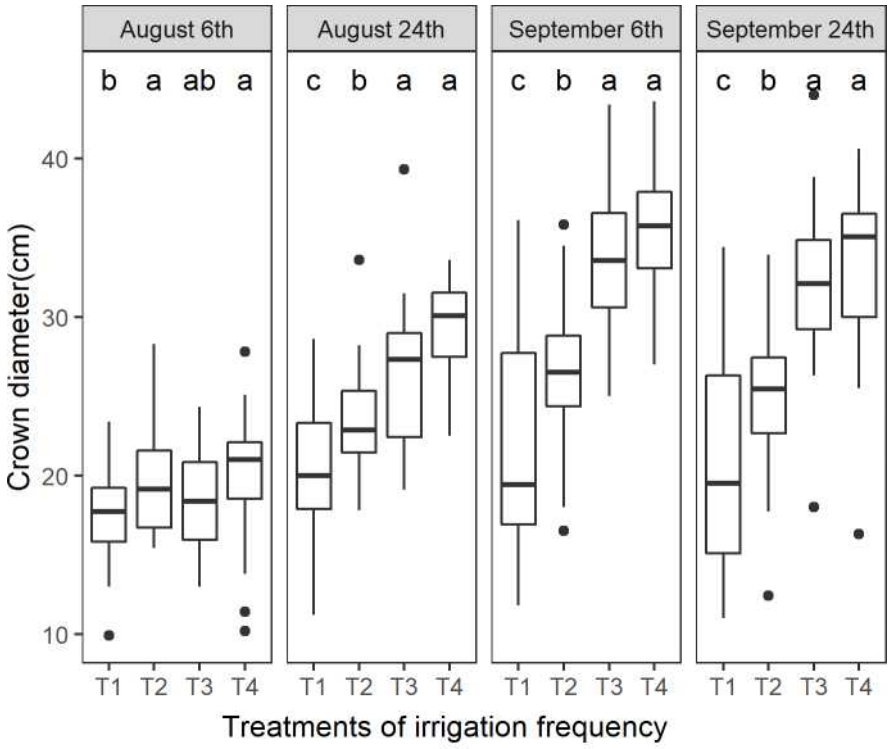


Fig. 3. Dynamics of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) crown diameter alterations with the changing irrigation frequency

Рис. 3. Динамика изменения диаметра розетки *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) при изменении частоты полива

ments 2 and 3 were not significant, and the parameter of treatment 1 was the smallest, significantly smaller than at other treatments. As the growth continued, the differences between the treatments' parameters gradually increased. At the final stage of development, the differences between the parameters of each treatment were statistically significant.

The maximum value of 104.1 g/plant corresponded to treatment 4, being more than 5 times larger than that at treatment 1, so the value increased 1.6 to 5.3 times compared with the initial growth stage (Fig. 4).

Impacts of irrigation frequency on the parameters of TKS belowground parts

There was no significant difference in the stem diameter between treatments 3 and 4: 19.5 and 20.7 cm, respectively. But their parameters were significantly larger than those of treatments 1 and 2. Meanings of treatment 2 (13.6 cm) were significantly larger than those of treatment 1. The maximum value was 1.5 times larger than the minimum (Fig. 5, A). There was no significant difference in the root number among the treatments, ranging from 5.1 to 6.3 (Fig. 5, B). The difference in root length between treatments 3 and 4 was not significant (about 32 cm); both parameters were significantly larger than at treatments 1 and 2. TKS root length at treatment 1 was significantly smaller (24.6 cm) compared with other treatments. The difference between the maximum and minimum values was about 1.3 times (Fig. 5, C). The distinction in belowground biomass parameters between treatment 3 and 4 was not significant (10.6 and 11.0 g/plant). Both values were significantly larger than those at treatment 1 and treatment 2. The parameters at treatment 2 (4.1 g/plant) were significantly larger than at treatment 1. The difference between the maximum and minimum values was about 2.6 times (Fig. 5, D).

Rubber content at treatment 1 was the smallest (4.78%), being significantly lower than that at other treatments. The differences in rubber content between other treatments were not significant, and the maximum value was 5.13% (Fig. 6, A).

Total sugar values at all treatments ranged from 41.0 to 50.8%. (Fig. 6, B). The difference in the total sugar yield at treatments 3 and 4 was significantly greater than that at treatment 1 and 2. The total sugar yield at treatment 2 (41.0%) was significantly higher compared with treatment 1. The maximum value was about 1.2 times larger than the minimum value (Fig. 6, C). The rubber yields at treatments 3 and 4 (539 and 564 g/plant, respectively) were significantly higher than those at treatment 1 and treatment 2. The value of treatment 1 (198 g/plant) was significantly lower compared with other treatments. The maximum value was about 2.8 times higher than the minimum (Fig. 6, D).

Impact of irrigation frequency on the root/leaf ratio

The root/leaf ratio of TKS obviously decreased with the increasing irrigation frequency. Higher moisture content in the soil corresponded to a lower ratio of roots to leaves, from 1.85 (treatment 1) to 0.85 (treatment 4) (Fig. 7).

Trend analysis of the irrigation frequency effect on TKS yield parameters

The increase in soil moisture (irrigation frequency indicator) from 22.8 to 38.9% caused an increase in TCS leaf biomass from 19.5 to 104.1 g/plant. This trend was significantly in line with linear, quadratic, and cubic trends, but mostly fitted the cubic polynomial model, $\eta^2 = 0.579$, $P < 0.001$ (Fig. 8, A). The root biomass of TKS increased from 4.1 to 11 g/plant. The change trend was significantly in line with the quadratic and cubic models, but the cubic polynomial model was the best suitable, $\eta^2 = 0.531$, $P < 0.001$ (Fig. 8, B). There was no obvious trend in the TKS rubber and total sugar con-

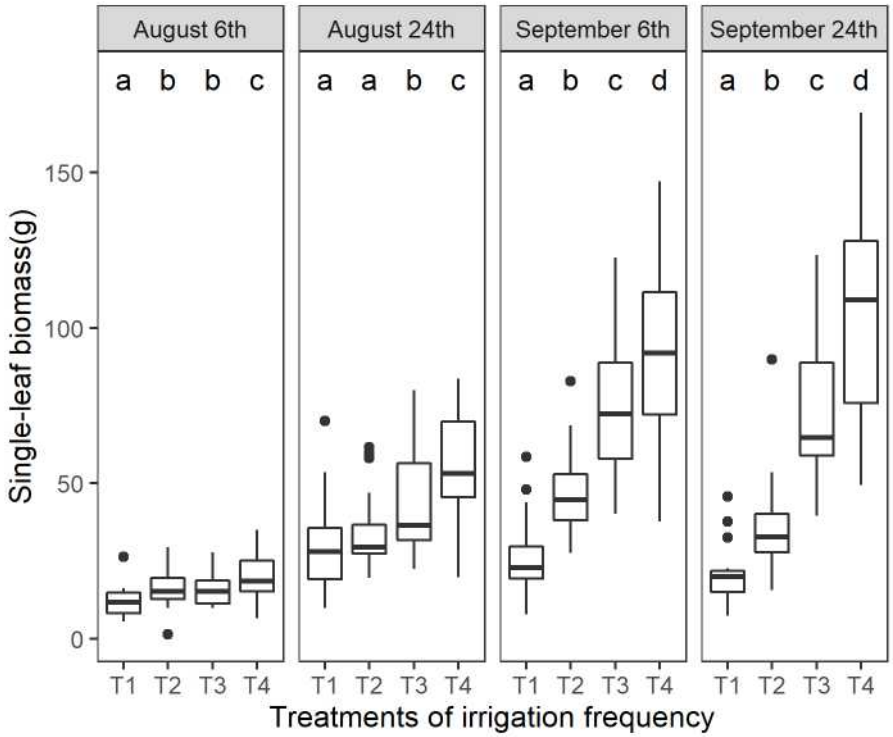


Fig. 4. Dynamics of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) leaf biomass alterations with the changing irrigation frequency

Рис. 4. Динамика изменения биомассы листьев *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) при изменении частоты полива

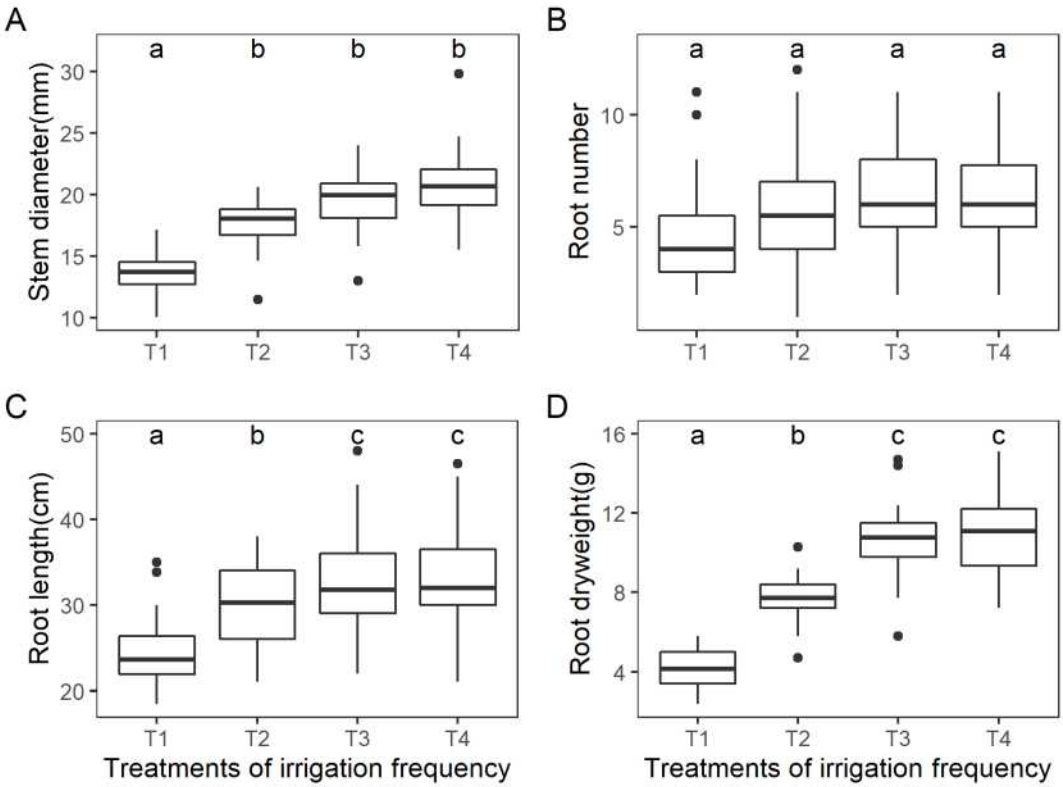


Fig. 5. Dynamics of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) root trait alterations with the changing irrigation frequency

Рис. 5. Динамика изменения признаков корней *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) при изменении частоты полива

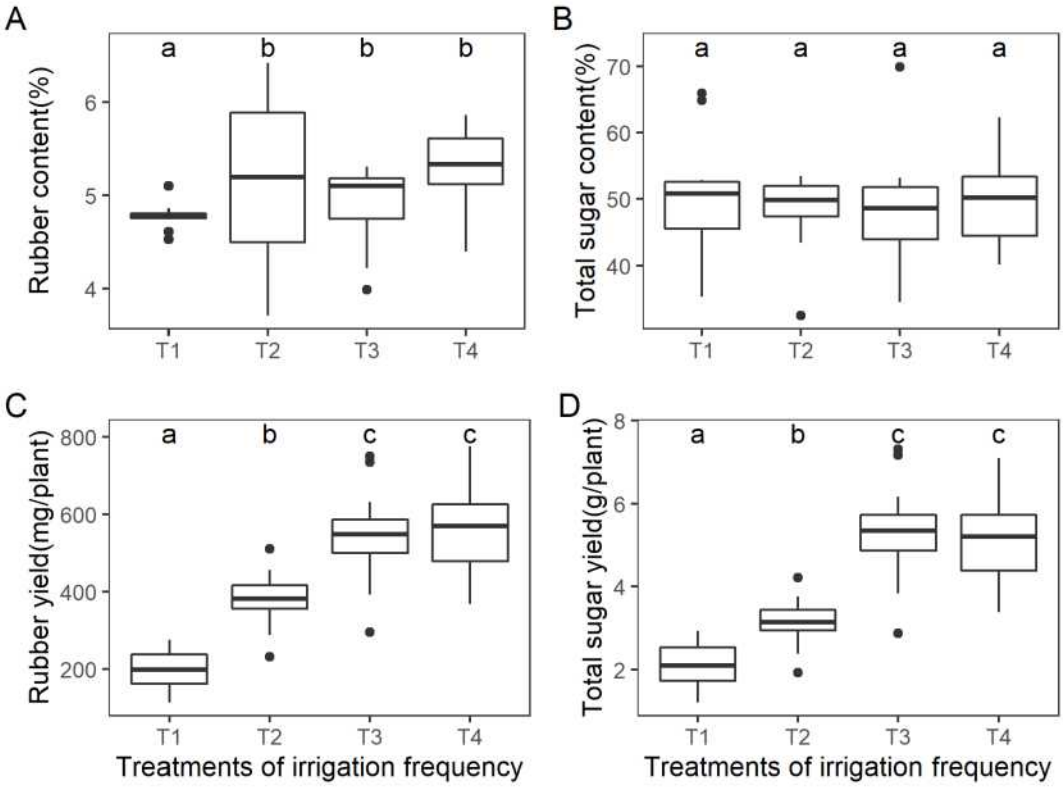


Fig. 6. **Dynamics of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) rubber and sugar yield alterations with the changing irrigation frequency**

Рис. 6. **Динамика изменения выхода каучука и сахара *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) при изменении частоты полива**

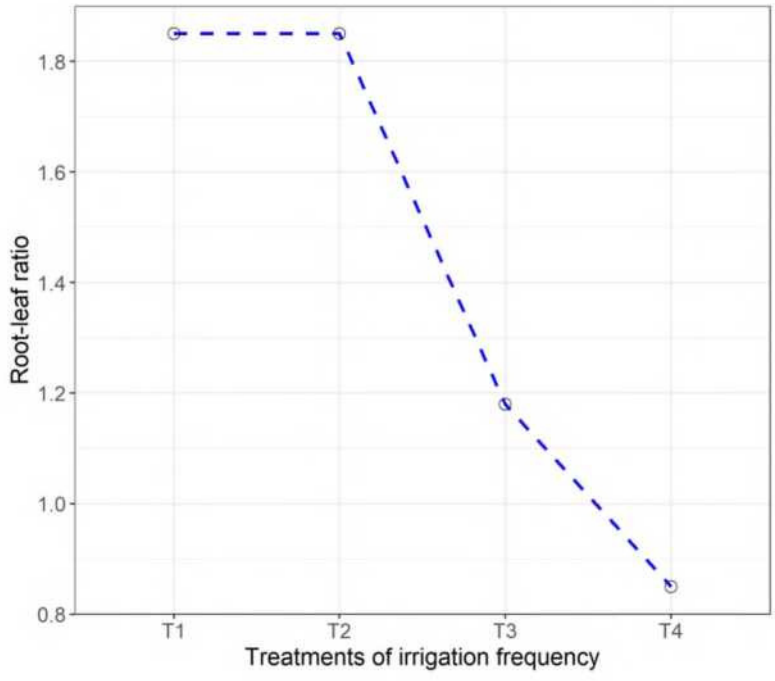


Fig. 7. **Impact of irrigation frequency on the *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) root/leaf ratio**

Рис. 7. **Влияние частоты полива на соотношение корни/листья *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS)**

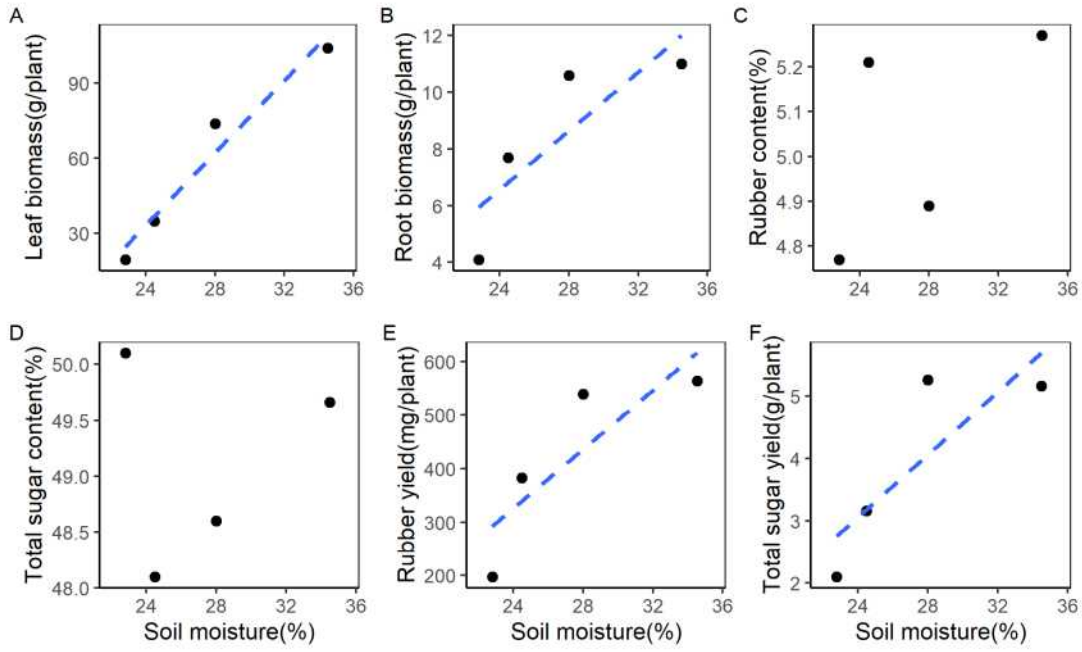


Fig. 8. Curves of the irrigation frequency impact on leaf and root biomass, rubber and sugar content, rubber and sugar yield in *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS)

Рис. 8. Кривые влияния частоты полива на биомассу листьев и корней, содержание каучука и сахара, выхода каучука и сахара у *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS)

tent changes (Fig. 8, C, D). TKS rubber yield increased from 197.6 to 563.6 g/plant. The change trend was significantly in line with the quadratic and cubic models, but the cubic polynomial model was most suitable, $\eta^2 = 0.550$, $P < 0.001$ (Fig. 8, E). The change trend of the total sugar yield from 100.4 to 264.9 g/plant was significantly in line with linear, quadratic, and cubic trends, but the cubic polynomial model was the best fitted, $\eta^2 = 0.463$, $P < 0.001$ (Fig. 8, F).

Water-use efficiency

Treatment 2 had the highest water-use efficiency (193 g m^{-3}), followed by treatment 3 (177 g m^{-3}) and treatment 1 (144 g m^{-3}). Treatment 4 had the lowest water-use efficiency (92 g m^{-3}) (Table 1). It means that under pot conditions, watering every 9 days was the most efficient.

Discussion

Overall, with the reduction in irrigation frequency or soil water content, the crown diameter, leaf biomass, stem diameter, root length, root biomass, rubber yield, and total sugar yield of TKS gradually decreased except for the parameters of root number and total sugar content.

Since the difference in rubber yield and total sugar yield was consistent with the difference in rhizome biomass, it can be concluded that the frequency of irrigation mainly affects the yield through a change in the parameters of the TKS root biomass.

The study indicated that the TKS rubber and total sugar yield were maximum at treatments 3 and 4 (watering every 6 and 3 days, respectively). On the other hand, less water was

Table 1. The effect of irrigation frequency on water-use efficiency

Таблица 1. Влияние частоты полива на эффективность водопользования

Treatments	Belowground dry weight (g)	Rubber yield (g)	Amount of water (m^3)	Water-use efficiency of biomass (g-m'3)	Water-use efficiency of rubber yield (g < 3)
T1	4.1	0.198	0.028	144	7.1
T2	7.7	0.383	0.04	193	9.6
T3	10.6	0.539	0.06	177	9.0
T4	11.0	0.564	0.12	92	4.7

used in treatment 3, hence the water-use efficiency was higher. Although the water-use efficiency at treatment 2 was higher, the yield was significantly lower compared to treatment 3. Therefore, the 3rd treatment option (watering once every 6 days) was the most efficient for water use and for the achievement of the best TCS yields.

By monitoring soil moisture, we found that the indicator began to show a significant downward trend on the 6th day after watering, at that time when the soil moisture was 28.0%. The water supplementation carried out at treatment 3 indicated that the amount of soil moisture equal to 28.0% was critical for the TKS development. Therefore, it is necessary to control the soil water content and keep it above 28.0%, which ensures normal growth and high rubber yields.

Sugars are the plant's reserve compounds and play the role of activity regulators for many genes (Halford et al., 2011). Water stress can affect physiological and biochemical processes in plants (Hsiao et al., 1976; Hanson, Hitz, 1982) leading to changes in some metabolic pathways, including sugar metabolism, accumulation of sugars and many organic compounds (Iljin, 1957; Kameli, Löselδ, 1993). Most of plants increase their sugar content under water stress (Kameli, Löselδ, 1993; Vassiliev, 1936), which is inconsistent with the results of this study. Possibly the sugar content increase in TKS roots occurs at the initial stage of water stress, while sugar redistribution between TKS aboveground and belowground parts was in favor of the latter, and the force of water stress in the current study was not strong enough to increase sugar concentration in TKS roots.

When the soil water content was less than 22.8%, the rubber content decreased significantly, and at values above 28.0%, the rubber content did not change. This suggests that only a certain intensity of water stress causes a decrease in the rubber content (Miyamoto, Bucks, 1985; Hammond, Polhamus, 1965; Bucks et al., 1985; Allen et al., 1987). Veatch-Blohm et al. (2006) found that rubber content in guayule biomass increased under the influence of water stress, since the guayule biomass decrease was corresponded to the increase of rubber content. The results of the current study may be related to the fact that TKS rubber amount decreased more than the amount of TKS biomass against the background of reduced irrigation; in addition, lower soil moisture reduces the TKS nutrient uptake, which leads to a decrease in TKS rubber content. M. Arias et al. (2016) found the TKS rubber content to be about 1.4%, which is very different from our data (about 5.0%).

In the current study, with a decreasing watering frequency, the TKS leaves and roots biomass gradually decreased. Since the TKS root number did not change, while the TKS root length decreased, it is obvious that the decrease in the root biomass was due to a decrease in the TKS root length. The increasing ratio of TKS root to TKS leaf biomass indicates that under conditions of reduced watering frequency, there is an increase in TKS underground biomass, which is due to the fact that an increase in the number of root hairs is required for nutrient uptake for alleviating soil water stress, which is consistent with previous studies. Roots, stems and leaves are systems that maintain the dynamic balance, reflecting the activity of aboveground and underground resources (light and CO_2, water and nutrients) (Poorter et al., 2012). The difference in the root/leaf ratio between treatments 1 and 2 was not significant, probably due to limited soil nutrients that could not support TKS to release more biomass.

This study provides only preliminary understanding of the effect of water stress on the TKS growth and yield. The present study confirms the prospects of the effect of water stress on the yield of TKS (Poorter et al., 2012).

Conclusion

The results of the study showed the trends in the irrigation frequency effect on TKS yield parameters. An increase in soil moisture (irrigation frequency indicator) from 22.8 to 38.9% caused the increases in TKS leaf biomass from 19.5 to 104.1 g/plant, TKS root biomass from 4.1 to 11 g/plant, and TKS rubber yield from 197.6 to 563.6 g/plant. Sugar yield varied from 100.4 to 264.9 g/plant.

References / Литература

Allen S.G., Nakayama F.S., Dierig D.A., Rasnick B.A. Plant water relations, photosynthesis, and rubber content of young guayule plants during water stress. *Agronomy Journal*. 1987;79(6):1030-1035. DOI: 10.2134/agronj1987.00021962007900060016x

Arias M., Hernández M., Ritter E. How does water supply affect *Taraxacum koksaghyz* Rod. rubber, inulin and biomass production? *Industrial Crops and Products*. 2016;91:310-314. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.07.024

Bucks D.A., Nakayama F.S., French O.F., Rasnick B.A., Alexander W.L. Irrigated guayule – Plant growth and production. *Agricultural Water Management*. 1985;10(1):81-93. DOI: 10.1016/0378-3774(85)90036-8

Bucks D.A., Nakayama F.S., French O.F., Rasnick B.A., Alexander W.L., Powers D.E. Water management and production relations of mature guayule. In: *Annual Report of the U.S. Water Conservation Laboratory*. Phoenix, AZ: USWCL; 1985. p.165-169. Available from: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/53442000/AnnualReports/AnnualReportArchive/USWCL_AnnualReport_1985[OCR].pdf [accessed June 15, 2022].

Carr M.K.V. The water relations of rubber (*Hevea brasiliensis*): A review. *Experimental Agriculture*. 2012;48(2):176-193. DOI: 10.1017/S0014479711000901

Cornish K. Alternative natural rubber crops: Why should we care? *Technology and Innovation*. 2017;18(4):244-255. DOI: 10.21300/18.4.2017.245

Devakumar A.S., Gawai Prakash P., Sathik M.B.M., Jacob J. Drought alters the canopy architecture and micro-climate of *Hevea brasiliensis* trees. *Trees*. 1999;13(3):161-167. DOI: 10.1007/PL00009747

Ehrler W.L., Bucks D.A., Nakayama F.S. Relations among relative leaf water content, growth, and rubber accumulation in guayule. *Crop Science*. 1985;25(5):779-782. DOI: 10.2135/cropsci1985.0011183X0025000500013x

Fangmeier D.D., Samani Z., Garrot Jr. D., Ray D.T. Water effects on guayule rubber production. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 1985;28(6):1947-1950. DOI: 10.13031/2013.32546

Gomes A.R.S., Kozlowski T.T. Physiological and growth responses to flooding of seedlings of *Hevea brasiliensis*. *Biotropica*. 1988;20(4):286-293. DOI: 10.2307/2388318

Halford N.G., Curtis T.Y., Muttucumaru N., Postles J., Mottram D.S. Sugars in crop plants. *Annals of Applied Biology*. 2011;158(1):1-25. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2010.00443.x

Hammond B.L., Polhamus L.G. Technical Bulletin No. 1327. Research on guayule (*Parthenium argentatum*): 1942-1959. Washington, DC: USDA ARS; 1965. DOI: 10.22004/ag.econ.171251

Hanson A.D., Hitz W.D. Metabolic responses of mesophytes to plant water deficits. *Annual Review of Plant Physiology*. 1982;33(1):163-203. DOI: 10.1146/annurev.pp.33.060182.001115

Hsiao T.C., Acevedo E., Fereres E., Henderson D.W. Water stress, growth and osmotic adjustment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B. Biological Sciences.* 1976;273(927):479-500. DOI: 10.1098/rstb.1976.0026

Hunsaker D.J., Elshikha D.M. Surface irrigation management for guayule rubber production in the US desert Southwest. *Agricultural Water Management*. 2017;185:43-57. DOI: 10.1016/j.agwat.2017.01.015

Iljin W.S. Drought resistance in plants and physiological processes. *Annual Review of Plant Physiology.* 1957;8(1):257-274. DOI: 10.1146/annurev.pp.08.060157.001353

Kameli A., Löselδ D.M. Carbohydrates and water status in wheat plants under water stress. *New Phytologist*. 1993;125(3):609-614 DOI: 10.1111/j.1469-8137.1993.tb03910.x

Kirk R.E. Experimental design: procedures for the behavioral sciences. 4th ed. Newbury Park, CA: SAGE Publications, Inc.; 2013. DOI: 10.4135/9781483384733

Miyamoto S., Bucks D.A. Water quantity and quality requirements of guayule: Current assessment. *Agricultural Water Management*. 1985;10(3):205-219. DOI: 10.1016/0378-3774(85)90012-5

Nakayama F.S., Bucks D.A, Roth R.L., Gardner B.R. Guayule biomass production under irrigation. *Bioresource Technology*. 1991;35(2):173-178. DOI:10.1016/0960-8524(91)90026-G

Oki T., Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*. 2006;313(5790):1068-1072. DOI: 10.1126/science.1128845

Poorter H., Niklas K.J., Reich P.B., Oleksyn J., Poot P., Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist*. 2012;193(1):30-50. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x

R Core Team. The R project for statistical computing. R: a language and environment for statistical computing. Vienna; 2020. Available from: https://www.r-project.org/ [accessed May 26, 2022].

R Studio Team. R Studio: integrated development for R. Boston. MA: RStudio, Inc.; 2015. Available from: http://www.rstudio.com [accessed May 26, 2022].

Sinclair T.R., Tanner C.B., Bennett J.M. Water-use efficiency in crop production. *BioScience*. 1984;34(1):36-40. DOI: 10.2307/1309424

Taiz L., Zeiger E., Møller I.M., Murphy A. Plant physiology and development. 6th ed. Sunderland, CT: Sinauer Associates; 2015.

Vassiliev I.M., Vassiliev M.G. Changes in carbohydrate content of wheat plants during the process of hardening for drought resistance. *Plant Physiology*. 1936;11(1):115-125. DOI: 10.1104/pp.11.1.115

Veatch-Blohm M.E., Ray D.T., McCloskey W.B. Water-stress-induced changes in resin and rubber concentration and distribution in greenhouse-grown guayule. *Agronomy*. 2006;98(3):766-773. DOI: 10.2134/agronj2005.0203

Vörösmarty C.J., Green P., Salisbury J., Lammers R.B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science*. 2000;14;289(5477):284-288.

Information about the authors

Guang Shen, PhD, Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, No. 103, Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, shen19772@163.com, https://orcid.org/0000-0001-5320-6465

Fuyun Zheng, Master, Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, No. 103, Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, zhengfuyun@163.com, https://orcid.org/0000-0002-8966-5230

Lin Zhou, Master, Associate Researcher, Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, No. 103, Haping Road, Xiangfang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, 1016393991@qq.com, https://orcid.org 0000-0002-9695-417X

Xiangjun Zeng, Bachelor, Department of Science and Technology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin: No. 204, Zhongshan Street, Nangang District, Harbin, Heilongjiang Province, China, xiangjunzeng@126.com, https://orcid.org/0000-0002-2042-9969

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

Информация об авторах

Гуан Шень, доктор философии, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, № 103, shen19772@163.com, https://orcid.org/0000-0001-5320-6465

Фуюнь Чжэн, магистр, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, № 103, zhengfuyun@163.com, https://orcid.org/0000-0002-8966-5230

Линь Чжоу, магистр, младший научный сотрудник, Институт природных ресурсов и экологии Академии наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Сянфан, ул. Хапин, № 103, 1016393991@qq.com, https://orcid.org 0000-0002-9695-417X

Сянцзюнь Цзэн, бакалавр, Департамент науки и техники, Академия наук провинции Хэйлунцзян, Китай, провинция Хэйлунцзян, Харбин, район Наньган, ул. Чжуншань, № 204, xiangjunzeng@126.com, https://orcid.org/0000-0002-2042-9969

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

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The article was submitted on 30.11.2022; approved after reviewing on 12.10.2023; accepted for publication on 05.12.2023.
Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 05.12.2023.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 635.659:633.52
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-64-78

CC BY

Признаковая коллекция крупноплодного подсолнечника ВИР для селекции сортов и гибридов

В. А. Гаврилова[1], Л. Г. Макарова[1], Т. Г. Ступникова[2], Н. В. Алпатьева[1], Е. Б. Кузнецова[1], И. Н. Анисимова[1]

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

[2] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, Краснодарский край, Россия

Автор, ответственный за переписку: Гаврилова Вера Алексеевна, v.gavrilova@vir.nw.ru

Актуальность. В последние годы наблюдается увеличение доли использования семян подсолнечника в кондитерской и пищевой промышленности. В Государственном реестре селекционных достижений в 2023 г. среди 839 районированных сортов и гибридов подсолнечника значится 30 сортов и всего лишь 3 гибрида кондитерского направления. Таким образом, создание исходного материала для получения крупноплодных сортов и гибридов актуально.
Материалы и методы. Материалом исследования служили 90 образцов подсолнечника коллекции ВИР, выделившиеся по признаку крупности семян. Учитывали следующие признаки: масса 1000 семян, период «всходы – созревание», высота растения, диаметр корзинки, окраска и размер семянок, устойчивость к ложной мучнистой росе. Использовали ДНК-маркеры для выявления образцов – носителей гена *Rf1* и ЦМС.
Результаты. Лучшими по массе 1000 семян были образцы к-2818 (Приморский край), к-3633, к-3748, к-3782 (Китай), к-3578 (Украина). Подтвердили свою крупноплодность и сорта отечественной селекции 'Алексеевский крупноплодный 2' (к-3552), 'Гяр-гяр' (к-1589), 'СПК' (к-3426), 'Лакомка' (к-3526). Стерильный тип цитоплазмы выявили у 12 образцов. Диагностические маркеры ядерного гена *Rf1* (ORS511, HRG01 и HRG02) имели 14 образцов с фертильным типом цитоплазмы. В большинстве случаев это был маркер HRG02, и лишь у двух образцов с фертильным типом цитоплазмы (к-3805 и к-3864 из Китая) обнаружены все три маркера.
Заключение. Крупноплодные сорта селекции ВНИИМК 'СПК' и 'Лакомка', а также к-3782 из Китая были лучшими не только по признаку крупноплодности, но и по устойчивости к ложной мучнистой росе. В результате многолетних исследований создана признаковая коллекция по признаку крупноплодности, включающая 90 образцов, которые могут использоваться при селекции кондитерских сортов. Выделены крупноплодные образцы – носители гена *Rf1*, некоторые из них стали родоначальниками линий – доноров генов восстановления фертильности пыльцы и крупноплодности одновременно.

Ключевые слова: *Helianthus annuus*, масса 1000 семян, вегетационный период, высота растения, устойчивость к ложной мучнистой росе, маркер-опосредованный отбор

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0005 «Растительные ресурсы масличных и прядильных культур ВИР как основа теоретических исследований и их практического использования».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Ступникова Т.Г., Алпатьева Н.В., Кузнецова Е.Б., Анисимова И.Н. Признаковая коллекция крупноплодного подсолнечника ВИР для селекции сортов и гибридов. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):64-78. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-64-78

© Гаврилова В.А., Макарова Л.Г., Ступникова Т.Г., Алпатьева Н.В., Кузнецова Е.Б., Анисимова И.Н., 2023

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-64-78

The trait-specific collection of large-seeded sunflower at VIR: a source for breeding cultivars and hybrids

Vera A. Gavrilova[1], Larisa G. Makarova[1], Tatyana G. Stupnikova[2], Natalya V. Alpatieva[1], Elena B. Kusnetsova[1], Irina N. Anisimova[1]

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

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

Corresponding author: Vera A. Gavrilova, v.gavrilova@vir.nw.ru

Background. In recent years, an increase has been observed in the share of sunflower seeds in the confectionery and food industries. There are 30 cultivars and only 3 hybrids for confectionery use among 839 zoned sunflower cultivars and hybrids listed in the State Register for Selection Achievements Admitted for Usage in 2023. Thus, the development of source material for breeding large-seeded cultivars and hybrids remains a relevant task.
Materials and methods. The studied material included 90 accessions selected for their large seed size from VIR's sunflower collection. The following characters were assessed: 1000 seed weight, days from sprouting to maturation, plant height, head diameter, cypsela color and size, and resistance to downy mildew. DNA markers were used to identify accessions with the *Rf1* gene and CMS.
Results. Accessions k-2818 (Primorsky Territory), k-3633, k-3748, k-3782 (China), and k-3578 (Ukraine) were the best in 1000 seed weight. Russian cvs. 'Alekseyevsky Krupnoplodny 2' (k-3552), 'Gyar-Gyar' (k-1589), 'SPK' (k-3426), and 'Lakomka' (k-3526) confirmed their large seed size. The sterile type of cytoplasm was identified in 12 accessions. Fourteen accessions with fertile cytoplasm had diagnostic markers of the nuclear *Rf1* gene.
Conclusion. The large-seeded cultivars developed at VNIIMK, 'SPK', 'Lakomka', and k-3782 from China were the best not only in their large seed size but also in downy mildew resistance. As a result of long-term studies, a trait-specific collection was established for the large seed size trait. It included 90 accessions that can be used in the development of confectionery cultivars. Large-seeded sunflower accessions carrying the *Rf1* gene were identified. Some of them became the ancestors of donor lines for both pollen fertility restoration genes and large seed size.

Keywords: *Helianthus annuus*, 1000 seed weight, growing season, plant height, downy mildew resistance, marker-assisted selection

***Acknowledgements*:** the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0005 "Plant resources of oil and fiber crops at VIR as the basis for theoretical research and their practical utilization".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Gavrilova V.A., Makarova L.G., Stupnikova T.G., Alpatieva N.V., Kuznetsova E.B., Anisimova I.N. The trait-specific collection of large-seeded sunflower at VIR: a source for breeding cultivars and hybrids. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):64-78. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-64-78

Введение

Крупноплодный подсолнечник широко распространен в большинстве стран мира, пользуется спросом и на внутреннем рынке РФ (Fick, Miller, 1997; Tan A.S., Tan A., 2010; Bochkovoy et al., 2019; Hladni, Miladinović, 2019). Число сортов крупноплодного подсолнечника постоянно увеличивается. В 2017 г. в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию, занесено 23 сорта подсолнечника кондитерского направления (State Register…, 2017), в 2018 г. – 27 сортов (State Register…, 2018), тогда как в 2021 г. – уже 33 сорта и гибрида (State Register…, 2021). Такая же ситуация сохраняется и в 2023 г.: среди 839 районированных значится 30 сортов и всего лишь 3 гибрида кондитерского направления (State Register…, 2023). В последние годы спрос сельскохозяйственного производства на семена крупноплодного подсолнечника резко возрос. Такое повышение спроса связано с увеличением доли использования семян подсолнечника в кондитерской и пищевой промышленности. Ядра семян крупноплодного подсолнечника содержат 22–30% белка, отличаются пониженным содержанием масла и насыщенных жирных кислот, что способствует снижению уровня холестерина, имеют повышенное содержание железа и служат источником калия, цинка, витаминов Е и В1, пищевой клетчатки (Bochkovoy, Pivnenko, 2007; Hladni, Miladinović, 2019).

Крупноплодный подсолнечник отличается от сортов масличного использования высокой массой 1000 семян (более 90 г), повышенной лузжистостью. Все эти качества с успехом позволяют использовать ядра крупноплодного подсолнечника в кондитерских целях, заменяя дорогостоящие орехи, кунжут, арахис. Семена подсолнечника можно употреблять как традиционно – в жареном виде, так и для приготовления кондитерских изделий (козинаки, халва, добавка в муку, добавки к йогуртам, начинки для конфет). В России каждый год более 0,5 млн га отводится под посев крупноплодных сортов, в том числе более 120 тыс. га в Краснодарском крае (Bochkovoy et al., 2019).

В нашей стране существуют все предпосылки для селекции новых крупноплодных сортов и создания гибридов, поскольку стародавние сорта ‘Гигант’ и ‘Русский Мамонт’ послужили основой для популярных канадских сортов ‘Меннонит’, ‘Сандак’, ‘Коммандор’, ‘Мингрен’ (Seiler, Jan, 2010). Коллекция ВИР содержит образцы с массой 1000 семян больше 80 г. Масса 1000 семян является важнейшим показателем при отборе для селекции кондитерских сортов. Образцы с повышенной массой 1000 семян имеют хорошую обрушиваемость и высокий показатель лузжистости в связи с тем, что семена крупные и ядро неплотно прилегает к лузге, тем самым упрощая обрушивание (отделение ядра от лузги). Необходимо, чтобы новые сорта и гибриды подсолнечника кондитерского направления были устойчивы к различным патогенам. Одной из наиболее опасных болезней является ложная мучнистая роса (ЛМР), вызываемая грибом *Plasmopara halstedii* (Farl) Berl. & De Toni). Каждый год 30–70% урожая погибает в результате заражения растений этим патогеном (Gavrilova et al., 2021). Создание устойчивых к ЛМР отечественных сортов и гибридов крупноплодного подсолнечника позволит увеличить валовый сбор семян.

При создании промышленных гибридов подсолнечника масличного направления используется эффект гетерозиса, однако при получении линий для крупноплодных гибридов существуют определенные сложности, так как при самоопылении происходит снижение размеров семянок из-за инбредной депрессии. Таким образом, создание исходного материала для получения крупноплодных гибридов актуально. Использование маркер-опосредованной селекции ускоряет селекционный процесс. Так, на выявление источников гена восстановления фертильности пыльцы (*Rf*) уходит два года, а с использованием молекулярных маркеров – 3-4 недели. В настоящей работе представлены результаты всестороннего изучения кондитерского подсолнечника коллекции ВИР и новых зарубежных образцов для дальнейшего использования полученных данных при селекции крупноплодных сортов и гибридов.

Одной из главных задач создания исходного материала является постоянное пополнение идентифицированных коллекций по возможно большему числу важных для селекции признаков. Необходимый этап работы в этом направлении – формирование рабочих коллекций образцов по каждому селекционно ценному признаку. Детальное изучение образцов рабочих коллекций ведет к созданию признаковых коллекций. В каждую такую коллекцию следует включать две группы образцов: образцы с искомым уровнем признака и образцы, отражающие спектр внутривидового разнообразия по изучаемому признаку (Merezhko, 1984). В ВИР формирование коллекции крупноплодных образцов подсолнечника началось еще в 60–70-е годы прошлого столетия (Anashchenko, 1971) и продолжено нами.

Материал и методы

Исследования проводили на Кубанской опытной станции – филиале ВИР в 2019 и 2020 г. В исследовании использовали 90 образцов, среди которых были местные, стародавние формы и новые поступления. Оценивали такие признаки, как масса 1000 семян, продолжительность периода «всходы – созревание», высота растения, диаметр корзинки, размер семянок, устойчивость к ЛМР. Оценка массы 1000 семян проводилась у растений при свободном цветении. Посев осуществляли все три года изучения по одной методике: 70 × 70 см, по 2 растения в лунку, согласно методическим указаниям, разработанным в ВИР (Anashchenko, 1976).

Материалом исследования с использованием ДНК-маркеров служили 29 образцов крупноплодного подсолнечника различного происхождения; среди них 5 местных форм из Молдавии, Азербайджана и России (Приморский край), 15 образцов из Китая, 8 отечественных сортов. Фракции суммарной ДНК выделяли из зеленых листьев пятинедельных проростков, выращенных в теплице научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» в 2022 г. с использованием модифицированного СТАВ-протокола (Anisimova et al., 2018).

Диагностическими маркерами для идентификации гена восстановления фертильности *Rf1* служили STS-маркер orfH522 (Schnabel et al., 2008), а также ядерные маркеры: SSR-маркер ORS511 (Yue et al., 2010) и SCAR-маркеры HRG01 и HRG02 (Horn et al., 2019). Маркер orfH522 ассоциирован с митохондриальным аберрантным геном, специфичным для стерильной цитоплазмы PET1-типа. Этот маркер указывает на присутствие доминантного аллеля гена восстановления фертильности *Rf1* в генотипе фертильной линии, имеющей цитоплазмон стерильного типа. Маркеры ORS511, HRG01 и HRG02 картированы в группе сцепления 13 и тесно сцеплены с доминантным аллелем ядерного гена *Rf1* (Anisimova et al., 2021).

При проведении ПЦР пользовались протоколом, рекомендованным разработчиками праймеров. Продукты амплификации разделяли электрофорезом в 2-процентном агарозном геле. Реактивы были получены от фирм «Хеликон», «Евроген», «Диалат».

Результаты и обсуждение

На основе анализа 2285 образцов коллекции ВИР по признаку крупности семян создана признаковая коллекция крупноплодного подсолнечника, включающая 90 образцов, которые на протяжении трех лет демонстрировали массу 1000 семян свыше 90 граммов. По результатам наблюдений в 2019 г. (табл. 1) 15 образцов имеют массу 1000 семян 90–100 г и 29 образцов – массу 1000 семян > 100 г. Самые высокие показатели крупносемянности отмечены у образцов из Китая. Среди отечественных сортов и стародавних образцов с показателем массы 1000 семян более 100 г можно выделить к-474, Армения (103 г); к-1589, 'Гяр-гяр', Армения (113 г); к-2219, Армения (161 г); к-2835 (101 г), к-2836 (115 г) и к-2843, Приморский край (110 г); к-3426, 'СПК', ВНИИМК (166 г); к-3526 'Лакомка', ВНИИМК (120 г); к-3578, Украина (150 г). В 2020 г. (см. табл. 1) выявлено 6 образцов с массой 1000 семян 80–100 г и 20 образцов с массой > 100 г. Хорошие показатели обнаружились у новых образцов китайского происхождения. Отечественные сорта 'Гяр-гяр', 'СПК', 'Лакомка' и в 2020 г. сохранили высокую массу 1000 семян: 95, 121 и 113 г соответственно. Для сравнения: у стандартного сорта 'Мастер' (к-3553) в 2019 г. масса 1000 семян составила 84 г, а в 2020 г. – 56 г. Подтвердили свою крупноплодность в 2020 г. и сорта отечественной селекции 'Алексеевский крупноплодный 2' (к-3552), 'Гяр-гяр', 'СПК', 'Лакомка'. Устойчивые показатели по массе 1000 семян демонстрировали образцы к-2818, Приморский край; к-3748, Китай; и-623863, Китай; к-3633, Китай; к-3578, Украина. Не все образцы в 2019 и 2020 г. показали сходные результаты. Отечественный сорт 'Саратовский 82' (к-3541) не сохранил крупноплодность: масса 1000 семян с 81 г в 2019 г. снизилась до 55 г в 2020 г. Такая же картина наблюдалась и с другими образцами: к-744, Саратовская обл. (в 2019 г. масса была 97 г, а в 2020 г. – 48 г); к-3751, Китай (в 2019 г. – 96 г, в 2020 г. – 40 г); к-2849, Приморский край (в 2019 г. – 117 г, в 2020 г. – 50 г); к-2835, Приморский край (в 2019 г. – 101 г, в 2020 г. – 77 г).

Проведена оценка крупноплодных образцов по устойчивости к *P. halstedii*. В признаковую коллекцию включены образцы, демонстрирующие крупноплодность в течение ряда лет и устойчивость к ЛМР в 2019–2020 гг.

Большинство изученных образцов характеризуются крупной корзинкой – около 20 см в диаметре (см. табл. 1), причем у стародавних образцов этот признак отмечен как слабоварьирующий (CV = 6,1–10,4%). Невысокий коэффициент вариации характерен и для высоты растения в оба года исследования. В нашу признаковую коллекцию, кроме высокорослых (200–228 см), включены образцы с высотой растения от 132 до 150 см: местный из Армении (к-474); 'Гяр-гяр'; местный из Приморского края (к-2835); местный из Азербайджана (к-3150); 'Саратовский 82', 'Sprout-2' (к-3865). Образец к-2835 с массой 1000 семян 101 г в 2019 г. отличается не только низкой высотой растения и небольшим коэффициентом ее варьирования, но и коротким межфазным периодом «всходы – созревание». Для большинства образцов продолжительность периода «всходы – созревание» составляла 92–114 дней.

Для того чтобы проследить, не утрачен ли признак крупноплодности в результате последовательных пересевов на протяжении нескольких лет, нами были отобраны шесть образцов, которые изучались в 2008, 2009 и 2010 г. (Gavrilova et al., 2015). Масса 1000 семян варьировала в зависимости от года репродукции, но существенного снижения величины не обнаружилось (табл. 2). Только у китайского образца к-3633 ('c.03002') масса 1000 семян упала с 247 г в 2008 г. до 132 г в 2020 г. У этих шести образцов обнаружилась тенденция понижения массы 1000 семян в 2020 г. по сравнению с 2019 г. Следует отметить, что сорт 'СПК' показал в 2019 г. более высокий результат по массе 1000 семян (130 г) по сравнению с 2008 г. (113 г). Сорт 'СПК' является самым распространенным сортом крупноплодного подсолнечника отечественной селекции, что позволяет использовать его как в кондитерском направлении, так и в качестве высокомасличного сырья (Bochkovoy et al., 2019). Сорт отечественной селекции 'Лакомка' тоже может быть использован для дальнейшей работы, так как он в 2019 и 2020 г. не утратил своей крупноплодности (126 г и 113 г соответственно).

Для того чтобы выяснить зависимость между такими важнейшими признаками, как масса 1000 семян, продолжительность периода «всходы – созревание», высота растений и диаметр корзинки, нами был проведен корреляционный анализ для образцов, изучавшихся в 2019 и 2020 г. (табл. 3), которые имеют массу 1000 семян ≥ 80 г.

В 2019 г. установлена незначительная положительная корреляция между признаками: высота растения / «всходы – созревание» (0,40), «всходы – созревание» / масса 1000 семян (0,57), диаметр корзинки / масса 1000 семян (0,60) и диаметр корзинки / «всходы – созревание» (0,35). В 2020 г. также выявлена умеренная положительная корреляция между признаками: высота растения / «всходы – созревание» (0,53) и диаметр корзинки / масса 1000 семян (0,45). Отсутствие значимых корреляций между указанными признаками говорит о том, что крупноплодные формы не обязательно должны быть высокорослыми и позднеспелыми.

Для получения новых сортов и гибридов крупноплодного подсолнечника необходимо учитывать не только визуальную оценку размера семянки, но и выполненность семени, так как не всегда крупный размер семянки говорит о том, что ядро крупное (табл. 4). Содержание крупного ядра необходимо для использования подсолнечника в кондитерских целях, поскольку именно ядро является ценным источником витаминов и минералов и может быть использовано для изготовления различных пищевых изделий. Для того чтобы определить выполненность семянки, необходимо обрушить семена, однако такой способ приводит к потере всхожести семени. В связи с этим была применена рентгеноскопия как метод прижизненной оценки выполненности семян крупноплодного подсолнечника. При помощи рентгеноскопии сделаны снимки семянок и их внутреннего содержания (ядра). Выполненность в нашем исследовании – это отношение общей площади семянки к площади ядра (Gavrilova et al., 2014).

Как видно их таблицы 4, крупные семянки (площадь 4,026 условных единиц) образца к-3516 ('Запорожский кондитерский') имеют такую же выполненность (39,78%), как у образца к-2843 (Приморский край), который при площади семянки 2,44 условных единиц выполнен на 39,89%. Интересные результаты показал сорт 'Мастер'. Этот сорт является стандартом и относится к мас-

Таблица 1. Характеристика образцов крупноплодного подсолнечника по хозяйственно ценным признакам
(Краснодарский край, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, 2019–2020 гг.)

Table 1. Characteristics of useful agronomic characters in large-seeded sunflower accessions
(Kuban Experiment Station of VIR, Krasnodar Territory, 2019–2020)

№ по каталогу ВИР	Образец, происхождение	Масса 1000 семян (г)		«Всходы – созревание» (дни)		Высота растения (см)				Диаметр корзинки (см)			
		2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.	2019 г.		2020 г.		2019 г.		2020 г.	
						Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%
474	Армения	103	–	92	102	144 ± 3,8	8,2	132 ± 3,1	7,4	23 ± 1,5	20,9	18 ± 0,4	6,9
744	Россия, Саратовская обл.	97	48	91	99	184 ± 8,7	12,5	184 ± 8,7	4,3	20 ± 1,8	24,1	18 ± 1,2	21,9
1589	‘Гяр-гяр’, Армения	113	95	97	103	153 ± 3,0	6,1	164 ± 2,1	4,0	21 ± 0,4	6,1	16 ± 0,5	10,4
1833	Молдавия	88	70	92	102	158 ± 1,8	3,5	138 ± 2,4	5,5	20 ± 0,6	9,1	15 ± 0,7	13,8
2006	Россия, Приморский край	–	116	93	105	139 ± 5,9	11,2	193 ± 2,8	4,6	19 ± 0,8	11,5	21 ± 1,5	22,8
2219	Армения	161	–	98	106	200 ± 3,9	6,2	196 ± 3,7	5,9	28 ± 0,7	7,3	21 ± 1,7	26,3
2818	Россия, Приморский край	93	108	94	94	156 ± 3,2	6,4	159 ± 4,3	8,6	18 ± 0,7	11,2	18 ± 0,9	15,3
2835	Россия, Приморский край	101	77	79	95	150 ± 4,3	9,1	156 ± 3,7	7,6	13 ± 0,4	10,3	15 ± 1,0	22,7
2836	Россия, Приморский край	115	–	98	110	186 ± 10,3	14,6	228 ± 8,6	11,9	23 ± 3,8	26,4	23 ± 1,1	15,1
2843	Россия, Приморский край	110	–	99	111	186 ± 11,2	19,0	206 ± 2,3	3,5	21 ± 0,7	9,9	19 ± 1,1	17,8
2849	Россия, Приморский край	80	50	96	105	159 ± 3,6	7,2	176 ± 3,1	5,6	16 ± 0,8	16,3	12 ± 0,7	17,6
3147	Азербайджан	90	–	98	108	166 ± 3,2	6,0	187 ± 2,6	4,4	17 ± 0,9	15,7	17 ± 1,2	21,7
3150	Азербайджан	93	–	95	106	148 ± 1,1	2,4	150 ± 1,1	2,2	18 ± 0,5	9,0	19 ± 1,2	20,0
3426	‘СПК’, Россия, ВНИИМК	166	121	118	111	166 ± 15,4	20,8	203 ± 3,4	5,3	19 ± 2,2	25,4	23 ± 0,9	12,1
3516	‘Запорожский кондитерский’, Украина, Украинский НИИ масличн. культур	113	–	94	112	189±4,8	7,2	183 ± 7,1	11,6	21 ± 0,7	8,6	21 ± 1,1	15,5
3526	‘Лакомка’, Россия, ВНИИМК	120	113	95	105	186 ± 1,9	2,7	207 ± 3,3	5,0	23 ± 0,6	7,3	25 ± 1,2	15,9

Таблица 1. Продолжение
Table 1. Continued

№ по каталогу ВИР	Образец, происхождение	Масса 1000 семян (г)		«Всходы – созревание» (дни)		Высота растения (см)				Диаметр корзинки (см)			
		2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.	2019 г.		2020 г.		2019 г.		2020 г.	
						Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%
3541	'Саратовский 82', Россия, Саратов, НИИСХ Юго-Востока	81	55	76	87	114 ± 1,4	3,8	126 ± 3,0	7,6	19 ± 1,0	16,3	15 ± 1,6	34,8
3552	'Алексеевский крупноплодный 2', Россия, Белгородская обл.	91	89	93	110	214 ± 3,5	5,2	206 ± 1,9	2,9	18 ± 0,5	8,9	19 ± 0,7	11,9
3553	'Мастер', Россия, ВНИИМК	84	56	98	104	185 ± 5,2	8,8	197 ± 3,5	5,5	19 ± 0,8	13,8	22 ± 1,0	15,0
3578	Украина	150	105	99	117	198 ± 6,4	9,1	223 ± 3,7	5,3	20 ± 0,8	10,7	22 ± 0,6	8,2
3633	'с.03002', Китай	185	132	107	119	216 ± 2,1	3,0	237 ± 4,7	6,2	22 ± 0,9	13,0	19 ± 0,8	12,9
3726	Китай	–	81	98	106	136 ± 5,5	12,8	155 ± 5,5	11,2	15 ± 0,9	17,6	20 ± 1,7	26,8
3740	Китай	95	–	92	111	175 ± 5,4	9,8	151 (1 раст.)	–	23 ± 0,7	10,2	21 (1 раст.)	–
3741	Китай	174	–	98	119	212 ± 4,3	5,4	173 ± 13,1	18,6	22 ± 0,9	11,1	17 ± 1,1	16,7
3742	Китай	80	–	98	95	165 ± 2,2	4,2	159 ± 1,0	1,2	17 ± 0,8	14,3	16 ± 0,8	9,5
3744	Китай	125	–	116	111	218 ± 5,8	7,5	198 ± 6,1	9,2	21 ± 0,7	9,9	23 ± 1,3	17,4
3745	Китай	115	–	107	111	180 ± 2,8	4,7	167 ± 1,7	3,2	23 ± 0,8	10,5	20 ± 1,2	19,5
3748	Китай	98	104	98	105	161 ± 1,4	2,8	162 ± 1,7	3,3	18 ± 0,9	16,0	21 ± 0,8	12,0
3751	Китай	96	158	98	114	165 ± 4,5	7,7	167 ± 3,5	16,7	21 ± 1,3	17,7	21 ± 1,4	21,7
3753	'Хейлундзянский 2', Китай	89	–	109	108	221 ± 6,6	8,9	183 ± 2,6	4,5	16 ± 1,0	18,5	15 ± 0,6	12,7
3803	Китай	112	–	107	115	187 ± 4,8	7,7	181 ± 1,5	2,7	21 ± 0,9	12,2	19 ± 0,8	13,7
3804	Китай	–	82	114	114	188 ± 4,9	5,8	191 ± 3,1	5,2	15 ± 1,4	20,8	16 ± 0,6	12,9
3805	Китай	148	138	112	109	189 ± 3,9	6,5	190 ± 5,4	9,0	19 ± 1,4	24,2	20 ± 0,8	12,2

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

№ по каталогу ВИР	Образец, происхождение	Масса 1000 семян (г)		«Всходы – созревание» (дни)		Высота растения (см)				Диаметр корзинки (см)			
		2019 г.	2020 г.	2019 г.	2020 г.	2019 г.		2020 г.		2019 г.		2020 г.	
						Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%	Xm ± Se	CV%
3864	'Sprout-1', Китай	130	–	103	109	217 ± 5,2	7,5	225 ± 5,6	7,8	24 ± 1,0	12,6	22 ± 0,6	9,1
3865	'Sprout-2', Китай	193	–	104	109	146 ± 3,2	7,0	164 ± 6,4	12,4	30 ± 0,8	8,9	23 ± 1,3	17,9
3866	'Sprout-3', Китай	180	–	112	112	166 ± 1,3	2,4	162 ± 3,3	6,5	20 ± 0,3	4,7	24 ± 1,2	16,1
3868	'LSK-15', Китай	125	–	114	109	187 ± 4,8	7,2	183 ± 5,3	8,8	29 ± 1,2	12,0	24 ± 0,6	7,7
3869	'SF 01', Китай	178	–	99	101	159 ± 4,4	8,8	143 ± 10,8	15,1	24 ± 1,3	16,7	18 ± 4,2	48,1
3870	'5009 (№3)', Китай	183	–	109	97	153 ± 5,7	11,8	134 ± 6,0	14,3	23 ± 0,6	7,1	19 ± 0,5	8,9
3874	Китай	–	199	–	107	–	–	208 ± 2,9	4,4	–	–	25 ± 0,8	9,7
3875	Китай	–	160	–	110	–	–	197 ± 2,4	3,8	–	–	24 ± 0,7	9,6
3876	Китай	–	75	114	97	211 ± 4,1	3,9	171 ± 6,7	9,6	17 ± 1,2	14,4	12 ± 0,6	12,2
3877	Китай	138	128	93	108	180 ± 3,6	6,3	181 ± 11,0	8,6	19 ± 0,5	8,5	18 ± 5,0	39,3
3878	'JS-33', Китай	117	108	98	104	149 ± 3,2	6,7	145 ± 2,7	5,9	18 ± 0,7	13,4	14 ± 0,8	18,7
3879	'LSK-14', Китай	198	158	109	109	197 ± 2,0	3,2	190 ± 5,1	7,1	25 ± 0,8	9,6	23 ± 1,3	14,6
3782	Китай	89	85	93	107	167 ± 3,6	6,5	160 ± 4,2	8,2	19 ± 0,5	8,0	17 ± 0,6	11,0
3875	Китай	–	154	–	110	–	–	197 ± 2,4	3,8	–	–	24 ± 0,7	9,6
3887	Китай	251	–	–	111	–	–	203 ± 15,0	19,5	–	–	20 ± 0,6	8,4

Примечание: «–» – данные отсутствуют; Xm – среднее значение признака; Se – ошибка среднего
Note: "–" means that data are unavailable; Xm is the character's mean value; Se is the error of the mean

Таблица 2. **Характеристика образцов по признаку «масса 1000 семян»**
(Краснодарский край, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, 2008–2010, 2019, 2020 г.)

Table 2. **Description of accessions according to their 1000 seed weight**
(Kuban Experiment Station of VIR, Krasnodar Territory, 2008–2010, 2019, and 2020)

№ по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Масса 1000 семян (г) по годам				
			2008 г.	2009 г.	2010 г.	2019 г.	2020 г.
1589	‘Гяр-гяр’	Армения	131	95	110	113	95
2835	Местный	Россия, Приморский край	75	79	112	101	77
3426	‘СПК’	Россия, ВНИИМК	113	114	118	130	121
3578	Местный	Украина	107	92	100	150	105
3526	‘Лакомка’	Россия, ВНИИМК	103	92	123	126	113
3633	‘c.03002’	Китай	247	171	133	185	132

Таблица 3. **Корреляция признаков крупноплодных образцов подсолнечника с массой 1000 семян ≥ 80 г**
(2019, 2020 г.)

Table 3. **Correlations among the characters in large-seeded sunflower accessions with the 1000 seed weight ≥ 80 g**
(2019 and 2020)

Признак	Масса 1000 семян, г	«Всходы – созревание», дни	Высота растения, см
Межфазный период «всходы – созревание», дни	0,57 / 0,17		
Высота растения, см	0,24 / –0,07	0,40 / 0,53	
Диаметр корзинки, см	0,60 / 0,45	0,35 / 0,10	0,30 / 0,29

Таблица 4. **Характеристика образцов подсолнечника по размеру и выполненности семянки**
(по: Gavrilova et al., 2014)

Table 4. **Description of sunflower accessions according to their cypsela size and plumpness**
(from Gavrilova et al., 2014)

№ по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Площадь плода, у. е.^{2}	Выполненность, %
3633	‘c.03002’	Китай	3,091	41,36
1589	‘Гяр-гяр’	Армения	3,473	40,30
1833	местный	Молдавия	2,119	43,21
2818	местный	Приморский край	2,704	47,09
2835	местный	Приморский край	2,855	46,89
2836	местный	Приморский край	2,809	38,83
2843	местный	Приморский край	2,441	39,89
3426	‘СПК’	ВНИИМК	3,226	49,08
3516	‘Запорожский кондитерский’	Украина	4,026	39,78
3716	‘Орешек’	ВНИИМК	3,172	62,03
3717	‘Белоснежный’	ВНИИМК	3,252	49,98
3719	‘Баловень’	ВНИИМК	4,420	64,46
3727	местный	Китай	6,783	19,75
3744	местный	Китай	5,212	30,08
3750	местный	Казахстан	3,879	46,02

Примечание: у. е.^{2} – площадь ядра в условных единицах

Note: у. е.^{2} is the kernel area in conventional units

личному типу использования, но при небольшой площади плода (2,269 условных единиц) имеет высокий процент выполненности – 55,37%. Таким образом, его также можно будет использовать в отборе исходного материала для селекции кондитерского подсолнечника по этому признаку. В связи с этим необходимо вести отбор с учетом не только размера семянки, но и ее выполненности, а также устойчивости к ЛМР.

Наиболее перспективны для селекции сорта 'СПК', 'Лакомка', 'Гяр-гяр' как источники по признакам крупноплодности, устойчивости к ЛМР и выполненности; сорт 'Мастер' – как источник выполненности семени. Китайские образцы интересны именно своей крупноплодностью и устойчивостью к ЛМР, а также светлой и полосатой окраской семянки, так как в соответствии с мировыми стандартами семена сортов и гибридов подсолнечника кондитерского направления должны иметь светлую, белую или полосатую окраску (Puzikov, Suvorova, 2013). В России же семянки крупноплодного подсолнечника имеют в основном черную окраску и меньший размер, поэтому крупноплодные и светлоокрашенные образцы из Китая могут быть использованы для селекции сортов и создания гибридов кондитерского подсолнечника, соответствующих международным стандартам.

Нами неоднократно предпринимался поиск носителей гена восстановления фертильности пыльцы *Rf1* среди крупноплодных образцов признаковой коллекции ВИР. В данной работе с помощью диагностических молекулярных маркеров orfH522, ORS511, HRG01 и HRG02 выполнили скрининг выборки из 30 крупноплодных образцов подсолнечника и идентифицировали носителей стерильного типа цитоплазмы и молекулярных маркеров гена *Rf1*.

Диагностический фрагмент, полученный при амплификации маркера orfH522, специфичного для ассоциированного с ЦМС PET1 митохондриального гена, имел длину 516 пн. Размеры SSR-маркера ORS511, а также SCAR-маркеров HRG01 и HRG02, сцепленных с доминантным аллелем ядерного гена *Rf1*, составили соответственно 159, 434 и 740 пн. Стерильный (PET1) тип цитоплазмы диагностирован у 10 образцов (рисунок), в том числе у девяти образцов из Китая (шесть китайских образцов имели фертильный тип цитоплазмы). О наличии генов восстановления фертильности пыльцы в генотипе могут свидетельствовать ядерные молекулярные маркеры, тесно сцепленные с доминантным аллелем гена *Rf1*. У восьми образцов со стерильным типом цитоплазмы обнаружены один, два или три диагностических ядерных маркера гена *Rf1*. Четырнадцать из 20 образцов с фертильным типом цитоплазмы имели маркеры ядерного гена *Rf1*. В большинстве случаев это был маркер HRG02, и лишь у двух образцов с фертильным типом цитоплазмы (к-3805 и к-3864 из Китая) были обнаружены все три маркера: ORS511, HRG01 и HRG02. В коллекции ВИР имеется линия – восстановитель фертильности пыльцы ВИР740 с фертильным типом цитоплазмы и аналогичным профилем маркера. Среди шести изученных местных форм крупноплодного подсолнечника потенциальные носители гена *Rf1* обнаружены у трех образцов. Все местные образцы имели цитоплазмон фертильного типа. У двух из них выявили маркер HRG02, имеющий ограниченную диагностическую ценность для идентификации фертильного плазмотипа (Horn et al., 2019). Таким образом, выявленные в результате молекулярного скрининга образцы со стерильным типом цитоплазмы, а также образцы с фертильным типом, обладающие маркерами гена *Rf1*, можно рассматривать как перспективные источники для создания исходного материала для селекции крупноплодного подсолнечника.

Аналогичный молекулярный скрининг признаковой коллекции других крупноплодных образцов был проведен в 2011–2012 гг. (Gavrilova et al., 2015). Образцы, у которых выявили наличие маркера гена *Rf1* в генотипе, скрещивались с линиями ЦМС в полевых условиях. Результаты анализа восстановления фертильности пыльцы у гибридов первого поколения показали полное совпадение с результатами молекулярного скрининга.

Из крупноплодных образцов, обладающих геном *Rf1* и генами автофертильности, получены линии десятого поколения инбридинга, которые являются донорами признаков восстановления фертильности пыльцы, крупноплодности и устойчивости к ЛМР (табл. 5). Из некоторых образцов получена не одна линия; например, из образца к-3619 (США) созданы четыре линии, различающиеся по высоте растения, окраске и крупности семян. Линии-доноры имеют несколько меньшую массу 1000 семян, но при скрещивании в качестве отцовской формы с крупноплодной линией ЦМС ВИР106 показывают повышение массы семян до 90–135 г (табл. 6).

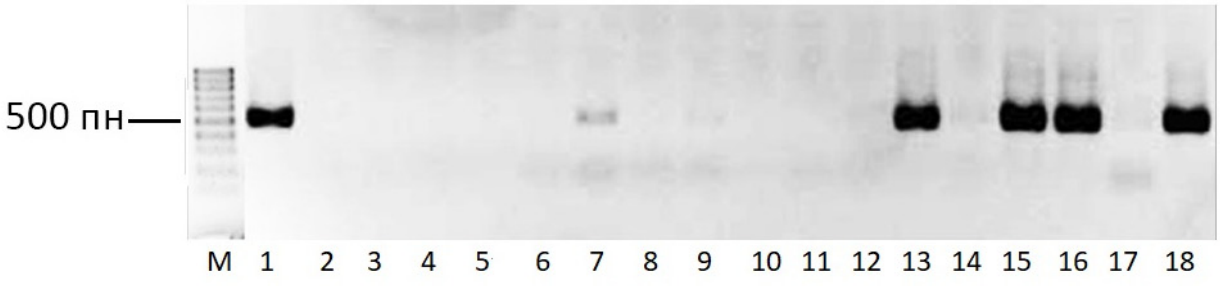


Рисунок. Идентификация плазмотипа (фертильный – *F*, стерильный PET1 – *S*) с помощью маркера orfH522 у образцов крупноплодного подсолнечника: 1 – к-3740 (***S***); **2** – к-1833 (***F***); **3** – к-2818 (***F***); **4** – к-2836 (***F***); **5** – к-2843 (***F***); **6** – к-2849 (***F***); **7** – к-3868 (***S***); **8** – к-3744 (***F***); **9** – к-3805 (***F***); **10** – к-3864 (***F***); **11** – к-3898 (***F***); **12** – к-3888 (***F***); **13** – к-3875 (***S***); **14** – к-3426 (***F***); **15** – к-3865 (***S***); **16** – к-3878 (***S***); **17** – к-3866 (***F***); **18** – к-3881 (***S***).
M – маркер молекулярного веса ДНК 100 bp («Диалат»)

Figure. Identification of the type of cytoplasm with the orfH522 marker among large-seeded sunflower accessions (*F* – fertile; *S* – sterile PET1): 1 – k-3740 (***S***); **2** – k-1833 (***F***); **3** – k-2818 (***F***); **4** – k-2836 (***F***); **5** – k-2843 (***F***); **6** – k-2849 (***F***); **7** – k-3868 (***S***); **8** – k-3744 (***F***); **9** – k-3805 (***F***); **10** – k-3864 (***F***); **11** – k-3898 (***F***); **12** – k-3888 (***F***); **13** – k-3875 (***S***); **14** – k-3426 (***F***); **15** – k-3865 (*S*); **16** – k-3878 (***S***); **17** – k-3866 (***F***); **18** – k-3881 (***S***).
M is the 100 bp DNA molecular weight marker (Dialat)

Таблица 5. **Результаты молекулярного скрининга крупноплодных образцов подсолнечника**
Table 5. **Molecular screening results for large-seeded sunflower accessions**

№ по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Наличие orfH522 / тип цитоплазмы	Наличие маркера			Наличие доминантного аллеля *Rf1*
				ORS511	HRG01	HRG02	
1833	местный	Молдавия	– / F	–	–	–	–
2818	«	Россия, Приморский край	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
2836	«	Россия, Приморский край	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
2843	«	Россия, Приморский край	– / F	–	–	–	_
2849	«	Россия, Приморский край	– / F	–	–	–	_
3150	«	Азербайджан	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
3553	‘Мастер’	Россия, ВНИИМК	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
3744	местный	Китай	– / F	–	+	+	+
3805	«	Китай	– / F	+	+	+	+
3864	‘Sprout-1’	Китай	– / F	+	+	+	+
3866	‘Sprout-3’	Китай	– / F	–	–	+	+
3898	‘Куманек’	Россия, Краснодарский край	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
3888	‘Битюг’	Россия, НИИСХ им. Докучаева	– / F	–	–	–	–
3895	‘Победа’	Россия, Челябинская обл.	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
3893	‘Мартин Классик’	Россия, ООО «Генофонд»	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
3894	‘Гамбит’	Россия, ООО «Генофонд»	– / F	–	–	+	Интерпретация затруднена
3886	‘Караван’	Россия, ВНИИМК	– / F	–	–	–	-

Таблица 5. Окончание

Table 5. The end

№ по каталогу ВИР	Образец	Происхождение	Наличие orfH522 / тип цитоплазмы	Наличие маркера			Наличие доминантного аллеля *Rf1*
				ORS511	HRG01	HRG02	
3869	‘SF-01’	Китай	– / F	–	–	–	-
3877	местный	Китай	– / F	–	нд	+	Интерпретация затруднена
3426	‘СПК’	Россия, ВНИИМК	– / F	–	нд	–	Интерпретация затруднена
3740	местный	Китай	+ / S	+	+	+	+
3742	«	Китай	+ / S	+	+	–	+
3745	«	Китай	+ / S	+	+	+	+
3865	‘Sprout-2’	Китай	+ / S	–	–	–	+
3868	‘LSK-15’	Китай	+ / S	+	–	–	+
3875	местный	Китай	+ / S	–	–	+	+
3881	«	Россия, маг. «Пятерочка», СПб	+ / S	–	–	–	+
3874	«	Китай	+ / S	–	–	+	+
3878	‘JS-33’	Китай	+ / S	–	нд	–	+
3879	‘LSK-114’	Китай	+ / S	–	+	+	+

Примечание: «+» – наличие маркера; «–» – его отсутствие; нд – данные отсутствуют; F – фертильный тип цитоплазмы; S – стерильный тип цитоплазмы

Note: “+” means the marker’s presence; “–” means its absence; “нд” means that data are unavailable; F is the fertile cytoplasm type; S is the sterile cytoplasm type

Таблица 6. **Характеристика крупноплодных сортов подсолнечника и полученных из них линий**
(Краснодарский край, Кубанская опытная станция – филиал ВИР)

Table 6. **Description of large-seeded sunflower cultivars and the lines obtained from them**
(Kuban Experimental Station of VIR, Krasnodar Territory)

Сорт / № по каталогу ВИР	Происхождение	Частота гена *Rf* (%)	Окраска семян	Масса 1000 семян, среднее за 2008–2010 гг., г	Название линии / № по каталогу ВИР	Частота гена *Rf* (%)	Окраска семян	Масса 1000 семян, 2020 г., г	Масса 1000 семян F_1 от скрещивания с ВИР106, 2020 г., г
‘Лакомка’ / к-3526	Россия, Краснодар	33,3	темные с серыми полосками	106 ± 9,0	ВИР 850 / к-3780	100	рыжие с белыми полосками	106	–
					ВИР 847 / к-3778	100	серые с белыми полосками	89	101
к-3619	США, Северная Дакота	90,9	полосатые светло-серые	10 0± 11,2	ВИР 846 / 3683	100	серые с белыми полосками	109	135
					ВИР 855 / к-3781	100	темные с белыми полосками	110	122
					ВИР 858 / к-3755	100	серые с белыми полосками	109	129
					ВИР 848 / к-3729	100	серые	90	114
к-3583	Аргентина	90,0	серые с белыми полосками	111 ± 13,5	ВИР 849 / к-3779	100	серые с черными полосками	107	90
					ВИР 859 / 3783	100	серые с белыми полосками	80	–
к-3581	Украина	50	черные полосатые	103 ± 3,0	ВИР 860 / к-3784	100	коричневые с белыми полосками	90	112
					ВИР861 / к-3787	100	темно-серые	89	–

Заключение

Признаковая коллекция крупноплодного подсолнечника, включающая 90 образцов, призвана служить ценным материалом для селекции отечественных сортов и гибридов кондитерского направления. Среди исследованного материала особый интерес представляют 57 самых крупноплодных, устойчивых к ложной мучнистой росе образцов, в числе которых сорта 'Саратовский 82' (к-3541), 'Алексеевский крупноплодный 2' (к-3552), 'Тяргяр' (к-1589), 'Запорожский кондитерский' (к-3516). Созданные нами линии – доноры крупноплодности и генов восстановления фертильности пыльцы – могут использоваться в качестве отцовских форм при получении промышленных гибридов. Нами выявлены ранние (к-2835), низкорослые (к-1589, к-2835, к-3865) образцы и лучшие по всем изученным признакам и массе 1000 семян, пригодные как исходный материал при создании сортов. Создана оценочная база данных. В результате корреляционного анализа установлено, что на массу 1000 семян большое влияние оказывают длина и ширина семянки и не влияет толщина. С помощью диагностических молекулярных маркеров orfH522, ORS511, HRG01 и HRG02 выполнен скрининг выборки из 35 крупноплодных образцов подсолнечника и идентифицированы носители стерильного типа цитоплазмы и гена восстановления фертильности пыльцы *Rf1*. Образцы к-3879 (LSK-114), к-3878, к-3875, к-3868 ('LSK-15'), к-3865 ('Sprout-2'), к-3745, к-3742, к-3740 (местный), к-3874 со стерильным плазмотипом и образцы к-3864 и к-3805, имеющие фертильную цитоплазму, но обладающие диагностическими маркерами ядерного гена *Rf1*, перспективны для создания нового исходного материала для селекции гибридов крупноплодного подсолнечника.

References / Литература

Anashchenko A.V. Guidelines for the study of the world collection of oil crops. Issue II. Sunflower (Metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu mirovoy kollektsii maslichnykh kultur. Vypusk II. Podsolnechnik). G.G. Davidyan (ed.). Leningrad: VIR; 1978. [in Russian] (Анащенко А.В. Методические указания по изучению мировой коллекции масличных культур. Выпуск II. Подсолнечник / под ред. Г.Г. Давидяна. Ленинград: ВИР; 1978).

Anashchenko A.V. Long-fruited sunflower of Transcaucasia (Dlinnoplodny podsolnechnik Zakavkazya). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1971;45(2):122-128. [in Russian] (Анащенко А.В. Длинноплодный подсолнечник Закавказья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1971;45(2):122-128).

Anisimova I.N., Alpatieva N.V., Abdullaev R.A., Karabitsina Yu.I., Kuznetsova E.B. Screening of plant genetic resources with the use of DNA markers: basic principles, DNA isolation, PCR setup, agarose gel electrophoresis: (guidelines). E.E. Radchenko (ed.). St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Анисимова И.Н., Алпатьева Н.В., Абдуллаев Р.А., Карабицина Ю.И., Кузнецова Е.Б. Скрининг генетических ресурсов растений с использованием ДНК-маркеров: основные принципы, выделение ДНК, постановка ПЦР, электрофорез в агарозном геле: (методические указания) / под ред Е.Е. Радченко. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-81-8

Anisimova I.N., Karabitsina Yu.I., Alpatieva N.V., Kuznetsova E.B., Titov N.V., Lyutko A.Yu., Gavrilova V.A. Diagnostic value of *Rf1* gene molecular markers in sunflower. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(2):28-37. [in Russian] (Анисимова И.Н., Карабицина Ю.И., Алпатьева Н.В., Кузнецова Е.Б., Титов Н.В., Лютко А.Ю., Гаврилова В.А. Диагностическая ценность молекулярных маркеров гена *Rf1* подсолнечника. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(2):28-37). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-2-o3

Bochkovoy A.D., Khatnyansky V.I, Kamardin V.A., Otrezova A.K. Technological certificate of the breeders seed growing of confectionary sunflower variety SPK. *Oil Crops*. 2019;2(178):14-21. [in Russian] (Бочковой А.Д., Хатнянский В.И, Камардин В.А., Отрезова А.К. Технологический паспорт первичного семеноводства крупноплодного сорта подсолнечника СПК. *Масличные культуры*. 2019;2(178):14-21). DOI: 10.25230/2412-608X-2019-2-178-14-21

Bochkovoy A.D., Pivnenko O.V. Domestic cultivar populations as source material for breeding large-fruited sunflower hybrids (Otechestvennye sorta-populyatsii kak iskhodny material dlya selektsii krupnoplodnykh gibridov podsolnechnika). *Oil Crops. Scientific and Technical Bulletin of VNIIMK*. 2007;1(136):3-8. [in Russian] (Бочковой А.Д., Пивненко О.В. Отечественные сорта-популяции как исходный материал для селекции крупноплодных гибридов подсолнечника. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2007;1(136):3-8).

Fick C.N., Miller J.F. Sunflower breeding. In: J.F. Carter (ed.). *Sunflower Technology and Production*. Madison, WI: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America; 1997.

Gavrilova V.A., Bratch E.A., Belov P.E., Gryaznov A.U. Radiography for breeding of large-fruited sunflower. In: *Burning Problems of Science, Technology and Production. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference; November 21–22, 2014, St. Petersburg (Aktualnye voprosy nauki, tekhnologii i proizvodstva. Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii; 21–22 noyabrya 2014 g., g. Sankt-Peterburg)*. St. Petersburg; 2014. p.134-137. [in Russian] (Гаврилова В.А., Брач Е.А., Белов П.Е., Грязнов А.Ю. Рентгенография для селекции крупноплодного подсолнечника. В кн.: *Актуальные вопросы науки, технологии и производства. Материалы III Международной научно-практической конференции; 21–22 ноября 2014 г., г. Санкт-Петербург*. Санкт-Петербург; 2014. С.134-137).

Gavrilova V.A., Rozhkova V.T., Pepelyaeva E.A., Bratch E.A., Migacheva E.O., Anisimova I.N. Potential of VIR collection of sunflower for the breeding of large-seeded varieties and hybrids. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2015;29(7):35-38. [in Russian] (Гаврилова В.А., Рожкова В.Т., Пепеляева Е.А., Брач Е.А., Мигачева Е.О., Анисимова И.Н. Потенциал коллекции ВИР для селекции крупноплодных сортов и гибридов подсолнечника. *Достижения науки и техники агропромышленного комплекса*. 2015;29(7):35-38).

Gavrilova V.A., Stupnikova T.G., Makarova L.G., Alpatieva N.V., Karabitsina Yu.I., Kuznetsova E.B. et al. Lines resistant to downy mildew in the sunflower genetic collection at VIR.. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):101-110. [in Russian] (Гаврилова В.А., Ступникова Т.Г., Макарова Л.Г., Алпатьева Н.В., Карабицина Ю.И., Кузнецова Е.Б. и др. Линии генетической коллекции подсолнечника ВИР, устойчивые к ложной мучнистой росе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(3):101-110). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-101-110

Hladni N, Miladinović D. Confectionery sunflower breeding and supply chain in Eastern Europe. *OCL – Oilseeds and Fats Crops and Lipids*. 2019;26(1):29. DOI: 10.1051/ocl/2019019

Horn R., Radanovic A., Fuhrmann L., Sprycha Y., Hamrit S., Jockovic M. et al. Development and validation of markers for the fertility restorer gene *Rf1* in sunflower. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(6):1260. DOI: 10.3390/ijms20061260

Merezhko A.F. The system of genetic studying of source material for plant breeding: guidelines (Sistema geneticheskogo izucheniya iskhodnogo materiala dlya selektsii rasteniy: metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1984. [in Russian] (Мережко А.Ф. Система генетического изучения исходного материала для селекции растений: методические указания. Ленинград: ВИР; 1984).

Puzikov A.N., Suvorova Yu.N. Breeding for large fruit size: new opportunities for sunflower (Selektsiya na krupnoplodnost – novye vozmozhnosti podsolnechnika). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 2013;(2):155-156. [in Russian] (Пузиков А.Н., Суворова Ю.Н. Селекция на крупноплодность – новые возможности подсолнечника. *Селекция и семеноводство*. 2013;(2):155-156).

Schnabel U., Engelmann U., Horn R. Development of markers for the use of the PEF1 cytoplasm in sunflower hybrid breeding. *Plant Breeding*. 2008;127(6):587-591. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2008.01516.x

Seiler G., Jan C.C. Basic information. In: J. Hu, G. Seiler, C. Kole (eds). *Genetics, Genomics and Breeding of Sunflower*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2010. p.1-50.

State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotekh; 2017. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2017).

State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotekh; 2018. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2018).

State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotekh; 2019. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2019).

State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotekh; 2021. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2021).

State Register for Selection Achievements Admitted for Usage (National List). Vol. 1 "Plant varieties" (official publication). Moscow; Rosinformagrotekh; 2023. [in Russian] (Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. «Сорта растений» (официальное издание). Москва: Росинформагротех; 2023).

Tan A.S., Tan A. Sunflower (*Helianthus annuus* L.) landraces of Turkey – their collection, conservation and morphometric characterization. *Helia*. 2010;33(53):55-62. DOI: 10.2298/hel1053055t

Yue B., Vick B.A., Cai X., Hu J. Genetic mapping for the *Rf1* (fertility restoration) gene in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by SSR and TRAP markers. *Plant Breeding*. 2010;129(1):24-28. DOI: 10.1111/j.1439-0523.2009.01661.x

Информация об авторах

Вера Алексеевна Гаврилова, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, v.gavrilova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8110-9168

Лариса Георгиевна Макарова, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, larisa.mackarova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7913-3815

Татьяна Георгиевна Ступникова, специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, 352183 Россия, Краснодарский край, п. Ботаника, ул. Центральная, 2, 19tanyuchchka68@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4920-6539

Наталья Владимировна Алпатьева, 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, alpatievanatalia@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5531-2728

Елена Борисовна Кузнецова, ведущий специалист, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, kuznetsova.eb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9804-1286

Ирина Николаевна Анисимова, 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, irina_anisimova@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-0474-8860

Information about the authors

Vera A. Gavrilova, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, v.gavrilova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8110-9168

Larisa G. Makarova, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, larisa.mackarova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-7913-3815

Tatyana G. Stupnikova, Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Experimental Station of VIR, 2 Tsentralnaya St., Botanika Settlem., Krasnodar Territory 352183, Russia, 19tanyuchchka68@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4920-6539

Natalya V. Alpatieva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, alpatievanatalia@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5531-2728

Elena B. Kusnetsova, Leading Specialist, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, kuznetsova.eb@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9804-1286

Irina N. Anisimova, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, irina_anisimova@inbox.ru, https://orcid.org/0000-0003-0474-8860

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.03.2023; одобрена после рецензирования 29.05.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 30.03.2023; approved after reviewing on 29.05.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.111.1:631.524.825:58.056
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-79-89

CC BY

Ранжирование генотипов яровой мягкой пшеницы по дате колошения и продолжительности вегетации в разных эколого-географических условиях

Л. Ю. Новикова, Е. В. Зуев, А. Н. Брыкова

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

Автор, ответственный за переписку: Любовь Юрьевна Новикова, l.novikova@vir.nw.ru

Актуальность. Адаптация сортимента яровой мягкой пшеницы к изменениям климата требует исследования факторов, влияющих на продолжительность вегетационного периода в различных эколого-географических условиях. Цель работы: исследование влияния эколого-географических условий на корреляцию продолжительности вегетации и межфазных периодов генотипов яровой мягкой пшеницы.
Материалы и методы. Исследована географическая и температурная зависимость коэффициентов корреляции продолжительности межфазных периодов «всходы – колошение» (ВК) и «колошение – восковая спелость» (КС) с «всходы – восковая спелость» (ВС) коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР в 18 географических пунктах России и Узбекистана, расположенных от 41 до 60° с. ш. и от 30 до 135° в. д. Исследовано влияние факторов «генотип» и «год» на ВК и КС, построены регрессионные агрометеорологические модели ВК и КС по данным изучения коллекции в Санкт-Петербурге в 1945–2021 гг.
Результаты. Показано, что в пунктах исследования с широтой ниже 52–54° с. ш. коэффициент корреляции ВС с ВК в основном выше, чем ВС с КС, в более высоких широтах – наоборот. Изменение соотношения коэффициентов происходит за счет возрастания межгодовой вариабельности периода КС при более низких температурах. Влияние КС на ВС становится больше влияния ВК при температуре ниже 18°С. На данных многолетнего исследования коллекции пшеницы в Санкт-Петербурге показано, что на ВК влияние генотипа составляет 18,9%, года – 68,9%, а на КС – 4,1 и 71,3% соответственно. Регрессионные модели показали, что КС определяется температурой не менее чем на 81%, ВК имеет меньший коэффициент детерминации погодными условиями (56%).
Заключение. Ранжирование генотипов яровой мягкой пшеницы по времени колошения отражает их распределение по скороспелости. Значительный вклад периода «колошение – восковая спелость» заметен при температуре ниже 18°С после колошения на широтах выше 52–54° с. ш.

Ключевые слова: коллекция, продолжительность вегетации, межфазные периоды, корреляция, регрессия, широтная зависимость, погодная зависимость

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России «Национальная сетевая коллекция генетических ресурсов растений для эффективного научно-технологического развития РФ в сфере генетических технологий» по соглашению № 075-15-2021-1050 от 28.09.2021 г.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Новикова Л.Ю., Зуев Е.В., Брыкова А.Н. Ранжирование генотипов яровой мягкой пшеницы по дате колошения и продолжительности вегетации в разных эколого-географических условиях. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):79-89. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-79-89

© Новикова Л.Ю., Зуев Е.В., Брыкова А.Н., 2023

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-79-89

Ranking of spring bread wheat genotypes according to the heading date and growing season duration in different ecogeographic environments

Liubov Yu. Novikova, Evgeny V. Zuev, Alla N. Brykova

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

Corresponding author: Liubov Yu. Novikova, l.novikova@vir.nw.ru

Background. Adaptation of spring bread wheat cultivars to climate change requires a study of the factors affecting the length of their growing season in various environments. An attempt is made to analyze regularities in the effect of ecogeographic conditions on the correlations shown by the duration of the growing season and interphase periods in spring bread wheat genotypes.
Materials and methods. Correlation coefficients were studied for the impact of the environment and temperature on the duration of the interphase periods from sprouting to heading (SH) and from heading to yellow ripeness (HR) versus the period from sprouting to yellow ripeness (SR) in VIR's wheat collection across 18 sites located in Russia and Uzbekistan from 41 to 60°N and from 30 to 135°E. The effect of the genotype and year on SH and HR was studied, and agrometeorological regression models of SH and HR were constructed, based on the data obtained during the studies of the collection in St. Petersburg in 1945–2021.
Results. For the sites below 52–54°N, the SR/SH correlation coefficient was generally higher than SR/HR, and in the upper latitudes it was vice versa. The change in the ratio of coefficients occurred due to an increase in the interannual variability of HR at lower temperatures. The effect of HR on SR became greater than that of SH at temperatures below 18°C during HR. The data of a long-term study in St. Petersburg demonstrated that the effect of the genotype on SH was 18.9%, with 68.9% of the year, and the effect of the factors on HR was 4.1 and 71.3%, respectively. Regression models showed that HR was determined by temperature for at least 81%, while SH had a lower coefficient of determination by weather (56%).
Conclusion. Ranking of wheat genotypes according to their heading time reflected their differentiation in earliness. A significant contribution of HR was conspicuous under temperatures below 18°C after heading at latitudes above 52–54°N.

***Keywords*:** spring bread wheat, collection, growing season, interphase periods, correlation, regression, latitude dependence, weather dependence

***Acknowledgements*:** this work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2021-1050 dated September 28, 2021.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

***For citation*:** Novikova L.Yu., Zuev E.V., Brykova A.N. Ranking of spring bread wheat genotypes according to the heading date and growing season duration in different ecogeographic environments. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):79-89. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-79-89

Введение

Изменение климата последних десятилетий оказывает существенное влияние на урожайность и фенологию яровой пшеницы во всем мире. Отмечается снижение урожайности пшеницы во многих районах низких широт, в то время как в высоких широтах отмечается ее увеличение (Pavlova, Karachenkova, 2020; Dettori et al., 2022). В регионах наблюдается сдвиг фенодат пшеницы на более ранние сроки, до нескольких недель по сравнению с 1950-ми годами, меняются температурные условия межфазных интервалов (Menzel et al., 2006; Novikova et al., 2013; Keilwagen et al., 2014; Zhang et al, 2022). Изменение климата требует адаптации сортимента, ставит новые задачи перед региональной селекцией, в частности более раннего созревания в регионах с летними засухами. Необходимы исследования изменений фенологии культур в меняющихся климатических условиях.

Продолжительность вегетационного периода – один из важнейших признаков, определяющих возможность возделывания сорта. Одним из наиболее важных вопросов селекции является решение проблемы вегетационного периода, так как от умелого согласования жизненного ритма растений с ритмом климата данной зоны во многом зависит успех селекционной работы (Gradekov, Gustykh, 1990). Во Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) для оценки скороспелости образцов пшеницы определяют период «всходы – восковая спелость» (ВС), который состоит из подпериодов: «всходы – колошение» (ВК) и «колошение – восковая спелость» (КС) (Merezhko et al., 1999). Далее под вегетационным периодом мы будем подразумевать ВС.

Большинство исследователей утверждают, что скороспелость сорта больше характеризуется продолжительностью межфазного периода «всходы – колошение», чем «колошение – восковая спелость». При изучении коллекции пшеницы ВИР в различных географических точках многие авторы подтверждали высокую положительную корреляционную зависимость между ВС и ВК: для условий Краснодарского края (Nikiforov, 1976), для Кировской области (Novoselova, 1978), Ленинградской области (Lyapunova, 1989; Rigin, 2012), Астраханской области (Novikov, Shakhmedov, 1994), для Актюбинской области Казахстана (Tsygankov, 2011), для Самарской области (Vyushkov et al., 2012), для Дагестана (Zuev et al., 2018).

Анализируя результаты исследования пшеницы в условиях Красноярского края (Zuev et al., 2005), мы обратили внимание на высокую корреляцию ВС с КС. В литературе также встречаются сведения, что в ряде регионов России наблюдается более высокая корреляция ВК с КС: в Красноярском крае (Vedrov, Khapinskii, 1990), Иркутской области (Naumova, Ivanova, 1997). На важную роль у яровой пшеницы периода КС и необходимость селекционной работы над его сокращением указывал А. П. Головоченко (Golovochenko, 2001).

В отделе генетических ресурсов пшеницы ВИР последние 20 лет активно ведутся работы по созданию оценочных баз данных полевого изучения коллекции яровой мягкой пшеницы ВИР в филиалах института и селекцентрах России. Созданные массивы включают многолетние данные по изучению обширных выборок, что дает возможность проверить коэффициенты корреляции продолжительности межфазных периодов с продолжительностью вегетационного периода в разных эколого-географических условиях.

Поскольку выявлено, что в разных географических пунктах влияние межфазных периодов на продолжительность вегетации различно, возникло предположение о зависимости коэффициентов корреляции от погодно-климатических условий. В России основным лимитирующим фактором является температурный (Mishchenko, 2009), поэтому основное внимание было уделено сравнению температурных характеристик межфазных периодов в пунктах исследования. Оптимальной температурой прорастания яровых зерновых является диапазон 6–12°С, в вегетативный период – 16–20°С, генеративный – 16–22°С (Shevelukha, 1980; Harvest formation..., 1984).

Цель работы: исследование влияния эколого-географических условий на связь продолжительности межфазных периодов с вегетационным периодом яровой мягкой пшеницы.

Материал и методы

Используя базы данных полевой оценки, мы провели корреляционный анализ между продолжительностью ВС и межфазных периодов яровой мягкой пшеницы в различных географических точках. В анализ вошли 18 пунктов изучения (таблица), охватывающих территорию от 41 до 60 градуса северной широты и от 30 до 135 градуса восточной долготы и характеризующихся значительным разнообразием эколого-географических условий. На основании электронных климатических карт, полученных из международного центра ICARDA (Сирия), мы определили для пунктов изучения средние температуры воздуха в период колошения и после колошения (см. таблицу). В течение года в среднем изучалось 300–400 образцов. Рассчитаны коэффициенты корреляции по Пирсону между ВК и ВС ($r_{вк}$), КС и ВС ($r_{кс}$) по всем образцам, изученным в данном пункте (см. таблицу).

Более подробно вклад факторов «генотип» и «год» в вариабельность межфазных периодов исследован в одном пункте – на научно-производственной базе (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (г. Пушкин). Коэффициенты $r_{вк}$ и $r_{кс}$ рассчитаны за каждый год периода изучения, исследована их связь со средними температурами и суммами осадков за межфазные периоды; за месяцы вегетации; за 1, 2, 3, 4 недели до и после колошения. Всего в анализ включены данные за 56 лет (1945–2021 гг.), исследовано 8923 образца. С использованием дисперсионного анализа оценен вклад факторов «генотип» и «год» в вариабельность продолжительности межфазных периодов яровой пшеницы. С помощью регрессионного анализа изучена степень зависимости продолжительности межфазных периодов от показателей тепло- и влагообеспеченности. Использованы данные Пушкинского метеопункта ВИР.

Связь $r_{вк}$ и $r_{кс}$ с характеристиками пункта/года изучения рассчитана с помощью коэффициента корреляции Спирмена (ρ). Использован критерий Краскела – Уоллиса для сравнения $r_{вк}$ и $r_{кс}$ в разных условиях. Статистический анализ проведен в пакете Statistica 13.3.

В исследовании принят уровень значимости 5%, если не оговорен иной.

Результаты

Исследование корреляционной связи продолжительности межфазных периодов и вегетационного периода в различных эколого-географических условиях

Таблица. **Коэффициенты линейной корреляции продолжительности вегетационного периода (ВС) и межфазных периодов «всходы – колошение» (ВК) и «колошение – восковая спелость» (КС) коллекций яровой мягкой пшеницы в 18 пунктах**

Table. **Coefficients of linear correlation between the growing season duration (SR) and the interphase periods from sprouting to heading (SH) and from heading to ripeness (HR) in the spring bread wheat collections at 18 sites**

Опытная станция, селекцентр	Месторасположение	Координаты		Число лет изучения	Средняя температура воздуха месяца, °С		Коэффициент корреляции		Корреляционная зависимость между		Динамика температуры воздуха после колошения
		Широта	Долгота		колошения	после колошения	ВК и ВС	КС и ВС	ВК и ВС	КС и ВС	
Дагестанская ОС – филиал ВИР	Россия, Дагестан	N 42 03	E 48 17	25	11,8	18,0	0,83	0,02	высокая	низкая	увеличение
НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР»	Россия, г. Пушкин	N 59 43	E 30 24	41	17,0	16,3	0,60	0,63	средняя	средняя	уменьшение
Среднеазиатский филиал ВИР до 1991 г.	Узбекистан, Ташкентская обл.	N 41 26	E 69 25	15	14,5	19,6	0,82	0,21	высокая	низкая	увеличение
Алтайский НИИСХ	Россия, Алтайский край	N 53 20	E 83 45	4	19,4	16,9	0,37	0,55	низкая	средняя	уменьшение
Сибирский НИИСХ	Россия, Омская обл.	N 54 58	E 73 23	6	19,3	16,7	0,56	0,74	средняя	высокая	уменьшение
Каменная Степь, ОС ВИР в 1930-е годы	Россия, Воронежская обл.	N 51 07	E 40 43	7	19,0	20,9	0,64	0,19	средняя	низкая	увеличение
Кинельский опорный пункт ВИР	Россия, Самарская обл.	N 53 13	E 50 37	8	18,9	21,1	0,61	0,54	средняя	средняя	увеличение
Московское отделение ВИР до 2006 г.	Россия, Московская обл.	N 55 07	E 37 57	9	18,1	16,5	0,35	0,74	низкая	высокая	уменьшение
Красноярский НИИСХ	Россия, Красноярский край	N 56 01	E 93 03	10	18,1	16,9	0,48	0,87	средняя	высокая	уменьшение

Таблица. Окончание

Table. The end

Опытная станция, селекцентр	Месторасположение	Координаты		Число лет изучения	Средняя температура воздуха месяца, °С		Коэффициент корреляции		Корреляционная зависимость между		Динамика температуры воздуха после колошения
		Широта	Долгота		колошения	после колошения	ВК и ВС	КС и ВС	ВК и ВС	КС и ВС	
Екатерининская ОС – филиал ВИР	Россия, Тамбовская обл.	N 52 59	E 40 49	5	18,2	20,0	0,63	0,31	средняя	низкая	увеличение
Зейский опорный пункт ВИР до 1994 г.	Россия, Амурская обл.	N 53 43	E 127 14	3	19,3	18,0	0,39	0,69	низкая	высокая	уменьшение
Башкирский НИИСХ	Россия, Башкирия	N 54 35	E 55 22	4	19,4	17,4	0,64	0,42	средняя	средняя	уменьшение
Дальневосточный НИИСХ	Россия, Хабаровский край	N 48 24	E 135 07	3	21,3	20,2	0,53	0,76	средняя	высокая	уменьшение
СибНИИРС	Россия, Новосибирская обл.	N 55 00	E 82 55	13	19,0	16,3	0,59	0,72	средняя	высокая	уменьшение
Пензенский НИИСХ	Россия, Пензенская обл.	N 53 34	E 45 13	2	17,8	19,8	0,65	0,65	средняя	средняя	увеличение
Приморский НИИСХ	Россия, Приморский край	N 43 48	E 131 58	8	16,3	20,4	0,52	0,42	средняя	средняя	увеличение
НИИСХ Северного Зауралья	Россия, Тюменская обл.	N 57 09	E 65 30	2	18,7	15,7	0,59	0,70	средняя	высокая	уменьшение
Ульяновский НИИСХ	Россия, Ульяновская обл.	N 54 18	E 48 21	7	17,3	19,4	0,62	0,40	средняя	средняя	увеличение

Примечание: ВК – «всходы – колошение»; КС – «колошение – восковая спелость»; ВС – продолжительность вегетационного периода

Note: ВК – SH (sprouting to heading); КС – HR (heading to yellow ripeness); ВС – SR (sprouting to yellow ripeness)

Значения $r_{вк}$ варьировали по 18 пунктам исследования от 0,37 до 0,83; $r_{кс}$ – от 0,02 до 0,87 (см. таблицу). Метрики $r_{вк}$ и $r_{кс}$ обратно связаны друг с другом (ρ = –0,71), по мере роста зависимости ВС от КС снижается зависимость от ВК.

По каждой из метрик $r_{вк}$ и $r_{кс}$ были выделены контрастные группы: с низкими значениями до 0,4; с высокими от 0,7; остальные отнесены в группу средних. Для условий Дагестана, Ташкентской области Узбекистана, Воронежской области, Тамбовской области и Ульяновской области ВС в большей степени коррелировал с периодом ВК (см. таблицу). Для Алтайского края, Омской области, Московской области, Красноярского края, Амурской области, Хабаровского края, Новосибирской области, Тюменской области в большей степени с ВС коррелировал КС. В условиях Ленинградской области, Башкирии и Пензенской области наблюдалась средняя корреляция как между ВС и ВК, так и между ВС и КС.

Коэффициенты корреляции связаны с географическими координатами (рис. 1) – с увеличением широты достоверно увеличивается роль периода КС (ρ = 0,61; p = 0,007), роль ВК снижается, но недостоверно (ρ = –0,37; p = 0,135). Зависимость от долготы также недостоверна (ρ = –0,46; p = 0,052 для $r_{вк}$ и ρ = 0,39; p = 0,122 для $r_{кс}$) и частично может быть объяснена снижением широты северной границы земледельческой зоны в восточных регионах России (Pavlova, Karachenkova, 2020). В нашем случае корреляция широты и долготы пунктов исследования составила ρ = –0.23 (p = 0,350). Севернее 53° с. ш. период «колошение – восковая спелость» начинает играть более значительную роль и $r_{кс} > r_{вк}$ (см. рис. 1). Таким образом, изменение соотношения коэффициентов корреляции происходит в основном за счет возрастания роли $r_{кс}$, то есть возрастания вариабельности периода КС у образцов выборки.

Температура в период колошения ($T_к$) варьировала в пунктах исследования от 11,8°С до 21,3°С; в месяц после колошения ($T_{пк}$) – от 15,7°С до 21,1°С (см. таблицу, рис. 2). В среднем $T_к$ = 18,0°С, $T_{пк}$ = 18,3°С. Зависимость температуры в месяц колошения и после колошения от широты носит нелинейный характер, оба показателя снижаются к границам рассмотренного широтного диапазона 40–60° с. ш. и максимальны на 48–54° с. ш. (см. рис. 2). До 52–54° с. ш. наблюдается тенденция к превышению температуры колошения над температурой после колошения, в более высоких широтах – наоборот, $T_к < T_{пк}$. Для большинства мест изучения наблюдалась четкая зависимость: где ВС коррелировала в большей степени с ВК, после колошения температура воздуха повышалась и созревание проходило при повышенных температурах. Для регионов, где мы наблюдали повышенную корреляцию между ВС и КС, после колошения температура воздуха понижалась. Г. Т. Селянинов в своей классификации культурных растений (Selianinov, 1930) относил яровую пшеницу к типу «яровые растения умеренных и субтропических стран, начинающие вегетировать при низких температурах, но требующие для прохождения следующих фаз все более и более высоких температур» (Selianinov, 1930, p. 162). Таким образом, роль периода после колошения возрастает в условиях атипичного для пшеницы хода температуры, а именно снижения температуры после колошения.

Выделенные группы пунктов с низкими, средними и высокими значениями $r_{вк}$ и $r_{кс}$ различались температурными условиями колошения и периода после него на уровне значимости 10% по критерию Краскела – Уоллиса. Контрастные по $r_{вк}$ группы различались температурой в период колошения (p = 0,055): в группе с высокими $r_{вк}$ $T_к$ = 13,2°С, со средними – $T_к$ = 18,5°С, с низкими – $T_к$ = 18,9°С. У контрастных по $r_{кс}$ групп средняя температура месяца после колошения ($T_{пк}$) различалась на уровне p = 0,088: в группе с высокими $r_{вк}$ – $T_{пк}$ = 17,2°, средними – $T_{пк}$ = 18,6°С, низкими – $T_{пк}$ = 19,6°С.

Наблюдается тенденция к снижению $r_{вк}$ с увеличением температуры в период колошения ρ = –0,39 (p = 0,110) (рис. 3, а). Роль периода ВК для ВС делается определяющей ($r_{вк} > 0,7$) в нашем случае в двух точках, характеризующихся температурой цветения ниже 15°С (см. рис. 3, а) и 18–20°С после колошения.

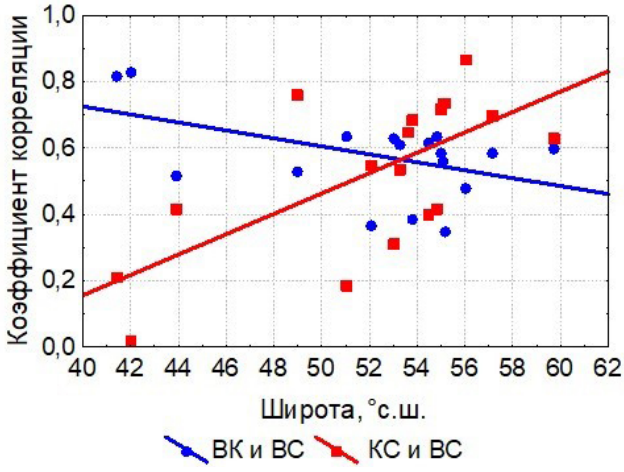


Рис. 1. Широтная зависимость коэффициентов корреляции продолжительности межфазных и вегетационного периодов яровой мягкой пшеницы в 18 пунктах.

Обозначения: ВК – «всходы – колошение»; КС – «колошение – восковая спелость»; ВС – вегетационный период. Тренды получены линейной аппроксимацией

Fig. 1. Latitude dependence of the correlation coefficients between the durations of interphase periods and the growing season in spring bread wheat at 18 sites.

Designations: ВК – SH (sprouting to heading); КС – HR (heading to yellow ripeness); ВС – SR (sprouting to yellow ripeness). Trends are obtained by linear approximation

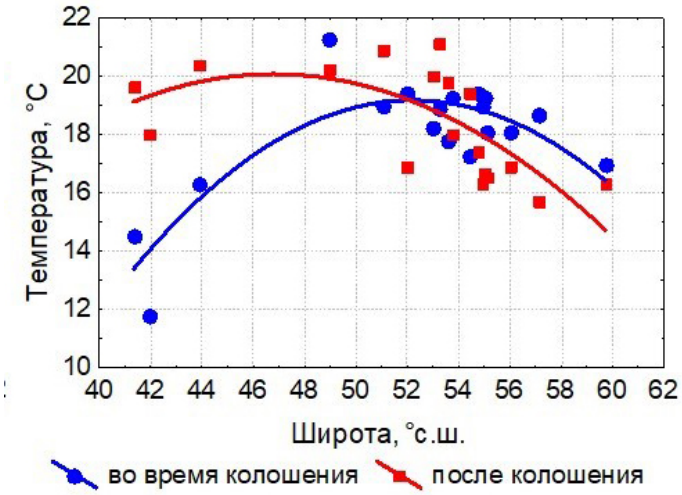


Рис. 2. Широтная зависимость температуры месяца колошения и месяца после колошения яровой мягкой пшеницы в 18 пунктах.
Тренды получены параболической аппроксимацией

Fig. 2. Latitude dependence of the temperatures in the month of heading and the month after heading in spring bread wheat at 18 sites.
Trends are obtained by parabolic approximation

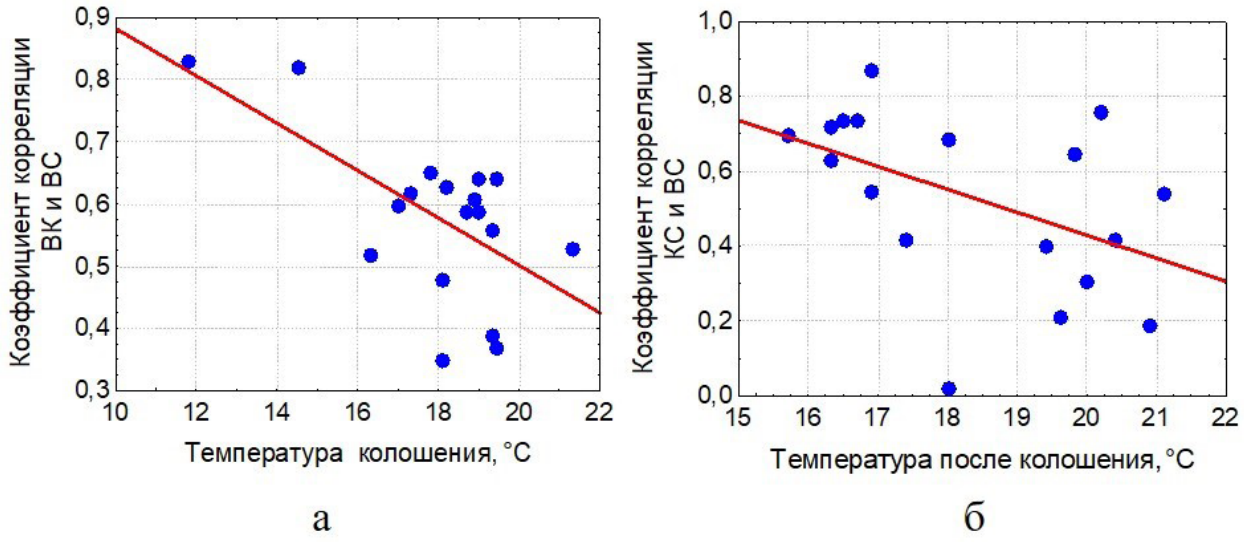


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициентов корреляции: (а) «всходы – колошение» (ВК) и продолжительности вегетационного периода (ВС) – от температуры периода колошения; (б) «колошение – восковая спелость» (КС) и ВС – от температуры месяца после колошения образцов яровой мягкой пшеницы в 18 пунктах

Fig. 3. Temperature dependence of the correlation coefficients of (a) the periods from sprouting to heading, or SH (ВК), and from sprouting to yellow ripeness, or SR (ВС), from the temperature in the month of heading; (б) the periods from heading to yellow ripeness, or HR (КС), and SR (ВС) from the temperature of the month after heading in the spring bread wheat collection at 18 sites

Наблюдается отрицательная связь $r_{кс}$ и температуры после колошения – ρ = –0,48 (p = 0,045). Из шести значений с $r_{кс}$ > 0,7 четыре наблюдались при температуре ниже 18°С. Контрастные значения – ниже 0,4 – наблюдались при температуре 18°С и выше. Таким образом, при температуре ниже 18°С после колошения наблюдается тенденция к дифференциации генотипов пшеницы по скорости прохождения периода «колошение – восковая спелость».

Межсортовая и межгодовая вариабельность межфазных периодов яровой пшеницы в условиях Санкт-Петербурга

На опытном поле ВИР в г. Пушкине в период исследования мировой коллекции пшениц ВИР с 1945 по 2021 г. $r_{вк}$ варьировал по годам от 0,05 до 0,88, $r_{кс}$ – от –0,04 до 0,92. Медианное значение распределения по годам соста-

вило для $r_{вк}$ = 0,65, для $r_{кс}$ = 0,63, то есть влияние обоих периодов сравнимо. Коэффициенты $r_{вк}$ и $r_{кс}$ связаны отрицательно (ρ = –0,32; p = 0,010); $r_{вк}$ показал слабую достоверную связь только с осадками, положительную – с осадками июля (ρ = 0,29; p = 0,030). Коэффициент $r_{кс}$ связан отрицательно с различными температурными показателями: средней температурой в течение 14 суток после начала колошения (ρ = –0,27; p = 0,040), незначимо отрицательно – с температурой мая, июня, июля (p > 0,150); со средней температурой КС (ρ = –0,21; p = 0,010). Таким образом, подтверждена слабая отрицательная зависимость $r_{кс}$ от температуры, которая описана выше для различных географических пунктов.

Для оценки влияния года были рассчитаны показатели «среднего генотипа» – средних за год значений ВК и КС. Для «среднего генотипа» за 56 лет исследований $r_{вк}$ = 0,65, $r_{кс}$ = 0,86, то есть влияние периода КС больше. Межсортовая вариабельность была выше у периода ВК, а межгодовая вариабельность – у КС.

Для дисперсионного анализа факторов «генотип» и «год» выделили 35 сортов, которые изучались наиболее продолжительное время – 15–38 лет. Влияние обоих факторов на ВК и КС было значимо (p < 0,001). Вклад генотипа в ВК составляет 18,9%, года – 68,9%, случайной ошибки – 12,2%. Для КС эффект генотипа составляет 4,1%, года – 71,3%, ошибки – 24,5%. Таким образом, на продолжительность ВК влияние фактора «генотип» сильнее, чем на КС, а влияние фактора «год» примерно одинаково.

Исследование зависимости продолжительности межфазных периодов «среднего генотипа» от средней температуры и средних осадков за сутки межфазного периода показывает (рис. 4), что КС сильнее зависит от средней температуры за период (r = –0,88), чем ВК (r = –0,65). Сравнение z-преобразованных коэффициентов t-критерием Стьюдента показывает значимость различий между ними (число измерений равно 56 для КС и 64 для ВК; расчетное значение критерия t = 3,195, что больше критического значения $t_{0,05;116}$ = 1,981; уровень значимости различий p = 0,002).

Регрессионная модель КС ($L_{кс}$) показывает, что этот показатель на 81% детерминирован средней температурой периода ($T_{кс}$), причем зависимость нелинейна (см. рис. 4, б), что особенно заметно при температуре выше 18°C:

$$L_{кс}=161{,}8-9{,}9T_{кс}+0{,}2T^2_{кс} \quad R^2=0{,}81 \qquad (1)$$

Здесь R^2 – коэффициент детерминации уравнения, показывающий, какую долю дисперсии зависимой переменной объясняет регрессионная модель (равен отношению суммы квадратов отклонений модельных значений от среднего к сумме квадратов отклонений фактических значений от среднего).

Влияние показателей влагообеспеченности незначимо, и в модель они не вошли. Необъясненной температурной зависимостью остается только 19% межгодовой вариабельности периода КС.

Продолжительность периода ВК ($L_{вк}$) зависит от средней температуры ($T_{вк}$) и осадков ($P_{вк}$) периода ВК: они объясняют меньшую часть дисперсии (56%), чем модель (1):

$$L_{вк}=69{,}8-1{,}9T_{кс}+2{,}0P_{вк} \quad R^2=0{,}56 \qquad (2)$$

В климатических условиях с высокими температурами (выше 20–22°C) в период КС снижаются межгодовая вариабельность этого показателя и корреляция КС с ВС.

В условиях потепления климата в Ленинградской области наблюдается сокращение КС на 1,1 сут./10 лет в 1945–2021 гг. и на 2,2 сут./10 лет в 1980–2021 гг.; при этом ВК достоверно не меняется, а скорость сокращения продолжительности вегетации примерно равна скорости сокращения КС – 1,5 сут./10 лет в 1945–2021 гг. и 2,6 сут./10 лет после 1980 г. Сокращение продолжительности вегетации и КС наблюдалось в Ленинградской

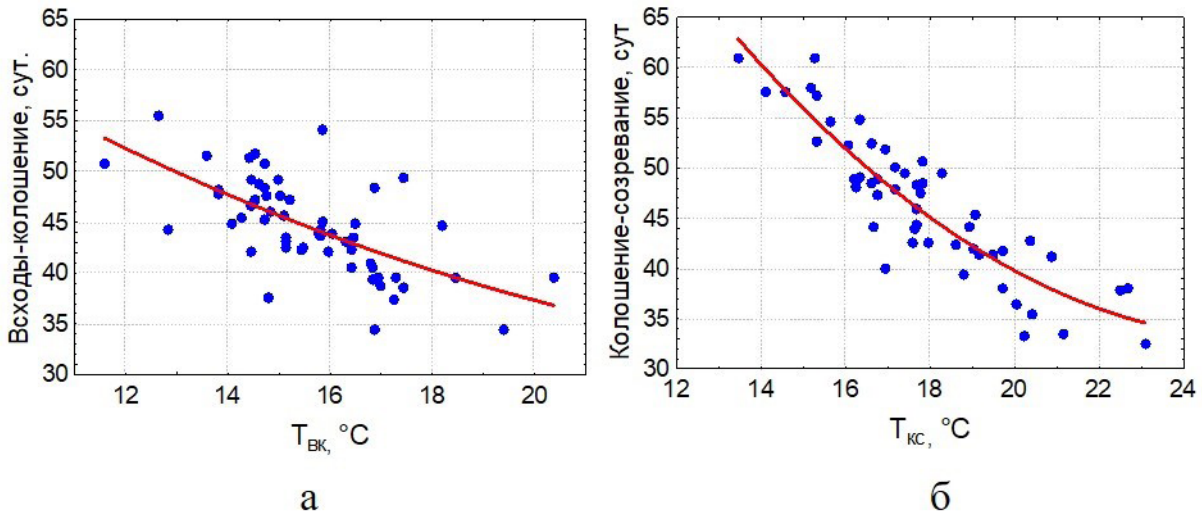


Рис. 4. Зависимость продолжительности межфазных периодов яровой мягкой пшеницы от средней температуры: (а) «всходы – колошение»; (б) «колошение – восковая спелость», среднее для 35 образцов, Пушкин, 1945–2021 гг. $T_{вк}$, $T_{кс}$ – температуры периодов «всходы – колошение» и «колошение – восковая спелость».

Тренды получены параболической аппроксимацией

Fig. 4. Dependence of spring bread wheat interphase periods on the mean temperature: (a) sprouting to heading; (б) heading to yellow ripeness, average for 35 accessions, Pushkin, 1945–2021. $T_{вк}$, $T_{кс}$ – temperatures in the periods from sprouting to heading and from heading to yellow ripeness.

Trends are obtained by parabolic approximation

области для овса, ячменя и других выборок из коллекции пшеницы (Novikova et al., 2013a, b), при этом ВК не менялась. Таким образом, с потеплением климата ранжирование генотипов по ВК все более соответствует их распределению по продолжительности вегетации.

Заключение

На территории России с увеличением широты пункта исследования в диапазоне 40–60°с. ш. наблюдается тенденция увеличения влияния периода «колошение – восковая спелость» на продолжительность вегетации яровой мягкой пшеницы. Ниже 52–54° с. ш., при температуре после колошения выше 18°С, коэффициент корреляции вегетационного периода с периодом «всходы – колошение» в основном выше, чем с продолжительностью «колошение – восковая спелость»; в более высоких широтах, наоборот, с периодом «колошение – восковая спелость».

На продолжительность периода «всходы – колошение» влияние генотипа сильнее, чем на «колошение – восковая спелость», продолжительность которого определяется погодными условиями.

В условиях дефицита тепла продолжительность «колошение – восковая спелость» на 81% определяется средней температурой за период.

References / Литература

Dettori M., Cesaraccio C., Duce P., Mereu V. Performance prediction of durum wheat genotypes in response to drought and heat in climate change conditions. *Genes*. 2022;13(3):488. DOI: 10.3390/genes13030488

Golovochenko A.P. Features of adaptive breeding of spring bread wheat in the forest-steppe zone of the Middle Volga region: a monograph (Osobennosti adaptivnoy selektsii yarovoy myagkoy pshenitsy v lesostepnoy zone Srednego Povolzhya: monografiya). Kinel; 2011. [in Russian] (Головоченко А.П. Особенности адаптивной селекции яровой мягкой пшеницы в лесостепной зоне Среднего Поволжья: монография. Кинель; 2011).

Gradekov S.M., Gustykh G.D. Breeding value of winter wheat accessions for the development of intensive-type cultivars (Selektsionnaya tsennost kollektsionnykh obraztsov ozimoy pshenitsy dlya selektsii sortov intensivnogo tipa). *Zernovye kultury = Cereal Crops*. 1990;(2):3-4. [in Russian] (Градеков С.М., Густых Г.Д. Селекционная ценность коллекционных образцов озимой пшеницы для селекции сортов интенсивного типа. *Зерновые культуры*. 1990;(2):3-4).

Harvest formation of major crops (Formirovaniye urozhaya osnovnykh selskokhozyaystvennykh kultur). Translation from Czech by Z.K. Blagoveshchenskaya. Moscow: Kolos; 1984. [in Russian] (Формирование урожая основных сельскохозяйственных культур / перевод с чешского З.К. Благовещенской. Москва: Колос; 1984).

Keilwagen J., Kilian B., Özkan H., Babben S., Perovic D., Mayer K.F.X. et al. Separating the wheat from the chaff – a strategy to utilize plant genetic resources from *ex situ* genebanks. *Scientific Reports*. 2014;4:5231. DOI: 10.1038/srep05231

Lyapunova O.A. Inheritance of the length of the emergence–earing period by spring soft wheat hybrids. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1989;127:73-78. [in Russian] (Ляпунова О.А. Наследование продолжительности периода всходы – колошение гибридами яровой мягкой пшеницы. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1989;127:73-78).

Menzel A., von Vopelius J., Estrella N., Schleip C., Dose V. Farmers' annual activities are not tracking speed of climate change. *Climate Research*. 2006;32(3):201-207. DOI: 10.3354/CR032201

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., Boguslavsky 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. St. Petersburg: VIR; 1999. [in Russian] (Мережко А.Ф., Удачин Р.А., Зуев Е.В., Филатенко А.А., Сербин А.А., Ляпунова О.А., Косов В.Ю., Куркиев У.К., Охотникова Т.В., Наврузбеков Н.А., Богуславский Р.Л., Абдулаева А.К., Чикида Н.Н., Митрофанова О.П., Потокина С.А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания. Санкт-Петербург: ВИР; 1999).

Mishchenko Z.A. Agricultural climatology. (Agroklimatologiya). Kiev: KNT; 2009. [in Russian] (Мищенко З.А. Агроклиматология. Киев: КНТ, 2009).

Naumova M.S., Ivanova S.V. Breeding value of a collection of early-ripening spring wheat varieties for the conditions of Irkutsk Province (Selektsionnaya tsennost kollektsii skorospelykh sortov yarovoy pshenitsy dlya usloviy Irkutskoy oblasti). *Vestnik of Irkutsk State Agricultural Academy*. 1997;(8):19-22. [in Russian] (Наумова М.С., Иванова С.В. Селекционная ценность коллекции скороспелых сортов яровой пшеницы для условий Иркутской области. *Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии*. 1997;(8):19-22).

Nikiforov M.N. Growing season and productivity of spring wheat under Kuban conditions (Vegetatsionny period i produktivnost yarovoy pshenitsy v usloviyakh Kubani). *Byulleten Vsesoyuznogo ordena Lenina instituta rasteniyevodstva im. N.I. Vavilova = Bulletin of the N.I. Vavilov All-Union Institute of Plant Industry Decorated with the Order of Lenin*. 1976;(60):7-9. [in Russian] (Никифоров М.Н. Вегетационный период и продуктивность яровой пшеницы в условиях Кубани. *Бюллетень Всесоюзного ордена Ленина института растениеводства им. Н.И. Вавилова*. 1976;(60):7-9).

Novikov V.V., Shakhmedov I.Sh. New source material for spring bread wheat breeding in Astrakhan Province (Novy iskhodny material dlya selektsii yarovoy myagkoy pshenitsy v Astrakhanskoy oblasti). *RUDN Journal. Agricultural Science Series*. 1994;(1):88-91. [in Russian] (Новиков В.В., Шахмедов И.Ш. Новый исходный материал для селекции яровой мягкой пшеницы в Астраханской области. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Сельскохозяйственные науки*. 1994;(1):88-91).

Novikova L.Yu., Dyubin V.N., Loskutov I.G., Zuev E.V., Kovaleva O.N., Porokhovinova E.A. et al. Analysis of economical valuable characters of cereals cultivars under climate change conditions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2013a;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*. 2013a;173:102-119).

Novikova L.Yu., Loskutov I.G., Zuev E.V., Kovaleva O.N., Porokhovinova E.A., Artemieva A.M. et al. The analysis of economically valuable characters of crop varieties at Northwestern region of Russia under climate change conditions. *Environmental Monitoring and Ecosystem Modelling*. 2013b;25:205-223. [in Russian] (Новикова Л.Ю., Лоскутов И.Г., Зуев Е.В., Ковалева О.Н., Пороховинова Е.А, Артемьева А.М. и др. Анализ динамики хозяйственно ценных признаков сельскохозяйственных культур на Северо-Западе Российской Федерации в условиях изменения климата. *Экологический мониторинг и моделирование экосистем*. 2013b;25:205-223).

Novoselova L.A. Initial material for breeding intensive spring bread wheat varieties in the Volga-Vyatka region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1978;63(2):46-50. [in Russian] (Новоселова Л.А. Исходный материал для селекции сортов яровой мягкой пшеницы интенсивного типа в Волго-Вятском районе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978;63(2):46-50).

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

Rigin B.V. Spring type of common wheat (*Triticum aestivum* L.) development: phenological and genetical aspects. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;170:1733. [in Russian] (Ригин Б.В. Яровой тип развития мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.): фенологический и генетический аспекты. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;170:17-33).

Selianinov G.T. A contribution towards a climatological classification of cultivated plants. *Transactions of the Bureau of Agrometeorology*. 1930;21(2):130-171. [in Russian] (Селянинов Г.Т. К вопросу о классификации с.-х. культур по климатическим признакам. *Труды по сельскохозяйственной метеорологии*. 1930;21(2):130-171).

Shevelukha V.S. Periodical nature of crop growth and ways of its regulation (Periodichnost rosta selskokhozyaystvennykh rasteniy i puti yeye regulirovaniya). Moscow: Kolos; 1980. [in Russian] (Шевелуха В.С. Периодичность роста сельскохозяйственных растений и пути ее регулирования. Москва: Колос; 1980).

Tsygankov V.I. Selection of adaptive spring wheat varieties for the conditions of arid steppe zones of Kazakhstan. *IZVESTIA Orenburg State Agrarian University*. 2011;2(30):46-50. [in Russian] (Цыганков В.И. Создание адаптивных сортов яровой пшеницы для условий сухостепных зон Казахстана. *Известия Оренбургского ГАУ*. 2011;2(30):46-50).

Vedrov N.G., Khapinskii A.N. Variety change and breeding progress (Sortosmena i selektsionny progress). *Selektsiya i semenovodstvo = Plant Breeding and Seed Production*. 1990;(2):35-37. [in Russian] (Ведров Н.Г., Хапинский А.Н. Сортосмена и селекционный прогресс. *Селекция и семеноводство*. 1990;(2):35-37).

Vyushkov A.A., Malchikov P.N., Syukov V.V., Shevchenko S.N. Breeding and genetic improvement of spring wheat: a monograph (Selektsionno-geneticheskoye uluchsheniye yarovoy pshenitsy: monografiya). 2nd ed. Samara: Samara Scientific Center of the RAS; 2012 [in Russian] (Вьюшков А.А., Мальчиков П.Н., Сюков В.В., Шевченко С.Н. Селекционно-генетическое улучшение яровой пшеницы: монография. 2-е изд. Самара: Самарский научный центр РАН; 2012).

Zhang Z., Xing Z., Zhou N., Zhao C., Liu B., Jia D. et al. Effects of post-anthesis temperature and radiation on grain filling and protein quality of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*. 2022;12(11):2617. DOI: 10.3390/agronomy12112617

Zuev E.V., Brykova A.N., Zhukova L.I., Kornienko N.G., Paturinskaya L.K., Semenova L.V. Catalogue of the VIR global collection. Issue 762. Spring bread wheat: results of a field study of accessions under the conditions of Krasnoyarsk Territory (Yarovaya myagkaya pshenitsa: rezultaty polevoy otsenki obraztsov v usloviyakh Krasnoyarskogo kraya). St. Petersburg: VIR; 2005. [in Russian] (Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Жукова Л.И., Корниенко Н.Г., Патуринская Л.К., Семенова Л.В. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 762. Яровая мягкая пшеница: результаты полевой оценки образцов в условиях Красноярского края. Санкт-Петербург: ВИР; 2005).

Zuev E.V., Shikhmuradov A.Z., Akhmedov M.A., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu. Catalogue of the VIR global collection. Issue 858. Spring bread wheat sources of traits valuable for breeding for the environments of Dagestan. St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Зуев Е.В., Шихмурадов А.З., Ахмедов М.А., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю. Каталог мировой коллекции ВИР. Выпуск 858. Яровая мягкая пшеница. Источники селекционно ценных признаков для условий Дагестана. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-64-1

Информация об авторах

Любовь Юрьевна Новикова, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, l.novikova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-4051-3671

Евгений Валерьевич Зуев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.zuev@vir.nv.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Алла Николаевна Брыкова, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, a.brykova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-2215-5068

Information about the authors

Liubov Yu. Novikova, Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, l.novikova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-4051-3671

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.zuev@vir.nv.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Alla N. Brykova, Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.brykova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-2215-5068

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 17.10.2023; одобрена после рецензирования 28.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 17.10.2023; approved after reviewing on 28.11.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 634.723.1:581.162.31(470.2)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-90-102

CC BY

Изучение самоплодности новых сортов черной смородины коллекции ВИР в условиях Северо-Запада России

О. А. Тихонова

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

Автор, ответственный за переписку: Ольга Анатольевна Тихонова, o.tikhonova@vir.nw.ru

Актуальность. Поиск и выделение высокосамоплодных сортов с целью использования их в селекции для создания новых высокопродуктивных сортов и формирования моносортных посадок в промышленном садоводстве является важным.
Материалы и методы. Оценку уровня самоплодности сортов проводили в 2019–2022 гг. на базе генофонда черной смородины ВИР (НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР»). В качестве объектов исследования были использованы 30 сортов черной смородины, отнесенных по своему происхождению к восьми генетическим группам. При проведении исследований руководствовались общепринятыми методиками. Контролем служило свободное опыление. Анализ полученных данных включал основные параметры, которые позволяют наиболее точно охарактеризовать степень самоплодности сорта, – количество и массу завязавшихся плодов, количество семян и показатель эффективности оплодотворения. Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Excel и методических рекомендаций Б. А. Доспехова.
Результаты и выводы. Выделены сорта с высоким и стабильным уровнем самоплодности, которые могут служить ценными источниками для использования в селекционных программах. Это сорта ‘Партизанка Брянская’ (к-45548), ‘Ben Gairn’ (к-45524), ‘Литвиновская’ (к-45542), ‘Мушкетер’ (к-45544), ‘Радужная’ (к-45549), ‘Ben Lomond’ (к-32611) и ‘Вертикаль’ (к-45528). Сорта ‘Партизанка Брянская’, ‘Ben Gairn’, ‘Мушкетер’ и ‘Вертикаль’ при естественном самоопылении способны завязывать такое же количество плодов, как и при свободном опылении, и могут быть использованы для формирования моносортных посадок. При естественном самоопылении (автогамии) происходит снижение величины ягоды и количества семян в ней. При свободном опылении и искусственном самоопылении отмечено повышение основных показателей, характеризующих самоплодность.

Ключевые слова: *Ribes* L., автогамия, гейтоногамия, свободное опыление, завязываемость ягод, масса ягоды, семенная продуктивность, эффективность оплодотворения

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 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».
Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Тихонова О.А. Изучение самоплодности новых сортов черной смородины коллекции ВИР в условиях Северо-Запада России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):90-102. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-90-102

© Тихонова О.А., 2023

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-90-102

Studying self-fertility in new black currant cultivars from the VIR collection in Northwestern Russia

Olga A. Tikhonova

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

Corresponding author: Olga A. Tikhonova, o.tikhonova@vir.nw.ru

Background. An important task is to search for and select highly self-fertile cultivars for plant breeding programs and for setting single-cultivar plantings in commercial horticulture.
Materials and methods. Cultivars were assessed for their self-fertility levels at Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR in 2019–2022. Thirty black currant cultivars of eight genetic groups served as the research material. Their levels of self-fertility were tested using conventional techniques. Free pollination served as the control. The resulting data were analyzed according to the main indicators crucial for precise characterization of a cultivar's self-fertility level: fruit setting rate, berry weight, seed yield, and fertilization effectiveness. The data were statistically processed using Microsoft Excel and the guidelines by B. A. Dospekhov. Fruit setting rate, berry weight, seed yield and fertilization effectiveness were considered for each pollination variant.
Results and conclusion. Cultivars with high and stable self-fertility levels were identified as potential valuable sources for breeding programs: 'Partizanka Bryanskaya' (k-45548), 'Ben Gairn'(k-45524), 'Litvinovskaya' (k-45542), 'Mushketer' (k-45544), 'Raduzhnaya' (k-45549), 'Ben Lomond' (k-32611), and 'Vertikal' (k-45528). Cvs. 'Partizanka Bryanskaya' (k-45548), 'Ben Gairn' (k-45524), 'Mushketer' (k-45544), and 'Vertikal' (k-45528) may be used in single-cultivar plantings because they are able to set the same number of berries under natural self-pollination and free pollination. Natural self-pollination (autogamy) led to a decrease in the size of berries and the number of seeds in them. An increase in the main self-fertility indicators was observed under artificial self-pollination and free pollination.

Keywords: *Ribes* L., autogamy, geitonogamy, free pollination, fruit setting rate, seed number per berry, fertilization effectiveness

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 author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work

For citation: Tikhonova O.A. Studying self-fertility in new black currant cultivars from the VIR collection in Northwestern Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):90-102. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-90-102

Введение

Высокая продуктивность – один из основных показателей современного сорта. Она зависит от многих факторов, в том числе и от способности сорта завязывать плоды от опыления собственной пыльцой, то есть самоплодности (Tikhonova, 2019).

В Северо-Западном регионе России цветение черной смородины часто сопровождается прохладной, дождливой погодой с сильными ветрами и частыми возвратами холодов, при которых опыление при помощи насекомых затруднено. В таких условиях трудно переоценить роль высокосамоплодных сортов в формировании урожайности.

Однозначного объяснения причин самобесплодности, равно как и способности сорта к восприятию своей пыльцы, на данный момент не существует.

Исследование семи самобесплодных видов р. *Ribes* L. было проведено в 1969 г. N. T. Arasu (1970), который установил, что у изученных видов пыльцевые трубки при самоопылении так же, как и при перекрестном опылении, достигают основания столбика и даже проникают в завязь в течение двух-трех дней после опыления, но оплодотворения при этом не происходит из-за самонесовместимости, как считает автор, которая является видовой особенностью.

Ряд исследователей связывает способность сорта завязывать плоды при самоопылении с наличием физиологических или биохимических факторов. Так, И. Ф. Палфитов с соавторами (Palfitov et al., 2010) при изучении самоплодности сортов яблони выявили, что успешность оплодотворения зависит от количества флавонолов и водорастворимых веществ в пыльце и флоризина в столбиках пестиков. Сорта яблони, пыльца которых содержит большее количество флавонолов и водорастворимых веществ (46–55%), проявляют склонность к самоплодности и служат хорошими опылителями при перекрестном опылении. У самобесплодных сортов уровень содержания указанных веществ в пыльце составляет 37–40%. Меньшей способностью к восприятию собственной пыльцы обладают и те сорта, в пестиках которых накапливается 16–20% флоризина (Palfitov, 2017).

Часто степень самоплодности сорта связывают с явлением гетеростилии. Л. Н. Забелина (Zabelina, 1972) предположила, что самоплодные сорта черной смородины имеют рыльца пестиков на одном уровне с пыльниками, а у самобесплодных они расположены выше тычинок. У самоплодных сортов, как правило, эта зависимость соблюдалась, но она оказалась, как указывает автор, далеко не абсолютной. Результаты исследований на межвидовых гибридах показали, что среди самобесплодных гибридов у половины сеянцев рыльца пестиков были расположены выше пыльников, а у другой половины находились на одном уровне с ними. Автор пришла к предварительному заключению о том, что наиболее надежным признаком, сопутствующим фертильности, является не строение цветка, а выровненность ягод в кисти. У самоплодных сеянцев черной смородины ягоды в кисти выровненные, у самобесплодных – невыровненные. Не было обнаружено связи между самофертильностью и положением андроцея и гинецея по отношению друг к другу и в исследованиях А. С. Вавилова (Vavilov, 1980). Аналогичного мнения придерживается и Т. П. Огольцова (Ogoltsova, 1992), которая считает, что существует немало самоплодных сортов, у которых рыльца пестиков превышают по длине тычиночные нити.

Исследованиями А. Г. Зазулина (Zazulin, 2020) в условиях Беларуси было установлено, что у высокосамоплодных сортов черной смородины и сортов с хорошей самоплодностью рыльца пестиков (за редким исключением) были расположены ниже пыльников или на одном уровне с ними. Однако у среднесамоплодного сорта ‘Мила’ отмечена лонгестилия, а у сорта ‘Рахиль’ несмотря на то, что рыльце пестика и пыльники располагались на одном уровне, самоплодность была низкой. Низкая самоплодность сорта ‘Рахиль’ наблюдалась и в условиях Ленинградской области (Tikhonova, 2019).

Уровень самоплодности может изменяться при возделывании сорта в разных почвенно-климатических зонах, но, как правило, большинство сортов сохраняют присущую им самоплодность (Volodina, 1972).

Т. В. Жидехина и И. В. Гурьева (Zhidyokhina, Guryeva, 2010) выявили, что хорошей способностью к самоопылению в условиях Центрального Черноземья России обладают сорта черной смородины ‘Маленький принц’, ‘Сенсей’, ‘Тамерлан’ и ‘Шалунья’. Кроме них, наиболее самоплодными и высокопродуктивными сортами, способными обеспечивать ежегодные высокие урожаи на моносортной промышленной плантации, являются: ‘Вернисаж’, ‘Воспоминание’, ‘Зеленая дымка’, ‘Кармелита’, ‘Stor Klas’, ‘Черный жемчуг’, ‘Элевеста’ (Zhidyokhina, Guryeva, 2010). Эти же сорта показывают высокую и хорошую степень самоплодности и в Северо-Западном регионе России (Tikhonova, 2015, 2019).

В условиях Брянской области, по данным Е. Г. Акуленко (Akulenko, 2017), высокий и хороший уровень самоплодности проявляют сорта ‘Чара’, ‘Услада’, ‘Кудмиг’ и ‘Подарок Астахову’.

При изучении 115 образцов черной смородины на Кокинском опорном пункте ВСТИСП Ф. Ф. Сазоновым (Sazonov, 2015) установлено, что к числу высокосамоплодных могут быть отнесены сорта ‘Ажурная’, ‘Брянский агат’, ‘Гамаюн’, ‘Грация’, ‘Дачница’, ‘Литвиновская’, ‘Орловский вальс’, ‘Нара’, ‘Рита’, ‘Севчанка’ и ‘Стрелец’, которые при самоопылении завязывают более 50% плодов.

В Северо-Западном регионе России высокой и стабильной самоплодностью характеризуются сорта ‘Навля’, ‘Добрыня’, ‘Голубичка’, ‘Голосеевский великан’, ‘Валентина’, ‘Козацкая’, ‘Арапка’, ‘Канахама’, ‘Фат’ (Tikhonova, 2019).

В Кировской области, по данным Т. И. Салтыковой и др. (Saltykova et al., 2019), высокую степень самоплодности проявляют сорта селекции ФАНЦ Северо-Востока ‘Аркадия’ и ‘Сапфир’, а также 22 элитные формы, созданные в институте. Хороший уровень самоплодности наблюдается и у сортов ‘Мулатка’ и ‘Шаганэ’.

В Забайкалье высокая самоплодность (> 54%) отмечена у сортов черной смородины селекции Бурятского НИИСХ – ‘Забайкалочка’, ‘Горхон’, ‘Березовка’. Очень высокой самоплодностью (82–84%) характеризуются сорта ‘Воронинская’, ‘Гайхал’, ‘Янжай’, ‘Тона’, ‘Подарок Калининой’, ‘Сперанта’. По данным Н. К. Гусевой и О. Н. Папиловой (Guseva, Papilova, 2014), эти сорта являются донорами самоплодности. Даже при низкой самоплодности второго родителя они обеспечивают высокий выход самоплодных сеянцев.

В Беларуси, по данным А. Г. Зазулина (Zazulin, 2020), высокую самоплодность проявляют белорусские сорта ‘Катюша’, ‘Память Вавилова’, ‘Белорусская сладкая’, сорт ‘Ruben’, интродуцированный из Польши, и румынский сорт ‘Geo’, гинецей которых расположен на уровне пыльников.

При изучении восьми сортов черной смородины в Польше (Denisow, 2003) было установлено, что степень самоплодности зависит от генотипа сорта, способа опыления и погодных условий. По наблюдениям автора, наибольшее количество плодов (60–70%) было получено при свободном опылении, 44–64% плодов завязалось при искусственном самоопылении и 20% – при естественном самоопылении. Хорошую самофертильность показали сорта 'Öjebyn', 'Ben Nevis', 'Ben Lomond', 'Ben Alder', 'Ben Tirran' и 'Triton'. У них не было выявлено существенной разницы между количеством завязавшихся ягод при искусственном самоопылении, как указывает автор, и контрольном варианте опыления. Несколько меньшую самофертильность показали сорта 'Titania' и 'Ceres' (40 и 45% соответственно). В варианте естественного самоопыления, как отмечает автор (Denisow, 2003), самая высокая завязываемость ягод была отмечена у сорта 'Ben Lomond' (45%). Сорта 'Titania' и 'Ceres' завязывали менее 20% плодов. У остальных изученных сортов количество завязавшихся плодов было на уровне 30%. Работами этого же автора (Denisow, 2006) было показано, что пыльца указанных выше восьми сортов черной смородины имеет высокую жизнеспособность (80–100%), однако ее способность к прорастанию зависит от температурных факторов. В годы с более прохладной погодой во время цветения пыльцевые трубки формировались только у 10–40% пыльцы, в то время как в годы с благоприятными погодными условиями прорастали 50–80% пыльцевых зерен.

Поиск и выделение источников высокой самоплодности для создания новых стабильно урожайных сортов является одной из важных задач селекции. Для промышленного и любительского садоводства высокосамоплодные сорта представляют интерес с точки зрения использования их в моносортных посадках.

Работ, посвященных изучению завязываемости ягод без участия насекомых-опылителей у сортов черной смородины, особенно в условиях Северо-Западного региона России, немного. *Цель нашего исследования* заключалась в изучении самоплодности новых сортов, поступивших в коллекцию ВИР в последние годы, выделение наиболее самоплодных из них для последующего использования в селекционных программах и формирования промышленных насаждений.

Материал и методика

Изучение самоплодности сортов проводили в 2019–2022 гг. на коллекции черной смородины научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР». Исследования по каждому сорту проводили в течение не менее трех лет в вариантах опыления: 1) естественное самоопыление без искусственного нанесения пыльцы (автогамия); 2) искусственное самоопыление путем нанесения пыльцы, собранной с нескольких кустов изучаемого сорта (гейтоногамия); 3) свободное опыление, которое служило контролем. При изучении руководствовались общепринятыми методиками (Program and methods..., 1980; Sedov, Ogoltsova, 1999). В качестве объектов исследования были использованы 30 сортов, отнесенных по своему происхождению к восьми генетическим группам (табл. 1). При анализе полученных

Таблица 1. Сорта черной смородины, включенные в исследование
(НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», 2019–2022 гг.)

Table 1. Black currant cultivars included in the study
(Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, 2019–2022)

Учреждение-оригинатор	Сорт	Генетическое происхождение*
ВНИИС им. И.В. Мичурина (г. Мичуринск)	Фея Ночи (к-45555)	ESDSk
ВНИИ люпина (г. Брянск)	Партизанка Брянская (к-45548), Литвиновская (к-45542), Селеченская 2 (к-42637)	ESDSk
Кокинский опорный пункт ВСТИСП (Кокино)	Дебрянск (к-45531)	ESDSk
Самарская опытная станция	Вертикаль (к-45528)	ESDCan
НИИСС им. М.А. Лисавенко (г. Барнаул)	Лика (к-45526), Капель (к-45538)	ESDSkBr
Новосибирская ЗПЯОС им. И.В. Мичурина (г. Новосибирск)	Августа (к-45525), Соломон (к-45552), Ирмень (45537) Дегтяревская (к-45532), Няня (к-45546)	ESDSk ESD не установлено
ЮУНИИСК (г. Челябинск)	Подарок Ильиной (45536)	ESDSk
Свердловская ССС (селекционная станция садоводства, г. Екатеринбург)	Атаман (к-44192), Викторина (к-45525), Мушкетер (к-45544), Фортуна (к-44194) Перезвон (к-45589)	ESDSk ESDSk ESD
Красноярская опытная станция (г. Красноярск)	Кача (к-41185)	ESD

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Учреждение-оригинатор	Сорт	Генетическое происхождение*
ДВНИИСХ (г. Хабаровск)	Амгунь (к-35807) Таежный Сувенир (к-35808)	ESD PaucD
ИС УААН (Украина, Киев)	Радужная (к-45549)	ESDSkUs
Lithuanian Horticulture Institute (Литва, Каунас)	Gagatai (к-44168)	ESDSk
Research Inst. of Pomology and Floriculture (Польша, Скерневице)	Ceres (к-42511)	ESD
The James Hutton Institute (Шотландия)	Ben Alder (к-45522), Ben Connan (к-45523), Ben Lomond (к-32611) Ben Gairn (к-45524)	ESk ESkUs ESkUs EDSk
Не установлено	Лидия (к-45543)	не установлено

Примечание: **E** – *Ribes nigrum* subsp. *europaeum* Jancz.; **S** – *R. nigrum* subsp. *sibiricum* E. Wolf; **D** – *R. dikuscha* Fisch. ex Turcz.; **Sk –** скандинавский экотип *R. nigrum* L.; **Us –** *R. ussuriense* Jancz.; **Can** – *R. hudsonianum* var. *canadense* Jancz.; **Br** – *R. bracteosum* Dougl.; **Pauc** – *R. pauciflorum* Turcz. ex Ledeb.

Note: **E** – *Ribes nigrum* subsp. *europaeum* Jancz.; **S** – *R. nigrum* subsp. *sibiricum* E. Wolf; **D** – *R. dikuscha* Fisch. ex Turcz.; **Sk –** Scandinavian ecotype of *R. nigrum* L.; **Us –** *R. ussuriense* Jancz.; **Can** – *R. hudsonianum* var. *canadense* Jancz.; **Br** – *R. bracteosum* Dougl.; **Pauc** – *R. pauciflorum* Turcz. ex Ledeb.

данных, помимо количества завязавшихся ягод, учитывали основные параметры – среднюю массу ягоды, количество семян и показатель эффективности оплодотворения, которые позволяют наиболее полно оценить уровень самоплодности сорта и отразить качество опыления и оплодотворения по каждому из трех вариантов. Показатель эффективности оплодотворения («урожай 100 цветков») определяли путем умножения завязываемости ягод на среднюю массу ягоды по каждому варианту опыления. Статистическую обработку данных проводили при помощи пакета программ Microsoft Excel и методических рекомендаций (Dospekhov, 1985). Метеоданные по вегетационным периодам 2019–2022 гг. были получены в отделе автоматизированных информационных систем (АИС) генетических ресурсов растений.

Погодные условия.

Зимы 2019–2022 гг. были морозными и снежными, без резкой смены низких минусовых температур оттепелями, которые являются губительными для зачатков цветков в смешанных почках ряда сортов черной смородины. Весной 2019, 2021 и 2022 г. холодная погода, которая продержалась длительное время, затормозила на 10–12 дней наступление вегетации и начало цветения. Кроме того, в 2019 г. в I декаде месяца установилась невысокая температура воздуха, сопровождавшаяся осадками. Минимальная температура воздуха составила –0,2…–1,4°С. Установившаяся впоследствии жаркая сухая погода обусловила ускорение процесса раскрывания цветков. Цветение большинства образцов было непродолжительным и составило 8-9 дней, у отдельных образцов – лишь 5-6 дней. В 2020 г. в I декаде – начале II декады мая началось похолодание, и холодная погода держалась до середины III декады мая. Минимальная температура воздуха достигала –2°С; средняя температура составила 10,2°С. В силу этого цветение ультраранних и ранних сортов было затяжным и продолжалось 19 дней. Жаркая погода, которая пришла на смену похолоданию (рис. 1), ускорила процессы цветения и обусловила быстрое прохождение данной фенофазы у поздних сортов до 5–8 дней. В 2022 г. цветение также проходило при сложных погодных условиях. Теплая погода в начале мая вызвала раннее наступление фенофазы «цветение», а наступившее затем устойчивое похолодание значительно замедлило его и привело к некачественному оплодотворению и, как следствие этого, к опадению завязей у ряда сортов.

Результаты и обсуждение

Полученные данные показали, что количество завязавшихся ягод в зависимости от способа опыления было различным. В первом варианте опыления (автогамии) эта величина находилась в пределах 2,8–75,5%; при искусственном самоопылении – 3,9–89,2%; при свободном опылении завязываемость ягод составила 35,4–78,5%.

В зависимости от количества завязавшихся при естественном самоопылениии ягод изучаемые сорта были отнесены в 4 группы самоплодности (табл. 2).

Процентное соотношение сортов, представленных в каждой группе, выглядит следующим образом (рис. 2).

Группа высокосамоплодных сортов (I) объединила 53,4% сортов от общего числа изученных. Процент полезной завязи при автогамии в пределах группы составил в среднем 62,4% при диапазоне вариабельности 50,1–75,7%. В эту группу вошли сорта, являющиеся трехи четырехгеномными потомками смородины дикуши (см. табл. 1). Помимо них, к этой группе отнесен сорт ‘Вертикаль’, который содержит гены смородины канадской (*R. hudsonianum* var. *canadense* Jancz.), и сорта ‘Радужная’ и ‘Ben Lomond’, в геноме которых присутствуют гены смородины уссурийской (*R. ussuriense* Jancz.) (см. табл. 1).

В группе высокосамоплодных сортов можно выделить восемь сортов с очень высокой самоплодностью – они завязывают при автогамии от 64,8 до 75,5% ягод. Это

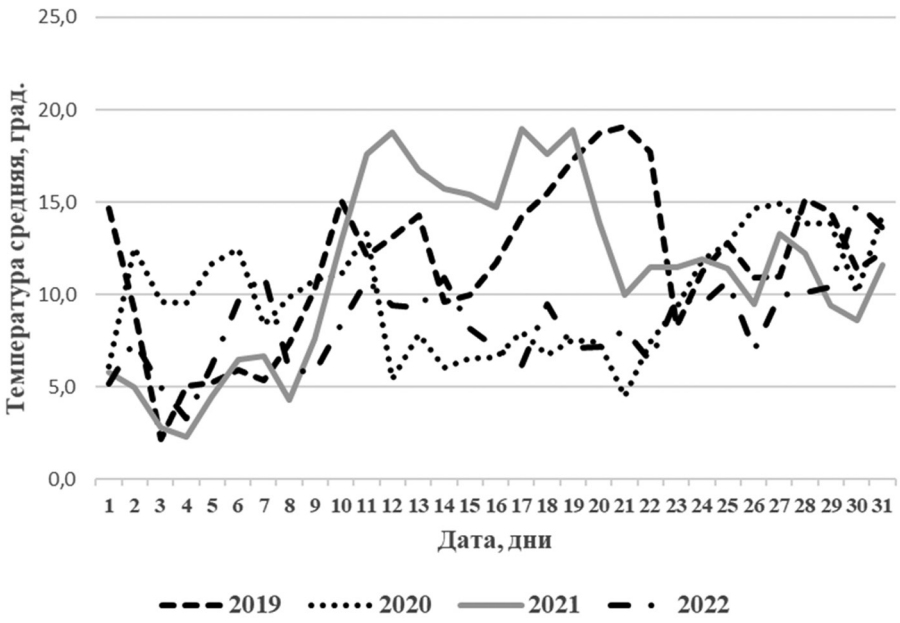


Рис. 1. Метеорологические условия в годы исследований, май 2019–2022 гг.
(Санкт-Петербург)

Fig. 1. Weather conditions during the years of the study, May, 2019–2022
(St. Petersburg)

Таблица 2. Характеристика групп сортов по уровню самоплодности
(НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», 2019–2022 гг.)

Table 2. Description of the cultivar groups according to their self-fertility levels
(Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, 2019–2022)

Группы сортов по уровню самоплодности	Завязываемость ягод при естественном самоопылении, % min–max	Количество сортов в группе, %
I – высокосамоплодные	50,1–75,7	53,4
II – с хорошей самоплодностью	35,7–49,6	40,0
III – среднесамоплодные	19,8	3,3
IV – низкосамоплодные	2,8	3,3

сорта ‘Литвиновская’ (рис. 3, a), ‘Партизанка Брянская’ (рис. 3, b), ‘Ben Gairn’, ‘Мушкетер’ и др. (табл. 3). При этом у сортов ‘Партизанка Брянская’, ‘Мушкетер’, ‘Радужная’, ‘Ben Gairn’, ‘Вертикаль’ и ‘Августа’ процент завязавшихся ягод при самоопылении и в контрольном варианте опыления были близки по значениям (см. табл. 3), что свидетельствует о действительно высокой способности этих сортов к опылению собственной пыльцой и возможности выращивания их в моносортных посадках.

Вариабельность уровня самоплодности среди представителей I группы находилась в пределах 3,1–43,9%. Стабильность признака (V = 3,1–10,0%) при этом была характерна для сортов ‘Литвиновская’, ‘Радужная’, ‘Вертикаль’, ‘Мушкетер’. Средняя изменчивость показателя (V = 11,8–20,0%) наблюдалась у сортов ‘Партизанка Брянская’, ‘Перезвон’, ‘Лика’, ‘Августа’, ‘Ceres’, ‘Gagatai’ и ‘Ben Gairn’. Значительной изменчивостью показателя (V = 23,9–37,2%) характеризовались сорта ‘Дебрянск’ и ‘Ирмень’.

Во II группу сортов, уровень самоплодности которых был оценен как хороший, отнесены сорта, которые завязывали при самоопылении от 35,7 до 49,6% плодов, или 42,8% в среднем по группе (см. табл. 3). Эти сорта составили 40% от общего числа изученных (см. рис. 2, табл. 2). Как и среди представителей I группы, большинство сортов с хорошей самоплодностью (54,5%) по генетическому происхождению являются производными европейского и сибирского подвидов *R. nigrum* L., смородины дикуши (*R. dikuscha* Fisch. ex Turch.) и скандинавского экотипа *R. nigrum*; 18,2% из них – трехгеномные потомки смородины дикуши. В состав группы вошел также шотландский сорт ‘Ben Connan’, содержащий гены европейского подвида, скандинавского экотипа *R. nigrum* и *R. usuriense* (см. табл. 1).

Среди сортов этой группы величины завязываемости ягод при естественном самоопылении и свободном опылении (контроль) были наиболее близкими по значению у сортов ‘Няня’ и ‘Викторина’ (см. табл. 3).

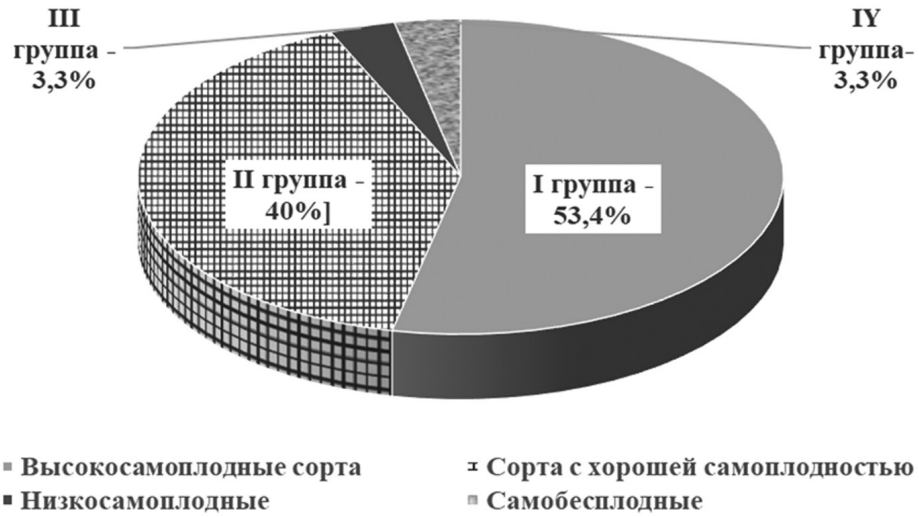


Рис. 2. Дифференциация сортов черной смородины по степени самоплодности
(НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», 2019–2022 гг.)

Fig. 2. Differentiation of black currant cultivars according to their self-fertility levels
(Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, 2019–2022)



a) **b)**

Рис. 3. Высокосамоплодные сорта черной смородины: a – ‘Литвиновская’; b – ‘Партизанка Брянская’

Fig. 3. Highly self-fertile black currant cultivars: a – ‘Litvinovskaya’; b – ‘Partizanka Bryanskaya’

Стабильность уровня самоплодности (V = 6,8–9,8%) в пределах группы наблюдалась лишь у трех сортов (‘Атаман’, ‘Викторина’ и ‘Подарок Ильиной’). Средние значения коэффициента вариации (V = 11,8–13,3%) отмечены у сортов ‘Фортуна’ и ‘Фея Ночи’. Для всех остальных сортов этой группы была характерна высокая вариабельность признака.

Низкую степень самоплодности показал сорт ‘Таежный Сувенир’, являющийся гибридом смородины малоцветковой (*R. pauciflorum* Turch. ex Ledeb.) и смородины дикуши (*R. dikuscha*).

К числу самобесплодных отнесен сорт ‘Кача’, у которого в течение трех лет исследования при самоопылении завязывалось лишь 1,4–6,2% ягод.

Искусственное нанесение пыльцы под изолятором в пределах сорта позволяет наиболее полно оценить его способность завязывать ягоды в моносортных посадках при условии лёта насекомых-опылителей.

Количество завязавшихся ягод в варианте искусственного самоопыления в среднем по всем сортам составило 69,7%, что на 18,5% было выше естественного самоопыления и на 7% – свободного (контрольного) варианта опыления.

Аналогичная закономерность была выявлена и в исследованиях Т. В. Жидехиной с соавторами (Zhidyokhina et al., 2010) при изучении самоплодности сортов черной смородины в условиях Тамбовской области.

Повышение показателей завязываемости ягод при данном контролируемом способе опыления происходит, по-видимому, за счет того, что на рыльце пестика наносится достаточное для нормального опыления и оплодотворения количество пыльцы. Кроме того, под марлевы-

Таблица 3. Основные характеристики уровня самоплодности сортов черной смородины при разных способах опыления
(НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР, 2019–2022 гг.)

Table 3. Main characteristics of self-fertility levels in black currant cultivars under different pollination patterns
(Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, 2019–2022)

Группы самоплодности	Сорт	Завязываемость ягод, %			Средняя масса ягоды, г m ± x			Количество семян, шт. m ± x			Показатель эффективности оплодотворения, г		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
I	Партизанка Брянская	75,5	79,2	72,1	1,04 ± 0,16	1,42 ± 0,16	1,41 ± 0,10	24 ± 2,3	26 ± 4,4	34 ± 2,6	78,5	112,5	101,7
	Ben Gairn	74,5	89,2	74,8	0,64 ± 0,04	0,69 ± 0,01	0,87 ± 0,08	23 ± 3,2	24 ± 0,7	31 ± 3,2	47,7	61,5	65,1
	Литвиновская	73,6	75,9	63,1	1,18 ± 0,17	2,06 ± 0,80	1,55 ± 0,09	39 ± 1,5	57 ± 3,0	45 ± 5,3	86,8	156,4	97,8
	Мушкетер	72,0	76,9	72,3	0,65 ± 0,03	0,83 ± 0,01	1,05 ± 0,07	27 ± 8,0	31 ± 0,5	49 ± 9,1	46,8	63,8	75,9
	Радужная	71,4	79,2	78,5	0,92 ± 0,07	1,26 ± 0,10	1,13 ± 0,09	30 ± 1,5	36 ± 9,5	34 ± 7,5	65,7	99,8	88,7
	Ben Lomond	70,7	81,5	77,6	0,64 ± 0,06	0,74 ± 0,09	0,92 ± 0,07	34 ± 5,9	36 ± 4,2	46 ± 4,3	45,2	60,3	71,4
	Вертикаль	67,3	86,7	68,4	0,97 ± 0,21	1,25 ± 0,11	1,27 ± 0,07	46 ± 9,3	60 ± 11,9	46 ± 5,2	65,3	108,4	86,9
	Августа	64,8	88,4	68,1	0,84 ± 0,02	0,87 ±0 ,09	1,15 ± 0,08	32 ± 7,5	40 ± 2,5	53 ± 5,0	54,4	76,9	78,3
	Лика	57,8	74,2	65,4	0,81 ± 0,05	0,88 ± 0,09	0,83 ± 0,04	12 ± 0,9	15 ± 0,5	23 ± 6,5	46,8	65,3	54,3
	Ceres	57,3	69,4	68,9	0,43 ± 0,04	0,38 ± 0,06	0,66 ± 0,08	21 ± 5,8	18 ± 2,6	26 ± 4,8	24,6	26,4	45,5
	Ирмень	55,9	82,5	66,4	0,80 ± 0,02	0,85 ± 0,06	0,90 ± 0,06	27 ± 1,2	29 ± 4,5	39 ± 6,1	44,7	70,1	59,8
	Дебрянск	53,1	57,4	70,2	0,68 ± 0,06	0,64 ± 0,07	0,85 ± 0,03	18 ± 3,8	27 ± 6,0	35 ± 3,5	36,1	36,7	59,7
	Лидия	51,7	85,9	65,8	0,78 ± 0,03	0,81 ± 0,12	0,83 ± 0,08	23 ± 3,2	25 ± 2,1	27 ± 1,9	40,3	69,6	54,6
	Gagatai	51,6	78,8	74,9	0,72 ± 0,08	0,70 ± 0,12	0,83 ± 0,01	20 ± 2,3	26 ± 3,8	36 ± 2,4	37,2	55,2	62,2
	Селеченская 2	51,3	77,4	64,2	0,98 ± 0,10	1,20 ± 0,07	1,26 ± 0,24	20 ± 4,4	25 ± 3,9	18 ± 6,0	50,3	92,9	80,9
	Перезвон	50,1	68,1	61,7	0,81 ± 0,14	0,79 ± 0,12	0,87 ± 0,03	26 ± 2,7	16 ± 2,2	30 ± 3,2	40,6	53,8	53,7
	Среднее по группе	**62,4**	**78,2**	**69,5**	**0,81**	**0,96**	**1,02**	**26**	**31**	**36**	**50,7**	**75,6**	**71,0**

Таблица 3. Окончание
Table 3. The end

Группы самоплодности	Сорт	Завязываемость ягод, %			Средняя масса ягоды, г m ± x			Количество семян, шт. m ± x			Показатель эффективности оплодотворения, г		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
II	Ben Alder	49,6	81,5	71,3	0,55 ± 0,04	0,66 ± 0,09	0,41 ± 0,01	14 ± 2,4	20 ± 4,4	14 ± 1,2	27,3	53,8	29,2
	Амгунь	47,9	73,9	62,5	0,80 ± 0,07	0,78 ± 0,13	1,06 ± 0,01	23 ± 2,9	26 ± 1,3	36 ± 1,7	38,3	57,6	66,3
	Няня	46,7	61,5	46,6	0,79 ± 0,09	0,98 ± 0,10	1,17 ± 0,05	29 ± 7,1	40 ± 7,1	65 ± 6,8	36,9	60,3	54,5
	Подарок Ильиной	44,8	55,9	53,9	0,73 ± 0,15	1,00 ± 0,13	0,90 ± 0,07	23 ± 1,0	41 ± 1,4	51 ± 2,5	32,7	55,9	48,5
	Фея Ночи	44,5	69,1	62,9	0,74 ± 0,07	0,68 ± 0,06	0,88 ± 0,04	20 ± 1,2	26 ± 4,0	46 ± 1,4	32,9	46,9	55,4
	Капель	42,7	58,2	62,4	0,91 ± 0,03	0,88 ± 0,13	1,07 ± 0,33	20 ± 1,9	26 ± 1,5	27 ± 1,3	38,9	51,2	66,8
	Фортуна	42,5	66,6	61,4	1,19 ± 0,16	1,08 ± 0,09	1,32 ± 0,05	38 ± 4,0	36 ± 3,8	40 ± 6,0	50,6	71,9	81,0
	Соломон	41,5	72,5	54,2	0,79 ± 0,11	0,69 ± 0,02	0,99 ± 0,08	33 ± 5,6	35 ± 6,3	49 ± 4,3	32,8	50,0	53,7
	Викторина	41,4	56,9	41,2	0,87 ± 0,05	0,90 ± 0,03	1,14 ± 0,08	24 ± 0,5	32 ± 7,0	43 ± 4,9	36,0	51,2	46,9
	Ben Connan	39,1	66,7	52,3	0,45 ± 0,02	0,69 ± 0,09	0,69 ± 0,03	14 ± 3,5	18 ± 6,5	15 ± 2,5	17,6	46,0	36,1
	Дегтяревская	36,9	68,5	54,7	1,13 ± 0,05	0,94 ± 0,12	1,33 ± 0,16	25 ± 2,0	33 ± 8,5	36 ± 4,7	41,7	64,4	72,8
	Атаман	35,7	57,6	52,1	0,77 ± 0,02	1,39 ± 0,03	1,18 ± 0,05	22 ± 2,4	32 ± 7,2	37 ± 4,3	27,5	80,1	61,5
	Среднее по группе	**42,8**	**65,7**	**56,3**	**0,81**	**0,89**	**1,01**	**24**	**30**	**38**	**34,4**	**57,4**	**56,1**
III	Таежный сувенир	19,8	48,3	59,7	0,36 ± 0,05	0,66 ± 0,14	0,55 ± 0,02	8 ± 2,5	17 ± 6,0	9 ± 2,3	7,1	31,9	32,8
IV	Кача	2,8	3,9	35,4	0,76 ± 0,09	1,10 ± 0,03	1,00 ± 0,02	7 ± 1,2	9 ± 3,4		2,1	4,3	35,4
Среднее по всем группам		**51,2**	**69,7**	**62,7**	**0,79**	**0,93**	**1,0**	**24**	**29**	**35**	**41,1**	**64,5**	**62,6**
Min		**2,8**	**3,9**	**35,4**	**0,36**	**0,38**	**0,41**	**7**	**9**	**9**	**2,1**	**4,3**	**29,2**
Max		**75,5**	**89,2**	**78,5**	**1,19**	**2,06**	**1,55**	**46**	**60**	**65**	**86,8**	**156,4**	**101,7**
$НСР_{05}$		**27,9**	**25,2**	**20,2**	**0,45**	**0,63**	**0,49**	**17,1**	**21,5**	**23,7**			

Примечание: 1 – естественное самоопыление (автогамия); 2 – искусственное самоопыление (гейтоногамия); 3 – свободное (контрольное) опыление
Note: 1 – natural self-pollination (autogamy); 2 – artificial self-pollination (geitonogamy); 3 – free pollination (control)

ми изоляторами, на наш взгляд, создаются более благоприятные условия для ее прорастания.

При изучении самоплодности сортов груши И. А. Пучкин (Puchkin, 2015) также отмечал положительное влияние искусственного самоопыления на завязываемость плодов. Исследователь предположил, что это может быть связано со стимулирующим действием энзимов пыльцы. Негативное влияние автогамии на завязываемость плодов он объясняет недостаточным количеством пыльцы, попадающей на рыльце пестика при этом способе опыления.

Значения коэффициента вариации (V) в данном варианте опыления колебались в широких пределах (от 2,6 до 55,5%). Стабильный уровень самофертильности наблюдался лишь у двух сортов – 'Викторина' (V = 2,6%) и 'Дебрянск' (V = 5,1%). Средняя степень изменчивости признака (V = 10,6–20%) была характерна для 40,7% сортов.

Количество сформировавшихся и созревших при свободном опылении ягод в среднем составило 62,7%, что на 11,5% было выше, чем при автогамии. У сортов I и II группы величина превышения показателя в зависимости от сорта колебалась от 0,3% ('Мушкетер', 'Ben Gairn') до 21,1% ('Ben Alder'). Исключение составил высокосамоплодный сорт 'Литвиновская', у которого при автогамии ягод в среднем завязалось больше, чем при свободном опылении (см. табл. 3), что может быть связано, на наш взгляд, с более чувствительной реакцией сорта на сложные условия цветения в 2019 и 2022 г., когда, по-видимому, под изоляторами создались более благоприятные условия для опыления и оплодотворения, чем при свободном опылении на открытом воздухе, в силу чего завязалось не только больше ягод, но также наблюдалось и меньшее опадение завязей.

У низкосамоплодного сорта 'Таежный Сувенир' и самобесплодного сорта 'Кача' в контрольном варианте опыления ягод завязалось больше, чем при автогамии, на 39,9% и 32,6% соответственно. При этом у подавляющего большинства сортов (76,9%) отмечена слабая и средняя вариабельность показателя. Значительная изменчивость признака (V > 20%) наблюдалась лишь у 23,1% изученных сортов, таких как 'Амгунь', 'Ceres', 'Ирмень', 'Фея Ночи', 'Атаман'.

Для более правильной оценки полученных данных мы оценивали не только процент завязавшихся ягод по всем трем способам опыления, но и такие показатели, как величина ягоды и количество семян в ней.

Ягоды, завязавшиеся при автогамии, уступали по своей величине двум другим вариантам опыления. Так, показатели средней массы ягоды при самоопылении варьировали в зависимости от сорта от 0,36 г ('Таежный Сувенир') до 1,19 г ('Фортуна') при среднем их значении 0,79 г. При этом 20,8% сортов ('Августа', 'Дегтяревская', 'Ирмень', 'Ben Connan' и др.) сохраняли стабильность признака (V = 3,8–7,9%). Средняя изменчивость массы ягоды (V = 11,1–19,7%) отмечена у 45,9% изученных сортов. У остальных 33,3% сортов отмечены значительные колебания показателя.

При искусственном самоопылении (гейтоногамии) величина средней массы образовавшихся ягод варьировала от 0,64 г до 2,06 г при среднем значении 0,93 г (см. табл. 3); превышение параметра в данном случае по сравнению с автогамией составило в среднем по всем сортам 0,14 г. При этом 18,5% сортов ('Няня', 'Ирмень', 'Соломон', 'Селеченская 2', 'Ben Gairn') характеризовались стабильностью признака (V = 1,01–5,7%); 29,6% ('Августа', 'Перезвон', 'Фортуна', 'Вертикаль', 'Лика', 'Радужная' и др.) имели среднюю вариабельность показателя. У 33,3% изученных сортов ('Партизанка Брянская', 'Литвиновская', 'Gagatai', 'Ben Lomond', 'Ben Alder' и др.) отмечена значительная вариабельность средней массы ягоды при данном способе опыления (V = 21,1–30,0%).

Средняя масса ягоды при свободном опылении по величине превосходила аналогичные показатели при двух других способах опыления (рис. 4). Она составила в среднем 1,0 г при вариабельности 0,41–1,55 г и характеризовалась при этом большей стабильностью – слабую и среднюю степень изменчивости признака имели 51,9% и 37,0% изученных сортов соответственно. Лишь у 11,1% сортов ('Августа', 'Селеченская 2' и 'Ceres') вариабельность показателя была значительной (V =22,9–32,5%).

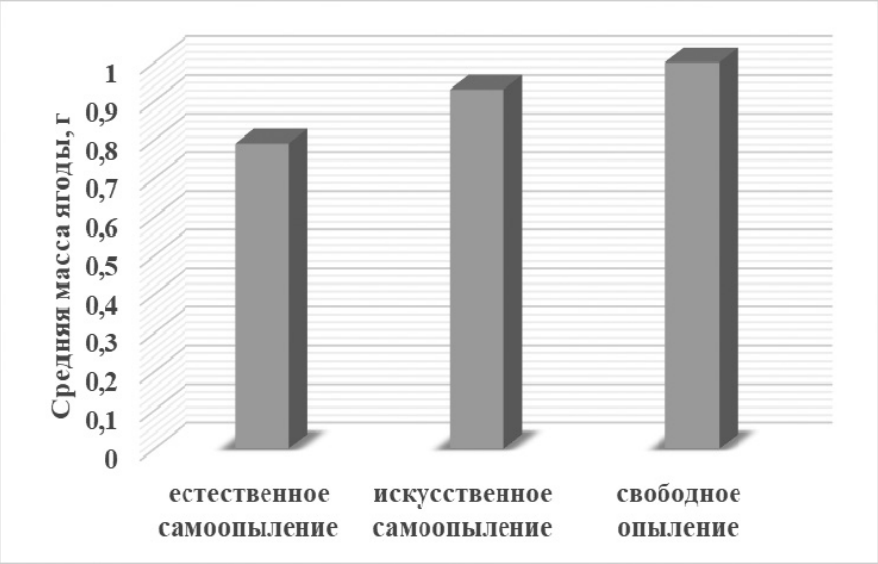


Рис. 4. Величина показателя «средняя масса ягоды» при разных способах опыления
(НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», 2019–2022 гг.)

Fig. 4. Average berry weight values under different pollination patterns
(Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, 2019–2022)

В более ранних исследованиях (Tikhonova, 2019) нами было отмечено, что завязавшиеся при самоопылении ягоды уступают по своей величине плодам, полученным от свободного опыления и особенно от искусственного самоопыления. Это предположение согласуется с мнением К. В. Кондрашовой (Kondrashova, 1972), которая отмечала, что по количеству завязавшихся плодов и образовавшихся семян гейтоногамия имеет явное преимущество по сравнению с автогамией. Исследователем было установлено также, что при автогамии, помимо меньшего процента образовавшихся плодов и меньшего количества семян на один опыленный цветок, наблюдалась и задержка прорастания пыльцы.

В нашем исследовании наблюдалась аналогичная закономерность. Исключение составили отдельные сорта – 'Амгунь', 'Дебрянск', 'Капель', 'Перезвон', 'Соломон', 'Фея Ночи', 'Gagatai' и 'Ceres'; у них отмечено незначительное повышение показателя (на 0,02–0,06 г) при самоопылении по сравнению с гейтоногамией. У сорта 'Дегтяревская' средняя массы ягоды при автогамии была на 0,19 г больше величины ягод, образовавшихся при искусственном самоопылении.

Величина семенной продуктивности при разных способах опыления показана на рисунке 5, из которого следует, что самое меньшее количество семян (24 штуки в одной ягоде) образовалось при самоопылении, а самое большее (35 семян) сформировалось при контрольном варианте опыления. В таблице 3 приведены величины данного показателя по всем изученным сортам и их средние значения по каждому варианту опыления.

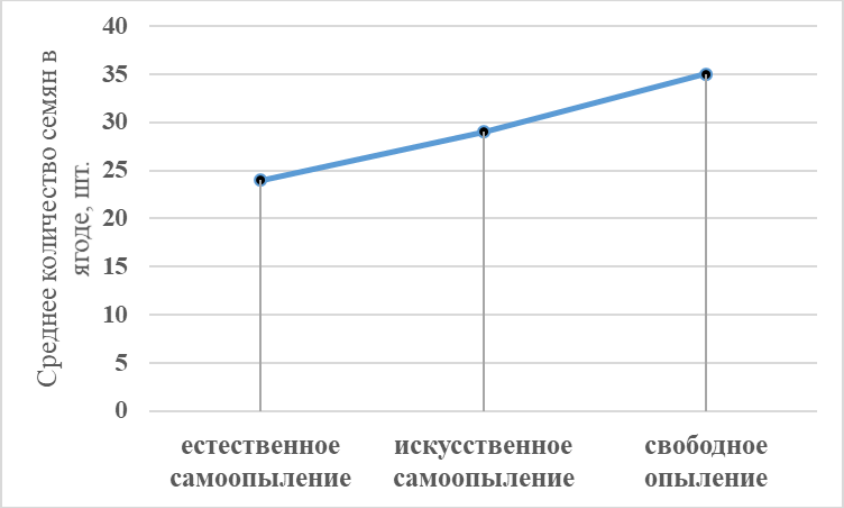


Рис. 5. Величина семенной продуктивности черной смородины в зависимости от способа опыления
(НПБ «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР», 2019–2022 гг.)

Fig. 5. Seed yield values in black currant berries depending on the pollination pattern
(Pushkin and Pavlovsk Laboratories of VIR, 2019–2022)

Показатель эффективности оплодотворения при автогамии варьировал от 2,1 г ('Кача') до 86,8 г ('Литвиновская') при среднем значении 41,1 г. Высокосамоплодные сорта с крупными по величине ягодами имели наиболее высокие значения данного показателя. К числу таких сортов относятся 'Партизанка Брянская', 'Литвиновская', 'Радужная' и 'Вертикаль', «урожай 100 цветков» которых составил 65,3–86,8 г. В отличие от них, высокосамоплодные сорта 'Ben Gairn', 'Ben Lomond' и 'Мушкетер', средняя масса ягоды которых при естественном самоопылении составила 0,64–0,65 г, имели невысокие значения показателя (см. табл. 3).

Из числа сортов II группы самые высокие значения признака имел крупноплодный сорт 'Фортуна' и чуть ниже – сорт 'Дегтяревская', также характеризующийся крупноплодностью. Минимальные значения параметра отмечены у шотландского сорта 'Ben Connan'. У остальных сортов значения показателя были средними – 32,7–37,2 г (см. табл. 3).

При искусственном самоопылении «урожай 100 цветков» составил в среднем 64,5 г и варьировал от 26,4 до 156,4 г. Самые высокие значения показателя имели высокосамоплодные, крупноплодные сорта 'Партизанка Брянская', 'Литвиновская', 'Вертикаль', 'Радужная', 'Селеченская 2' и сорт с хорошей самоплодностью 'Атаман'. Самыми низкими значениями характеризовались низкосамоплодный сорт 'Таежный Сувенир' и самобесплодный сорт 'Кача'.

Средняя величина показателя эффективности оплодотворения по всем изученным сортам в контрольном варианте опыления составила 62,6 г при диапазоне варьирования от 29,2 до 101,7 г. Как и в первых двух вариантах опыления максимальная величина этого параметра была характерна для высокосамоплодных, крупноплодных сортов 'Партизанка Брянская', 'Литвиновская', 'Радужная' и 'Вертикаль'.

Заключение

Проведенное изучение позволило выявить, что подавляющее большинство изученных сортов в условиях Северо-Запада России обладают высоким и хорошим уровнем самоплодности.

Наиболее высокая способность к опылению своей пыльцой без участия насекомых-опылителей присуща сортам 'Партизанка Брянская' (к-45548), 'Ben Gairn' (к-45524), 'Литвиновская' (к-45542), 'Мушкетер' (к-45544), 'Радужная' (к-45549), 'Ben Lomond' (к-32611) и 'Вертикаль' (к-45528). У этих же сортов отмечена слабая и средняя степень изменчивости признака. Они являются источниками высокой самоплодности для использования в селекционных программах.

Завязываемость ягод при автогамии, наиболее близкая по значению к свободному (контрольному) опылению и свидетельствующая о действительно высоком уровне самоплодности и возможности их выращивания в моносортных посадках, наблюдалась у сортов 'Партизанка Брянская', 'Ben Gairn', 'Мушкетер', 'Вертикаль'.

Наибольшая эффективность оплодотворения по всем изученным способам опыления характерна для высокосамоплодных, крупноплодных сортов 'Партизанка Брянская', 'Литвиновская', 'Радужная', 'Вертикаль'.

Естественное самоопыление негативным образом сказывается на величине плода и семенной продуктивности. Свободное и искусственное самоопыление, напротив, ведет к увеличению данных показателей.

References / Литература

Akulenko E.G. Self-fertilization and yield of new black currants' lines bred in the Russian Lupin Research Institute. *VESTNIK of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2017;2(60):28-30. [in Russian] (Акуленко Е.Г. Самоплодность и урожайность новых сортообразцов смородины черной селекции ФБГНУ ВНИИ люпина. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017;2(60): 28-30).

Arasu N.T. Self-incompatibility in *Ribes. Euphytica*. 1970;19:373-378. DOI: 10.1007/BF01904216

Denisow B. Self-pollination and self-fertility in eight cultivars of black currant (*Ribes nigrum* L.). *Acta Biologica Cracoviensia. Series Botanica*. 2003;45(1):111-114.

Denisow B. The biological value of pollen of some black currant cultivars (*Ribes nigrum* L.). *Acta Agrobotanica*. 2006;59(1):147-154. DOI: 10.5586/aa.2006.015

Dospekhov B.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат; 1985).

Guseva N.K, Papilova O.N. Breeding and technological berry qualities of Buryat cultivars of black currant. *Contemporary Horticulture*. 2014;2(10):34-37. [in Russian] (Гусева Н.К., Папилова О.Н. Селекционные и технологические показатели бурятских сортов смородины черной. *Современное садоводство*. 2014;2(10):34-37).

Kondrashova K.V. The effect of self-pollination on the black currant progeny (Vliyaniye samoopyleniya na potomstvo chernoy smorodiny). In: *Black Currant Cultivation in the USSR (Kultura chernoy smorodiny v SSSR)*. Moscow; 1972. p.466-473. [in Russian] (Кондрашова К.В. Влияние самоопыления на потомство черной смородины. В кн.: *Культура черной смородины в СССР*. Москва; 1972. С.466-473).

Ogoltsova T.P. Black currant breeding: past, present, and future (Selektsiya chernoy smorodiny – proshloye, nastoyashcheye, budushcheye). Tula; 1992. [in Russian] (Огольцова Т.П. Селекция черной смородины – прошлое, настоящее, будущее. Тула; 1992).

Palfitov I.F. Forecasting the fertility of apple varieties and choosing the best pollinators among them by the content of flavonoids in the reproductive structures of their flowers. Monograph (Prognozirovaniye plodovitosti sortov yabloni i vybor luchshikh sredi nikh opyliteley po soderzhaniyu flavonoidov v reproduktivnykh strukturakh ikh tsvetkov. Monografiya). Michurinsk: Michurinsk State Agrarian University; 2017. [in Russian] (Палфитов В.Ф. Прогнозирование плодовитости сортов яблони и выбор лучших среди них опылителей по содержанию флавоноидов в репродуктивных структурах их цветков. Монография. Мичуринск: Мичуринский государственный аграрный университет; 2017).

Palfitov V.F, Kozlov N.E., Molodtsov M.A. Endogenous factors of compatibility for apple trees varieties during pollination. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2010;(2):41-46. [in Russian] (Палфитов В.Ф., Козлов Н.Е., Молодцов М.А. Эндогенные факторы совместимости сортов яблони при опылении. *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2010;(2):41-46).

Program and methods for studying varieties of fruit, berry and nut crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kultur). Michurinsk: VNIIS; 1980. [in Russian] (Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Мичуринск: ВНИИС; 1980).

Puchkin I.A. Self-fertility of pear cultivars approved for cultivation in Altai Territory (Samoplodnost sortov grushi, rayonirovannykh v Altayskom kraye). In: *Competitive Cultivars and Technologies for High-Efficiency Horticulture. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; June 2–5, 2015; Orel (Konkurentosposobnye sorta i tekhnologii dlya vysokoeffektivnogo sadovodstva. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii; 2–5 iyunya 2015 g.; g. Orel)*. Orel: VNIISPK; 2015. p.154-157. [in Russian] (Пучкин И.А. Самоплодность сортов груши, районированных в Алтайском крае. В кн.: *Конкурентоспособные сорта и технологии для высокоэффективного садоводства. Материалы международной научно-практической конференции; 2–5 июня 2015 г.; г. Орел.* Орел: ВНИИСПК; 2015. С.154-157).

Saltykova T.I., Vakhrusheva N.S. Sofronov V.P. Self-fertility of cultivars and elite forms of black currant developed at the Federal Agricultural Research Center of the North-East (Samoplodnost sortov i elitnykh form smorodiny chernoy selektsii FBGNU FANTs Severo-Vostoka). In: *Methods and Technologies in Plant Breeding and Crop Production. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference; April 1–6, 2019; Kirov (Metody i tekhnologii v selektsii rasteniy i rasteniyevodstve. Materialy V mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii; 1–6 aprelya 2019 g.; g. Kirov)*. Kirov; 2019. p.120-122. [in Russian] (Салтыкова Т.И., Вахрушева Н.С., Софронов В.П. Самоплодность сортов и элитных форм смородины черной селекции ФБГНУ ФАНЦ Северо-Востока. В кн.: *Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве. Материалы V международной научно-практической конференции; 1–6 апреля 2019 г.; г. Киров*. Киров; 2019. С.120-122).

Sazonov F.F. Biological potential of black currant and possibilities of its implementation in new cultivars (Biologicheskiy potentsial smorodiny chernoy i vozmozhnosti ego realizatsii v novykh sortakh). In: *Competitive Cultivars and Technologies for High-Efficiency Horticulture. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; June 2–5, 2015; Orel (Konkurentosposobnye sorta i tekhnologii dlya vysokoeffektivnogo sadovodstva. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii; 2–5 iyunya 2015 g.; g. Orel)*. Orel: VNIISPK; 2015. p.167-170. [in Russian] (Сазонов Ф.Ф. Биологический потенциал смородины черной и возможности его реализации в новых сортах. В кн.: *Конкурентоспособные сорта и технологии для высокоэффективного садоводства. Материалы международной научно-практической конференции; 2–5 июня 2015 г.; г. Орел.* Орел: ВНИИСПК; 2015. С.167-170).

Sedov E.N., Ogoltsova T.P. (eds). Program and methodology of variety studies for fruit, berry and nut crops (Programma i metodika sortoizucheniya plodovykh, yagodnykh i orekhoplodnykh kultur). Orel: VNIISPK, 1999. [in Russian] (Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур / под ред. Е.Н Седова, Т.П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК; 1999).

Tikhonova O.A. Evaluation of self-fertility in black currant cultivars in the Northwest of Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 2019;180(2):60-72. [in Russian] (Тихонова О. А. Оценка самоплодности сортов черной смородины в условиях Северо-Запада России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 2019;180(2):60-72). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-60-72

Tikhonova O.A. Self-fertility of black currant cultivars. *Contemporary Horticulture*. 2015;1(13):39-53. [in Russian] (Тихонова О.А. Самоплодность сортов черной смородины. *Современное садоводство*. 2015;1(13):39-53).

Vavilov A.S. Self-fertility and self-sterility of cultivars and species of black currant (Samofertilnost i samosterilnost sortov i vidov chernoy smorodiny). In: *Black Currant Breeding (Seleksiya chernoy smorodiny)*. Novosibirsk; 1980. p.111-115. [in Russian] (Вавилов А.С. Самофертильность и самостерильность сортов и видов черной смородины. В кн.: *Селекция черной смородины*. Новосибирск; 1980. С.111-115).

Volodina E.V. Biology of black currant flowering (Biologiya tsveteniya chernoy smorodiny). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1972;46(2):157-167. [in Russian]. (Володина Е.В. Биология цветения черной смородины. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*, 1972;46(2):157-167).

Zabelina L.N. About the selection of black currant seedlings for self-fertility (Ob otbore seyantsev chernoy smorodiny na samoplodnost). In: *Black Currant Cultivation in the USSR (Kultura chernoy smorodiny v SSSR)*. Moscow; 1972. p.494-497. [in Russian] (Забелина Л.Н. Об отборе сеянцев черной смородины на самоплодность. В кн.: *Культура черной смородины в СССР*. Москва;1972. С.494-497).

Zazulin A.G. Assessment of self-fertility of black currant in the conditions of Belarus. *Fruit Growing*. 2020;23:211-219. [in Russian] (Зазулин А.Г. Оценка самоплодности смородины черной в условиях Беларуси. *Плодоводство.* 2020;23:211-219).

Zhidyokhina T.V., Guryeva I.V. Self-fertility of black currant cultivars in Tambov region. *Fruit Growing*. 2010;22(1):251-255. [in Russian] (Жидехина Т.В., Гурьева И.В. Самоплодность сортов смородины черной в условиях Тамбовской области. *Плодоводство*. 2010;22(1):251-255).

Zhidyokhina T.V., Guryeva I.V., Frolova L.A. Comparative characteristics of self-fertility in black currant cultivars under the conditions of the Central Black-Earth Region (Sravnitelnaya kharakteristika samoplodnosti sortov smorodiny chernoy v usloviyakh TsChR). *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2010;23:163-167. [in Russian] (Жидёхина Т.В., Гурьева И.В., Фролова Л.А. Сравнительная характеристика самоплодности сортов смородины черной в условиях ЦЧР. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2010;23:163-167).

Информация об авторе

Ольга Анатольевна Тихонова, 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, o.tikhonova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-0319-1477

Information about the author

Olga A. Tikhonova, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.tikhonova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-0319-1477

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 10.04.2023; approved after reviewing on 12.10.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

КОЛЛЕКЦИИ МИРОВЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ПРИОРИТЕТНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СЕЛЕКЦИИ

Научная статья
УДК 633.11-021.414
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115

CC BY

Стародавние сорта пшеницы – источники высокого качества и питательных свойств зерна

В. П. Шаманин[1], И. В. Потоцкая[1], С. А. Ессе[1], М. С. Гладких[1], С. С. Шепелев[1], Е. В. Зуев[2], Н. А. Виниченко[3], Х. Коксель[4], А. И. Моргунов[5]

[1] *Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Омск, Россия*

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

[3] *Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Курчатовский геномный центр, Новосибирск, Россия*

[4] *Университет Истинье, Стамбул, Турция;*

[5] *Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Казахстан*

Автор, ответственный за переписку: Инна Владимировна Потоцкая, iv.pototskaya@omgau.org

Актуальность. Повышение качества зерна у современных сортов яровой мягкой пшеницы – весьма актуальная задача селекции, для решения которой значительный интерес представляют стародавние сорта пшеницы (landraces), богатая коллекция которых имеется в ВИР. В связи с этим цель исследования – выделить источники повышенного содержания белка, клейковины, макро- и микроэлементов из выборки образцов стародавней яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР для селекции на повышение качества зерна.
Материалы и методы. Полевые исследования выполнены в 2020–2021 гг. на опытном поле Омского ГАУ в условиях южной лесостепи Западной Сибири. Посев проводили по пару в общепринятые сроки сева. Анализ минерального состава зерна образцов стародавних сортов осуществлен в Курчатовском геномном центре ИЦиГ СО РАН методом атомно-абсорбционной спектрометрии.
Результаты. Показано, что образцы, представляющие стародавние сорта разных регионов России, а также Казахстана, Таджикистана и Киргизии, характеризовались высоким содержанием белка (18,4–18,8%) и клейковины (35,9–36,0%) в зерне. Образцы из Казахстана отличались низким уровнем содержания Zn (в среднем 38,3 мг/кг), из Киргизии, напротив, повышенным содержанием Zn (41,9 мг/кг) и Fe (55,1 мг/кг), а из Таджикистана – высоким уровнем K (3820 мг/кг). У образцов стародавней пшеницы выявлена положительная связь между содержанием в зерне Mg, Mn, Fe и Zn.
Заключение. Образцы стародавней пшеницы представляют интерес в качестве источников для создания высокобелковых сортов с улучшенной питательной ценностью зерна.

Ключевые слова: яровая мягкая пшеница, стародавние сорта, макро- и микроэлементный состав зерна, технологические свойства зерна

Благодарности: анализ содержания макро- и микроэлементов в зерне стародавних сортов пшеницы выполнен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-534 от 28.05.2021); анализ и статистическая обработка экспериментальных данных проведены при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 22-16-20008 от 23.03.2022).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Шаманин В.П., Потоцкая И.В., Ессе С.А., Гладких М.С., Шепелев С.С., Зуев Е.В., Виниченко Н.А., Коксель Х., Моргунов А.И. Стародавние сорта пшеницы – источники высокого качества и питательных свойств зерна. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):103-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115

© Шаманин В.П., Потоцкая И.В., Ессе С.А., Гладких М.С., Шепелев С.С., Зуев Е.В., Виниченко Н.А., Коксель Х., Моргунов А.И., 2023

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115

Wheat landraces as sources of high grain quality and nutritional properties

Vladimir P. Shamanin[1], Inna V. Pototskaya[1], Svetlana A. Esse[1], Marina S. Gladkih[1], Sergey S. Shepelev[1], Evgeny V. Zuev[2], Natalia A. Vinichenko[3], Hamit Koksel[4], Alexey I. Morgounov[5]

[1] *Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Omsk, Russia*

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

[3] *Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kurchatov Genomic Center, Novosibirsk, Russia*

[4] *Istinye University, Istanbul, Turkey*

[5] *S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan*

Corresponding author: Inna V. Pototskaya, iv.pototskaya@omgau.org

Background. Improving the grain quality of modern spring bread wheat cultivars is a highly relevant task of breeding. To solve this problem, old and local wheat varieties (landraces) are of considerable interest. A rich collection of them is available among the plant genetic resources preserved at VIR. With this in view, the aim of this research was to identify sources of high protein, gluten, macro- and micronutrient content out of the landraces from the VIR collection for improvement of wheat grain quality through breeding.
Materials and methods. Field and laboratory research were conducted in the experimental field of Omsk State Agrarian University under the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia in 2020–2021. Sowing was carried out on fallow on conventional sowing dates. Mineral composition in the grain of the studied landraces was analyzed at the Kurchatov Genomic Center, Novosibirsk, using atomic absorption spectrometry techniques.
Results. The research results showed that landraces from different regions of Russia, Kazakhstan, Tajikistan, and Kyrgyzstan were characterized by high levels of protein (18.4–18.8%) and gluten (35.9–36.0%) in grain. Landraces from Kazakhstan had low Zn content (on average 38.3 mg/kg), while those from Kyrgyzstan, on the contrary, had high content of Zn (41.9 mg/kg) and Fe (55.1 mg/kg), and landraces from Tajikistan had high K content (3820 mg/kg). A positive relationship between the concentrations of Mg, Mn, Fe, and Zn was found in the grain of wheat landraces.
Conclusion. Wheat landraces are of interest as genetic resources for the development of high-protein cultivars with improved nutritional value of grain for the milling and breadmaking industries.

Keywords: spring bread wheat, landraces, macro- and micronutrient composition of grain, technological properties of grain

Acknowledgements: the analysis of macro- and micronutrient content in the grain of wheat landraces was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-534 of May 28, 2021); the analysis and statistical processing of the experimental data were carried out with the support of the Russian Science Foundation (Agreement No. 22-16-20008 of March 23, 2022).
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Shamanin V.P., Pototskaya I.V., Esse S.A., Gladkih M.S., Shepelev S.S., Zuev E.V., Vinichenko N.A., Koksel H., Morgounov A.I. Wheat landraces as sources of high grain quality and nutritional properties. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):103-115. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-103-115

Введение

Резкое снижение генетического разнообразия мягкой пшеницы по устойчивости к биотическим и абиотическим стрессорам произошло в результате целенаправленной селекции на повышение продуктивности и многовекового отбора сельскохозяйственных растений (Sehgal et al., 2016; Pototskaya et al., 2021).

Внедрение новых высокоурожайных сортов пшеницы в сельском хозяйстве привело к снижению биологической и питательной ценности зерна. Начиная с середины 1960-х годов уровень цинка, железа, меди и магния в зерне короткостебельных высокоурожайных сортов пшеницы существенно снизился (Fan et al., 2008). В связи с массовым внедрением интенсивных технологий производства сельскохозяйственной продукции с применением химических удобрений, пестицидов, различных стимуляторов роста, гормонов также наблюдается прогрессирующее снижение уровня макро- и микроэлементов в продукции растениеводства, предназначенной для потребления человеком в виде источников питания (Morgounov et al., 2007; Shukla et al., 2018).

Стародавние сорта пшеницы (landraces) представляют собой ценный генетический ресурс для ее селекции. В этом плане коллекция яровой мягкой пшеницы Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) является уникальной. Благодаря экспедициям Н. И. Вавилова и его соратников в разные страны мира большая часть коллекции, а именно 3674 образца пшеницы, была включена в нее до 1940 г. (Zuev et al., 2019). Для любого генетического банка семян такой материал имеет особую ценность, поскольку в нем содержится значительный запас комбинаций аллелей генов, обусловливающих приспособленность пшеницы к различным почвенно-климатическим условиям, устойчивость к биотическим факторам и высокое качество зерна (Baboev et al., 2021; Husenov et al., 2021).

Однако генотипический потенциал стародавних сортов маловостребован и практически не используется в селекции, которая в основном ориентирована на высокую урожайность. Изучение обширной коллекции стародавних сортов из 32 стран Западной Европы, России, Южной Азии и Австралии, так называемой «A.E. Watkins bread wheat landrace collection» (далее: Watkins-коллекция), и реализация программы WISP (Wheat Improvement Strategic Programme) свидетельствуют о селекционной ценности стародавних сортов в качестве исходного материала (Wingen et al., 2014). Анализ генетического разнообразия образцов Watkins-коллекции с использованием ДНК-чипа 35K выявил значительное количество новых SNP-локусов, которые представляют собой неиспользованный генетический потенциал для практической селекции (Winfield et al., 2018). Также проведена оценка полиморфизма образцов Watkins-коллекции по аллелям генов пуроиндолинов *Pina-D1* и *Pinb-D1*, контролирующих твердозерность зерновки (Qamar et al., 2014). В ходе анализа полиморфизма ДНК у 446 местных сортов из Афганистана с использованием метода генотипирования путем секвенирования (genotyping by sequencing, GBS) были идентифицированы новые аллельные варианты ценных для селекции генов (Manickavelu et al., 2014).

Стародавние сорта обладают более высокой питательной ценностью в сравнении с современными сортами пшеницы; выявлены генотипические различия по содержанию в зерне стародавних сортов макро- и микроэлементов: K, P, Mg, Fe и Zn (Jakobsone et al., 2015; Velu et al., 2019). За последние 5–7 лет наблюдается повышенный интерес к стародавним сортам пшеницы, зерно которых рассматривают в качестве источника питания, оказывающего положительное влияние на здоровье человека (Morgounov et al., 2016; Shewry, 2018). Этой теме почти целиком были посвящены международные конференции в Италии в 2018 г. и Турции в 2019 г. Тем не менее количество исследований по оценке минерального состава и технологических свойств зерна стародавних сортов весьма ограничено. Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина (Омский ГАУ) получил образцы стародавних сортов яровой мягкой пшеницы, которые выращивали когда-то на территории Российской Империи и бывшего СССР, для создания целевой коллекции генотипов с улучшенными признаками качества зерна.

Цель исследования – выделить источники повышенного содержания белка, клейковины, макро- и микроэлементов из выборки образцов стародавних сортов яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР для селекции на повышение качества зерна пшеницы.

Материал и методы

Материал выращивали на опытном поле Омского ГАУ (55°01’ с. ш., 73°18’ в. д.) в условиях южной лесостепи Западной Сибири в период 2020–2021 гг. Изучено 75 образцов стародавних сортов пшеницы из коллекции ВИР (табл. 1).

Изученные стародавние сорта принадлежали восьми разновидностям вида *Triticum aestivum* L.: *lutescens* (Alef.) Mansf., *erythrospermum* (Koern.) Mansf., *ferrugineum* (Alef.) Mansf., *milturum* (Alef.) Mansf., *turcicum* (Koern.) Mansf., *caesium* (Alef.) Mansf., *albidum* (Koern.) Mansf., *graecum* (Koern.) Mansf. Все образцы происхождением из Российской Империи и разных регионов бывшего Советского Союза. Сборы образцов и включение их в коллекцию ВИР проведены с 1908 по 1951 г., широко представлены образцы (45 шт.), пополнившие коллекцию с 1912 по 1929 г. Российские стародавние сорта родом из Краснодарского края, Поволжья, Северо-Западного региона, Западной и Восточной Сибири, а также Дальнего Востока.

В 2020 г. семена каждого образца стародавнего сорта были посеяны вручную по одному рядку длиной 1 м. в 2-кратной повторности, расстояние между рядками – 20 см. В 2021 г. посев образцов стародавней пшеницы проводили сеялкой ССФК-7 на глубину 5 см, площадь делянки – 1 м^2, в 2-кратной повторности. Способ посева рядовой, норма высева – 500 зерен на 1 м^2. В качестве стандарта высевали сорт яровой мягкой пшеницы ‘Элемент 22’.

Погодные и почвенные условия. В период вегетации яровой пшеницы в 2020 г. наблюдался недобор осадков в течение вегетационного периода – 167 мм со среднесуточной температурой воздуха 17,1°C. В 2021 г. также отмечены неблагоприятные гидротермические условия для роста и развития растений пшеницы – средняя температура – 16,7°C, сумма осадков – 170 мм. Почва опытного поля Омского ГАУ лугово-черноземная, тяжелосуглинистого гранулометрического состава, содержит 5,2% гумуса.

Метод атомно-абсорбционной спектрометрии. В 2021 г. анализ минерального состава зерна образцов стародавней пшеницы проведен в Курчатовском геномном центре ИЦиГ СО РАН по следующим макро- и микроэлементам: Ca, K, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn. Анализ каждого об-

Таблица 1. Образцы стародавних сортов яровой мягкой пшеницы из коллекции ВИР, изученных в Омском ГАУ, 2020–2021 гг.

Table 1. Accessions of spring bread wheat landraces from the VIR collection studied at Omsk State Agrarian University, 2020–2021

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Год включения в коллекцию / Year of inclusion into the collection	Число образцов, шт. / Number of accessions, pcs.	Происхождение / Origin
404; 1135; 1934; 1964; 1986; 2938; 4130; 4145; 8042; 8076; 8114; 8884; 9116; 9137; 9141; 9207; 9611; 9889; 11373; 14688; 16111; 22234; 22396; 22400; 22471; 22687; 23303; 23317; 23320; 23327; 23330; 23348; 24873; 24882; 24941; 24942; 24989; 25014; 26446; 26465; 26473; 30933; 31917; 32651; 35977; 37319; 38587	1908–1912 1915–1924 1926–1929 1930–1935 1938–1947	6 14 18 6 3	Россия / Russia
2998; 11358; 25051; 25565; 25567; 25568; 25571; 25769; 27968; 30317; 34278; 34304; 34351; 34418; 34504; 34506; 34507; 34605; 40793	1912–1924 1929–1931 1934–1951	2 7 10	Казахстан / Kazakhstan
22683; 24770; 24773; 29619;	1928–1932	4	Таджикистан / Tajikistan
3256; 25225; 25250; 25273; 39267	1913–1929 1948	4 1	Киргизия / Kyrgyzstan

разца выполнен в 2-кратной повторности. За окончательный результат измерений принимали среднее арифметическое результатов двух параллельных измерений в каждой повторности. Химические элементы извлекались из пробы (~300 мг) семян следующей смесью: 0,5 мл H_2O, 0,5 мл концентрированной H_2O_2 (33%), 5 мл концентрированной HNO_3 (65%). Для подготовки проб использовали микроволновую систему Milestone Ethos UP. В дальнейшем объем пробы доводили до 50 мл деионизованной водой и использовали для анализа макро- и микроэлементов. Для измерения количества макроэлементов пробу разбавляли еще в 50 раз. Анализ содержания химических элементов проводили методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) с атомизацией в пламени на приборе ContrAA 800 D (Analytik Jena, Германия). Содержание элементов приводится в мг на кг сухого вещества. Расхождение между двумя параллельными вариантами (DV) рассчитывалось как (max – min) / min, выраженное в процентах.

Качество зерна. Анализ содержания белка и клейковины в зерне выполнен методом ИК-спектроскопии с помощью анализатора «Инфралюм ФТ 10 М» (Санкт-Петербург, Россия).

Статистическая обработка экспериментальных данных включала определение средних арифметических (Хср.), стандартных ошибок средних (± Sx), достоверность различий оценивали по наименьшей существенной разности на уровне значимости 5% ($НСР_{05}$) по результатам двухфакторного дисперсионного анализа (Dospekhov, 1985) с помощью программы STATISTICA v. 6.0 (StatSoft, Inc., США). Кластерный анализ выполнен методом попарного внутригруппового невзвешенного среднего (UPGMA – Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean) с помощью программы SPSS версии PASW Statistics 20.0 (IBM, США).

Результаты

Сравнительный анализ четырех групп образцов стародавней пшеницы из России, Казахстана, Таджикистана и Киргизии (рис. 1) по основным агрономическим признакам (массе 1000 зерен, содержанию белка, клейковины и урожайности) показал небольшое преимущество по крупности зерна образцов из России и Казахстана в 2020 г. (38,8 и 38,4 г соответственно) в сравнении с образцами из Таджикистана и Киргизии (36,8 и 36,4 г).

Стандартный сорт ‘Элемент 22’ превосходил образцы стародавней пшеницы по массе 1000 зерен в 2020–2021 гг. (42,5 и 38,7 г). В 2020 г. образцы из Казахстана имели наиболее высокую урожайность (492,7 г/м^2), а из Киргизстана – наиболее низкую (420,9 г/м^2). В 2021 г. урожайность изучаемых групп образцов варьировала от 317,6 до 342,8 г/м^2. По урожайности изученные образцы существенно уступали засухоустойчивому стандарту в оба года исследований (625,4 и 615 г/м^2). Существенных различий между изученными группами образцов, а также в сравнении их со стандартом по накоплению белка и клейковины в зерне не выявлено. В среднем за два года исследований изученные группы образцов характеризовались высоким содержанием белка (18,7%; 18,4%; 18,8% и 18,6%) и клейковины в зерне (35,7%; 35,1%; 35,9% и 36,0%).

Минеральный состав зерна образцов, относящихся к разным по происхождению группам, существенно не различался (табл. 2).

Отмечена высокая массовая доля в зерне стародавней пшеницы Fe – 51,0–55,1 мг/кг (DV = 4,3–5,9%), а также Ca – 634,8–643,3 мг/кг (DV = 15,5–19,5%) и Zn – 40,4–41,9 мг/кг (DV = 5,4–9,6%), за исключением группы образцов из Казахстана. Средние значения концентрации K, Mg, Cu и Mn по группам образцов разного географиче-

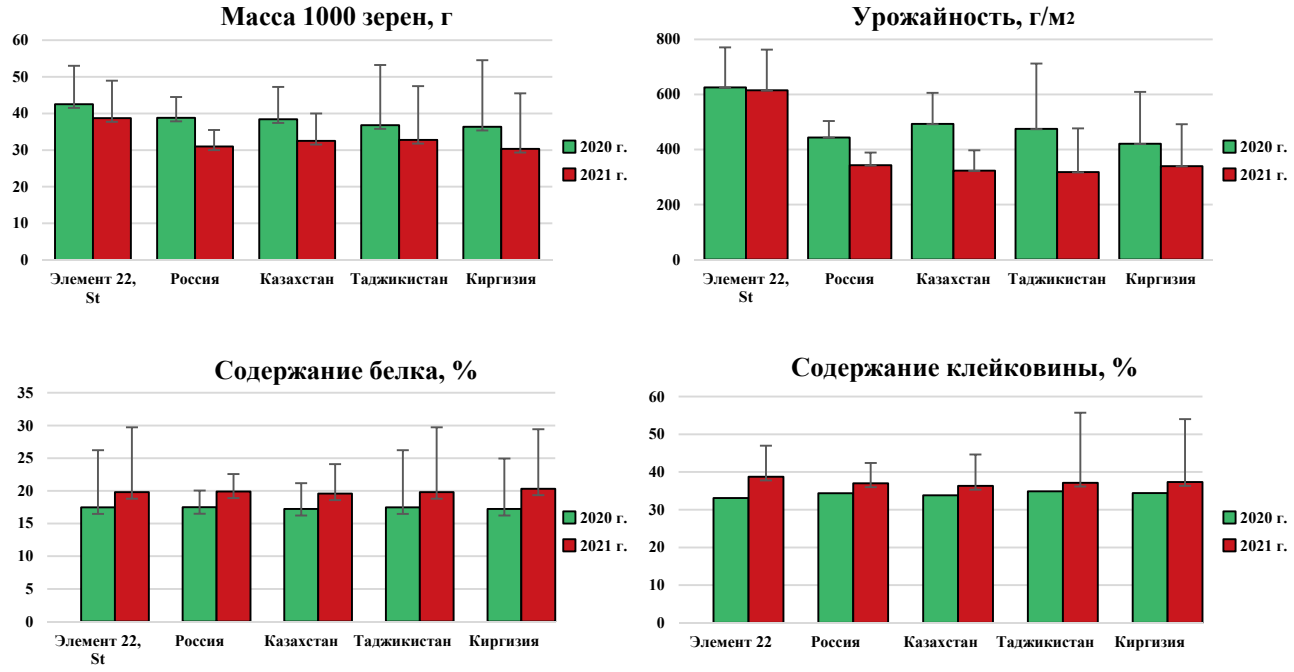


Рис. 1. Урожайность и технологические свойства зерна образцов стародавней пшеницы различного происхождения (опытное поле Омского ГАУ, 2020–2021 гг.)

Fig. 1. Grain yield and technological properties of wheat landrace accessions of various origin (experimental field of Omsk State Agrarian University, 2020–2021)

Таблица 2. Концентрация макро- и микроэлементов в зерне образцов стародавней пшеницы (опытное поле Омского ГАУ, 2021 г.)

Table 2. Concentrations of mineral macro- and micronutrients in the grain of wheat landrace accessions (experimental field of Omsk State Agrarian University, 2021)

Происхождение / Origin	Число образцов / Numbers of accessions	Урожайность, г/м² / Yield, g/m²	Макро- или микроэлемент / Macro- or micronutrient	Концентрация, мг/кг / Concentration, mg/kg	DV, % (разность между вариантами / difference between variants)	Min	Max	CV, % (коэффициент вариации / coefficient of variation)
Россия / Russia	47	342,8	Ca	634,8	19,0	303,7	1056,1	27,2
			K	3757,2	7,0	3011,3	5102,5	12,3
			Mg	1442,2	7,1	1269,3	1621,5	6,2
			Fe	54,7	5,5	41,1	67,7	11,2
			Zn	40,7	9,6	28,4	50,3	13,4
			Cu	3,6	13,8	2,2	5,6	19,4
			Mn	39,6	6,1	28,0	51,6	11,6
Казахстан / Kazakhstan	19	323,1	Ca	547,5	11,8	282,6	817,5	21,4
			K	3800,1	7,5	3156,3	4851,8	11,4
			Mg	1450,5	5,9	1245,8	1718,0	6,8

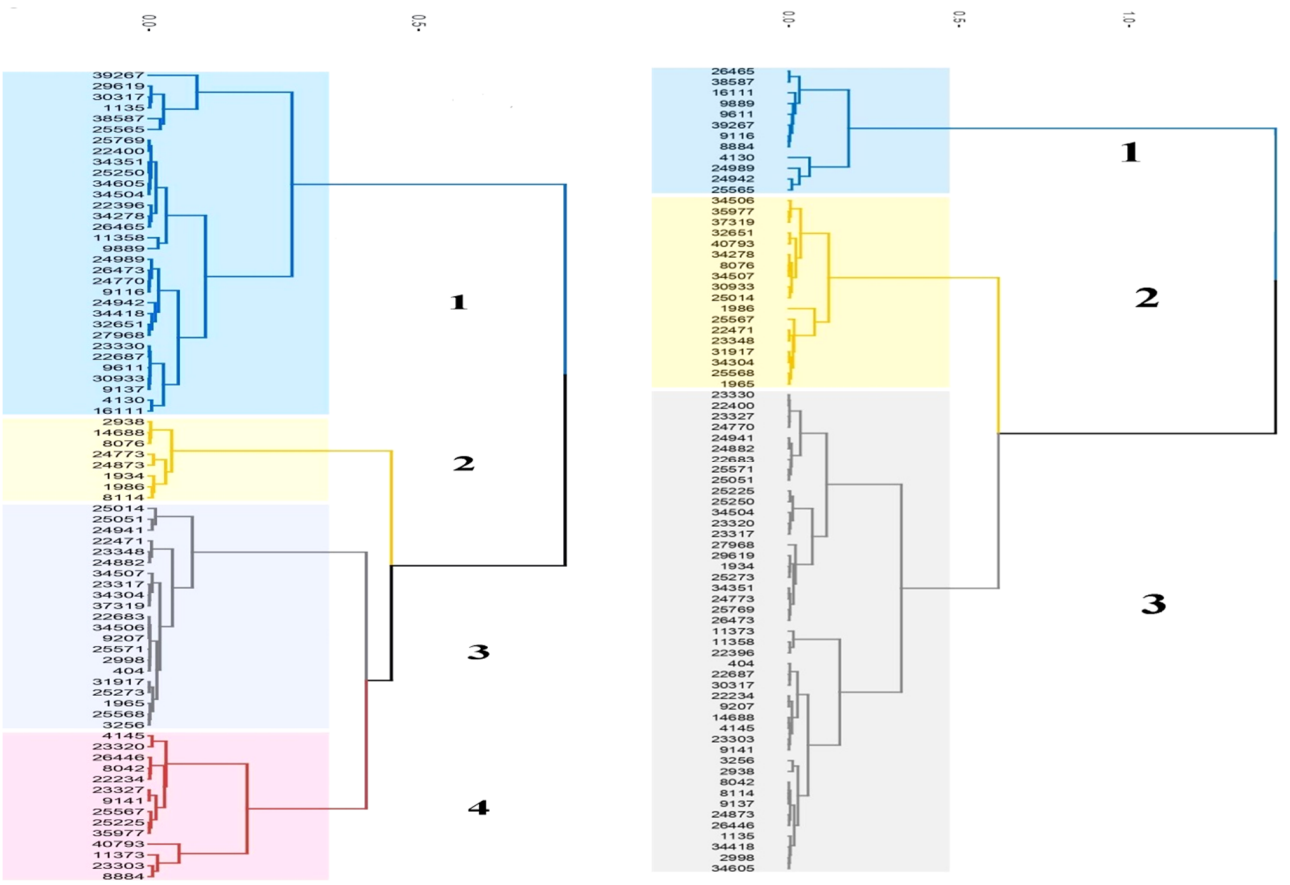
Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Происхождение / Origin	Число образцов / Numbers of accessions	Урожайность, г/м² / Yield, g/m²	Макро- или микроэлемент / Macro- or micronutrient	Концентрация, мг/кг / Concentration, mg/kg	DV, % (разность между вариантами / difference between variants)	Min	Max	CV, % (коэффициент вариации / coefficient of variation)
Казахстан / Kazakhstan	19	323,1	Fe	51,8	5,9	41,4	59,0	9,9
			Zn	38,3	7,6	30,7	52,7	14,3
			Cu	3,5	14,1	2,7	5,7	19,6
			Mn	39,4	6,4	32,4	47,2	9,3
Таджикистан / Tajikistan	4	317,6	Ca	639,9	19,5	424,2	1065,0	45,5
			K	3820,6	5,2	3566,8	4293,5	8,5
			Mg	1493,4	7,3	1431,3	1600,3	5,1
			Fe	51,0	5,5	47,4	53,8	5,7
			Zn	40,4	9,2	37,4	44,4	8,5
			Cu	3,8	12,0	3,7	4,0	3,9
			Mn	38,7	4,1	34,8	43,6	9,4
Киргизия / Kyrgyzstan	5	339,6	Ca	643,3	15,5	473,7	814,2	24,4
			K	3675,1	7,8	3520,5	3934,3	4,6
			Mg	1481,8	9,5	1370,3	1745,5	10,3
			Fe	55,1	4,3	50,1	64,3	10,1
			Zn	41,9	5,4	36,0	45,9	10,0
			Cu	3,9	5,4	2,6	4,4	20,1
			Mn	42,5	3,7	39,2	47,1	7,3

ского происхождения, напротив, были существенно ниже в сравнении со стандартом 'Элемент 22'. Наибольший размах изменчивости наблюдали по накоплению в зерне стародавней пшеницы Ca (CV = 21,4–45,5%), Cu (CV = 19,4–20,1%) и Zn (CV = 10,0–14,3%), за исключением образцов из Таджикистана. Низкий уровень изменчивости характерен для концентрации Mg в зерне всех групп образцов (CV = 5,1–10,3%). Не отмечено существенных различий по урожайности образцов разных географических групп – 342,8 г/м², 323,1 г/м², 317,6 г/м² и 339,6 г/м².

На рисунке 2 представлена классификация изученных образцов стародавней пшеницы различного происхождения по сходству макро- и микроэлементного состава зерна.

Дендрограмма А, построенная на основе сравнения содержания макроэлементов в зерне, имеет четыре кластера (1–4), включающих 32, 8, 21 и 14 образцов соответственно. Образцы стародавней пшеницы преимущественно сгруппировались в кластеры в зависимости от их географического происхождения. В первом кластере объединились образцы из Казахстана, Таджикистана, Восточной Сибири (Читинская, Иркутская области и Красноярский край), Дальнего Востока (Камчатская область и Приморский край), а также Алтайского края, имеющие средний уровень макроэлементов. Второй кластер содержал восемь образцов из разных регионов России и один из Таджикистана: все они характеризовались максимальным содержанием Ca (892,8–1065 мг/кг). Третий кластер включал 21 образец стародавней пшеницы с низким уровнем макроэлементов: Ca (378,6–604,5 мг/кг), K (3011,3–3876,3 мг/кг) и Mg (1295,5–1437,8 мг/кг). Образцы в четвертом кластере из Краснодарского края ('Белоколоска', к-8884), Алтайского края ('НОЭ', к-23303), Приморского края ('Белая Безостая', к-4145) и Казахстана ('Белотурка', к-25565; 'Акмолинка', к-40793) имели повышенное содержание K в зерне (4491,3–5082,5 мг/кг).



(А) (Б)

Рис. 2. Дендрограммы образцов стародавней пшеницы, построенные на основе сходства макро- (А) и микроэлементного (Б) состава их зерна

Fig. 2. Dendrograms of wheat landrace accessions based on the similarity of mineral macro- (A) and micronutrient (Б) compositions in their grain

По сходству состава микроэлементов в зерне образцы стародавней пшеницы сгруппировались в три кластера (1–3), включающих 12, 18 и 45 образцов соответственно (см. дендрограмму Б на рис. 2). Первый кластер образовали 12 образцов, которые отличались повышенным содержанием комплекса минералов в зерне: Mg (1512,5–1745,5 мг/кг), Mn (42,0–49,6 мг/кг), Fe (52,9–64,3 мг/кг) и Zn (43,5–50,3 мг/кг). Второй кластер включал 18 образцов с наиболее низким уровнем в зерне Mn (27,9–41,3 мг/кг), Fe (43,9–52,0 мг/кг), Zn (28,4–37,9 мг/кг) и Cu (2,7–3,5 мг/кг), из которых семь происходили из Казахстана. В третьем кластере сгруппировались образцы со средним уровнем микроэлементов: Mn (33,8–44,5 мг/кг), Fe (44,8–67,7 мг/кг), Zn (34,9–52,6 мг/кг) и Cu (2,9–4,4 мг/кг).

В результате проведенных исследований нами также выделены образцы с хорошими технологическими свойствами зерна и при этом отличающиеся повышенным содержанием макро- и микроэлементов (табл. 3).

Годы включения перечисленных в таблице 3 образцов в коллекцию ВИР – с 1911 по 1929 г., за исключением ‘Сибирка Ярцевская’ (к-38587, 1947 г.) и ‘Сандык’ (к-39267, 1948 г.). Из списка изученных элементов у данных образцов выявлено на 3–6 макро- и микроэлементов больше, чем у стандарта ‘Элемент 22’. Большинство образцов отличалось повышенным содержанием Zn и Fe в зерне (> 42 мг/кг и > 53 мг/кг соответственно), ‘Элемент 22’ – 32,0 и 51,0 мг/кг соответственно. Интересно отметить, что эти образцы также характеризовались более высокой концентрацией Mg (1558–1746 мг/кг) и Mn (42,0–51,6 мг/кг), что указывает на возможность одновременного улучшения минерального состава зерна по данным нутриентам.

Дефицитным элементом в зерне стародавней пшеницы можно рассматривать K, поскольку лишь отдельные образцы имели достоверное превышение над стандартом по данному показателю – ‘Белоколоска’ (к-8884) и ‘Белотурка’ (к-25565). Образцы, выделенные по комплексу макро- и микроэлементов, имели низкое содержание меди (2,89–4,70 мг/кг), за исключением образцов ‘Красноколоска’ (к-4130), ‘Штрубе’ (к-24942), ‘Русак’ (к-24989) и ‘Белотурка’ (к-25565) – 5,17–5,68 мг/кг. В настоящем исследовании в зерне образцов стародавней пшеницы отмечена положительная средняя взаимосвязь между концентрациями Mg, Mn, Fe и Zn ($r = 0,41–0,67$; $p \leq 0,05 = 0,23$).

Образцы ‘Перерод’ (к-1934, Курганская область, 2011 г.) и ‘Красная’, (к-24773, Таджикистан, 1929 г.) практически в два раза (1056–1065 мг/кг) превышали стандарт ‘Элемент 22’ (597 мг/кг) по накоплению Ca в зерне. Преимущество образцов стародавней пшеницы заключается также в высоком содержании белка (16,8–21,0%) и клейковины (32,3–40,1%) в зерне, тогда как по массе 1000 зерен (29,8–39,4 г) и урожайности (317,6–342,8 г/м^2) выделенные образцы уступали стандарту ‘Элемент 22’ (40,6 г и 615,0 г/м^2 соответственно).

Таблица 3. **Признаки качества зерна у стародавних сортов с наиболее высоким содержанием (в среднем за 2020–2021 гг.) макро- и микроэлементов**

Table 3. **Grain quality traits in wheat landraces with the highest concentrations of mineral macro- and micronutrients, on average for 2020–2021**

Образец, номер по каталогу ВИР / Accession, its VIR catalogue No.	Концентрация макро- или микроэлемента, мг/кг / Macro- or micronutrient concentration, mg/kg							Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	Белок, % / Protein, %	Клейковина, % / Gluten, %	Число макро- и микроэлементов* / Number of macro- and micronutrients*
	Ca	K	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn				
Элемент 22, стандарт / Element 22, reference	597	4210	1533	51,0	32,0	5,0	46,0	40,6	18,2	35,9	–
Россия / Russia											
Полтавка / Poltavka, к-9116	476	3523	1513	60,7	46,9	3,87	47,5	35,2	19,2	37,3	3
Скороспелка / Skorospelka, к-9611	631	3673	1518	61,8	48,9	3,45	46,3	35,2	19,9	36,4	3
Перерод / Pererod, к-1934	1056	3283	1388	53,6	35,6	3,50	42,3	30,5	19,5	33,3	3
Башкирка Кугушевская / Bashkirka Kugushevskaya, к-9889	304	3739	1585	65,5	50,3	4,34	48,2	32,5	19,3	37,4	4
Красноколоска / Krasnokoloska, к-4130	777	3353	1588	67,1	49,1	5,61	40,2	29,8	20,4	37,9	5
Белоколоска / Belokoloska, к-8884	509	5082	1436	60,7	47,7	4,02	47,1	32,8	18,8	39,9	5
Штрубе / Shtrube, к-16111	637	3446	1591	55,9	50,3	3,64	51,6	32,6	18,9	36,4	4
Штрубе / Shtrube, к-24942	446	3279	1606	53,7	45,9	5,17	49,6	36,3	18,2	34,6	5
Русак / Rusak, к-24989	381	3466	1470	52,9	43,5	5,44	41,2	35,3	18,5	35,4	3
Сибирка Ярцевская / Sibirka Yartsevskaya, к-38587	714	4087	1622	62,0	41,5	4,70	45,4	36,6	21,0	40,1	4
Казахстан / Kazakhstan											
Белотурка / Beloturka, к-25565	575	4594	1718	58,7	46,6	5,68	47,2	31,7	17,4	35,2	6
Теремок / Teremok, к-30317	498	4314	1558	57,8	44,8	2,89	42,0	38,8	16,8	32,3	3

Таблица3. Окончание

Table 3. The end

Образец, номер по каталогу ВИР / Accession, its VIR catalogue No.	Концентрация макро- или микроэлемента, мг/кг / Macro- or micronutrient concentration, mg/kg							Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	Белок, % / Protein, %	Клейковина, % / Gluten, %	Число макро- и микроэлементов* / Number of macro- and micronutrients*
	Ca	K	Mg	Fe	Zn	Cu	Mn				
Таджикистан / Tajikistan											
Красная / Krasnaya, к-24773	1065	3662	1445	47,4	42,1	3,65	48,4	36,0	19,4	37,7	3
Киргизия / Kyrgyzstan											
Сандык / Sandyk, к-39267	814	3521	1746	64,3	44,9	4,39	47,1	39,4	19,6	37,3	5
$НСР_{05}$ LSD 0.05	41,8	106,1	23,8	1,33	1,38	0,13	0,86	0,73	0,20	0,40	

Примечание: * – количество макро- и микроэлементов, по которым выявлено достоверное превышение стародавних сортов над стандартом ($p < 0,05$)

Note: * – the number of mineral macro- and micronutrients whose content in the landraces significantly exceeded the reference ($p < 0.05$)

Обсуждение результатов

По данным ФАО, к середине текущего столетия в связи с изменениями климата и устойчивым ростом населения в мире глобальный спрос на продовольствие, в частности на зерно пшеницы, удвоится (http://www.fao.org/faostat). При решении задачи удовлетворения спроса на зерно пшеницы основополагающим является повышение его питательных и технологических свойств. Большинство авторов рассматривают такие макроэлементы, как Ca, Mg, K, Na и P, а также микроэлементы Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Se и Zn в качестве наиболее важных, оказывающих положительное влияние на здоровье человека (Martínez-Ballesta et al., 2010; Velu et al., 2019). В процессе селекции в повышении урожайности пшеницы ведущую роль сыграло увеличение крупности зерновки и накопления в ней углеводов, что сопровождалось пропорциональным снижением содержания минералов – так называемым «эффектом разбавления» (Guttieri et al., 2015; Shewry et al., 2016; Marles, 2017), что привело к существенному снижению содержания белка, Mg, Na, P, а также Cu, Fe и Zn, сосредоточенных в основном в оболочках зерновки (Marcos-Barbero et al., 2021).

Генетическое разнообразие является мощным ресурсом для отбора генотипов с улучшенным качеством зерна, и в этой связи стародавние сорта, веками формировавшиеся на крестьянских полях, имеют высокую ценность для практической селекции (Mitrofanova, Khakimova, 2016; Zuev et al., 2019). В наших исследованиях отмечена наибольшая вариабельность и высокая массовая доля в зерне образцов стародавней пшеницы Ca (634,8–643,3 мг/кг) и Zn (40,4–41,9 мг/кг), за исключением группы образцов из Казахстана. Анализ 56 сортов яровой пшеницы, внедренных в производство до 1965 г., и семи коммерческих сортов пшеницы показал прогрессирующее сокращение Cu, Fe, Mg, Mn, P, Se и Zn в минеральном составе зерна современных сортов, за исключением концентрации Ca (Murphy et al., 2008). Сорт современной селекции ‘Элемент 22’, использованный в качестве стандарта, отличался относительно высоким уровнем макро- и микроэлементов, в частности Ca (597 мг/кг) и Mg (1533 мг/кг), но низкой концентрацией Zn (32 мг/кг).

Изученные нами образцы стародавней пшеницы имели некоторые различия по накоплению в зерне макро- и микроэлементов. Так, у образцов из Казахстана отмечен низкий уровень важного для здоровья человека микроэлемента цинка (в среднем 38,3 мг/кг), что можно объяснить генотипическим составом стародавних сортов-популяций, влиянием засушливого климата и более бедных по элементному составу почв Казахстана (Wang et al., 2020). Образцы стародавних сортов Киргизии, напротив, отличались высоким уровнем Zn (41,9 мг/кг) и Fe (55,1 мг/кг), а Таджикистана – K (3820,6 мг/кг) и Mg (1493,4 мг/кг). Целесообразно использовать в селекции образцы из разных регионов, чтобы расширить генетическое разнообразие создаваемых сортов пшеницы по нутриентному составу зерна.

Контрастность почвенно-климатических факторов, обусловленных особенностями географического расположения регионов, где сформировались популяции стародавних сортов, предопределяет различия и между сортами по изученным хозяйственно ценным признакам (см. рис. 1). Во многих опытах по изучению стародавних сортов не выявлено их преимущества над коммерческими сортами пшеницы по крупности и урожайности зерна,

однако это не должно рассматриваться как препятствие для использования данных генетических ресурсов в качестве источников уникальных признаков (Hernández-Espinosa et al., 2018; Maryami et al., 2020). Отмечены более высокие показатели по массе 1000 зерен в среднем за два года исследований у отдельных образцов из Казахстана (37,4–42,9 г), а также Саратовской, Самарской, Ростовской и Волгоградской областей РФ (38,0–40,2 г). По накоплению белка и клейковины в зерне больших различий между образцами не выявлено. Изученная группа образцов из Киргизии характеризовалась более высокими показателями данных признаков (18,8 и 35,9% соответственно).

Кластеризация образцов по уровню макроэлементов в зерне показала, что восемь из них имели высокое содержание Ca (892,8–1065 мг/кг), практически в два раза превышая по данному показателю стандарт 'Элемент 22' (597 мг/кг), а именно: 'Перерод' (к-1934, Курганская обл.), 'Хивинка' (к-1986, Самарская обл.), 'Простая' (к-14688, Волгоградская обл.), 'Сибирская' (к-8076, Тюменская обл.), к-8114 (Свердловская обл.), 'Американка' (к-24873, Якутия), 'Красная' (к-24773, Таджикистан).

При анализе накопления в зерне стародавней пшеницы Ca и Cu отмечено, что образцы с максимальной концентрацией данных элементов – 'Красноколоска' (к-4130), 'Штрубе' (к-24942), 'Русак' (к-24989), 'Белотурка' (к-25565), 'Перерод' (к-1934) и 'Красная' (к-24773) – включены в коллекцию ВИР до 1929 г.

Двенадцать образцов первого кластера дендрограммы по содержанию в зерне микроэлементов характеризовались высокой концентрацией Mn (42,0–49,6 мг/кг), Fe (52,9–64,3 мг/кг) и Zn (43,5–50,3 мг/кг) и рекомендованы к использованию как ценный ресурс для создания сортов пшеницы с улучшенными питательными свойствами: 'Красноколоска' (к-4130, Приморский край), 'Белоколоска' (к-8884, Краснодарский край), 'Полтавка' (к-9116, Ульяновская обл.), 'Скороспелка' (к-9611, Читинская обл.), 'Башкирка Кугушевская' (к-9889, Бурятия), 'Штрубе' (к-24942, Камчатская обл.), 'Штрубе' (к-16111, Приморский край), 'Русак' (к-24989, Волгоградская обл.), 'Гальянка' (к-26465, Алтайский край), 'Сибирка Ярцевская' (к-38587, Красноярский край), 'Белотурка' (к-25565, Казахстан), 'Сандык' (к-39267, Кыргызстан). В коллекцию ВИР эти образцы, за исключением 'Сибирка Ярцевская' и 'Сандык', также были привлечены в 1915–1929 гг., то есть до замены местных сортов пшеницы на селекционные, которые в результате целенаправленной селекции на повышение урожайности и, соответственно, повышение фракции эндосперма в зерновке, имели пониженное содержание микроэлементов (Shewry et al., 2016; Maryami et al., 2020). Можно предположить, что в результате искусственного отбора в процессе селекции, начиная с 1930-х годов, были утрачены ценные аллели генов, контролирующих повышенные концентрации макро- и микроэлементов в зерне пшеницы, в частности Cu и Zn, которые в большей степени подверглись «эффекту разбавления» в минеральном составе сортов пшеницы (Murphy et al., 2008; Marles, 2017).

При изучении коллекции 86 стародавних сортов пшеницы из разных провинций Турции установлено, что они отличаются более высоким содержанием Fe, Zn и Mn в сравнении с коммерческими сортами пшеницы – на 9,25; 14,82 и 6,75% соответственно. По данным корреляционного анализа выявлены положительные связи между концентрациями Fe, Zn и Mn в зерне стародавних сортов (Suchowilska et al., 2012; Akcura, Kokten, 2017), при этом в отдельных исследованиях не обнаружено отрицательной корреляции между урожайностью и концентрациями Fe и Zn в зерне (Chen et al., 2017; Krishnappa et al., 2017). В нашем исследовании отмечена положительная связь между содержанием Mg, Mn, Fe и Zn, что может быть использовано в селекции для создания сортов пшеницы с комплексом нутриентов.

Заключение

Результаты исследований показали, что образцы стародавних сортов из разных регионов России, а также Казахстана, Таджикистана и Киргизии характеризовались высоким содержанием белка (18,7%; 18,4%; 18,8% и 18,6% соответственно) и клейковины (35,7%; 35,1%; 35,9% и 36,0%) в зерне, однако существенно уступали стандарту по урожайности в 2021 г. (342,8 г/м^2, 323,1 г/м^2, 317,6 г/м^2 и 339,6 г/м^2 соответственно). Отмечены небольшие различия по минеральному составу зерна образцов, относящихся к разным по происхождению группам сортов. В частности, сорта из Казахстана отличались низким уровнем Zn (в среднем 38,3 мг/кг), сорта из Киргизии, напротив, высоким уровнем Zn (41,9 мг/кг) и Fe (55,1 мг/кг), а сорта из Таджикистана – повышенным содержанием K (3820 мг/кг).

Образцы 'Перерод' (к-1934, Курганская обл.), 'Хивинка' (к-1986, Самарская обл.), 'Простая' (к-14688, Волгоградская обл.), 'Сибирская' (к-8076, Тюменская обл.), к-8114 (Свердловская обл.), 'Американка' (к-24873, Якутия), 'Красная' (к-24773, Таджикистан) имели высокое содержание Ca (892,8–1065 мг/кг), практически в два раза превысив по данному показателю стандарт 'Элемент 22' (597 мг/кг). Образцы 'Красноколоска' (к-4130, Приморский край), 'Белоколоска' (к-8884, Краснодарский край), 'Полтавка' (к-9116, Ульяновская обл.), 'Скороспелка' (к-9611, Читинская обл.), 'Башкирка Кугушевская' (к-9889, Бурятия), 'Штрубе' (к-24942, Камчатская обл.), 'Штрубе' (к-16111, Приморский край), 'Русак' (к-24989, Волгоградская обл.), 'Гальянка' (к-26465, Алтайский край), 'Сибирка Ярцевская' (к-38587, Красноярский край), 'Белотурка' (к-25565, Казахстан), 'Сандык' (к-39267, Киргизия) характеризовались высокой концентрацией Mn (42,0–49,6 мг/кг), Fe (52,9–64,3 мг/кг) и Zn (43,5–50,3 мг/кг). В коллекцию ВИР эти образцы, за исключением 'Сибирки Ярцевской' и 'Сандык', поступили с 1915 по 1929 г., то есть до замены местных сортов пшеницы на селекционные, у большинства которых были утрачены ценные аллели генов, контролирующих высокие концентрации макро- и микроэлементов в зерне пшеницы. Отмечена положительная связь между концентрациями Mg, Mn, Fe и Zn в зерне стародавних сортов, что может быть использовано в селекции для создания сортов с комплексом микроэлементов в зерне пшеницы.

Существует возможность отбора генотипов с высокими концентрациями трех – шести макро- и микроэлементов. Выделены образцы, представляющие интерес в качестве источников для создания высокобелковых сортов с улучшенной питательной ценностью зерна: 'Полтавка' (к-9116), 'Скороспелка' (к-9611), 'Перерод' (к-1934), 'Башкирка Кугушевская' (к-9889), 'Красноколоска' (к-4130), 'Белоколоска' (к-8884), 'Штрубе' (к-16111), 'Штрубе' (к-24942), 'Русак' (к-24989), 'Сибирка Ярцевская' (к-38587), 'Белотурка' (к-25565), 'Теремок' (к-30317), 'Красная' (к-24773) и 'Сандык' (к-39267).

References / Литература

Akcura M., Kokten K. Variations in grain mineral concentrations of Turkish wheat landraces germplasm. *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*. 2017;9(2):153-159. DOI: 10.3920/QAS2016.0886

Baboev S., Muminjanov H., Turakulov K., Buronov A., Mamatkulov I., Koc E. et al. Diversity and sustainability of wheat landraces grown in Uzbekistan. *Agronomy for Sustainable Development*. 2021;41(3):34. DOI: 10.1007/s13593-021-00691-2

Chen X.P., Zhang Y.Q., Tong Y.P., Xue Y.F., Liu D.Y., Zhang W. et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. *Scientific Reports*. 2017;7(1):7016. DOI: 10.1038/s41598-017-07484-2

Dospekhov B.A. Methodology of field trial (with fundamentals of statistical processing of research results) (Metodika polevogo opyta [s osnovami statisticheskoy obrabotki resultatov issledovaniy]). Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Москва: Агропромиздат; 1985).

Fan M.S., Zhao F.J., Fairweather-Tait S.J., Poulton P.R., Dunham S.J., McGrath S.P. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2008;22(4):315-324. DOI: 10.1016/j.jtemb.2008.07.002

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Data: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/ [accessed Feb. 09, 2023].

Guttieri M.J., Baenziger P.S., Frels K., Carver B., Arnall B., Waters B.M. Variation for grain mineral concentration in a diversity panel of current and historical Great Plains hard winter wheat germplasm. *Crop Breeding and Genetics*. 2015;55(3):1035-1052. DOI: 10.2135/cropsci2014.07.0506

Hernández-Espinosa N., Mondal S., Autrique E., Gonzalez-Santoyo H., Crossa J., Huerta-Espino J. et al. Milling, processing and end-use quality traits of CIMMYT spring bread wheat germplasm under drought and heat stress. *Field Crops Research*. 2018;215:104-112. DOI: 10.1016/J.FCR.2017.10.003

Husenov B., Muminjanov H., Dreisigacker S., Otambekova M., Akin B., Subasi K. et al. Genetic diversity and agronomic performance of wheat landraces currently grown in Tajikistan. *Crop Science*. 2021;61(4):2548-2564. DOI: 10.1002/csc2.20463

Jakobsone I., Kantane I., Zute S., Jansone I., Bartkeviès V. Macroelements and trace elements in cereal grains cultived references in Latvia. *Proceeding of the Latvian Academy of Science. Section B. Natural, Exact and Applied Sciences*. 2015;69(4):152-157. DOI: 10.1515/prolas-2015-0022

Krishnappa G., Singh A.M., Chaudhary S., Ahlawat A.K., Singh S.K., Shukla R.B et al. Molecular mapping of the grain iron and zinc concentration, protein content and thousand kernel weight in wheat (*Triticum aestivum* L.). *PLoS One*. 2017;12(4):e0174972. DOI: 10.1371/journal.pone.0174972

Manickavelu A., Jighly A., Ban T. Molecular evaluation of orphan Afghan common wheat (*Triticum aestivum* L.) landraces collected by Dr. Kihara using single nucleotide polymorphic markers. *BMC Plant Biology*. 2014;14(1):320. DOI: 10.1186/s12870-014-0320-5

Marcos-Barbero E.L., Pérez P., Martínez-Carrasco R., Arellano J.B., Morcuende R. Genotypic variability on grain yield and grain nutritional quality characteristics of wheat grown under elevated CO_2 and high temperature. *Plants*. 2021;10(6):1043. DOI: 10.3390/plants10061043

Marles R.J. Mineral nutrient composition of vegetables, fruits and grains: The context of reports of apparent historical declines. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2017;56:93-103. DOI: 10.1016/j.jfca.2016.11.012

Martínez-Ballesta M.C., Dominguez-Perles R., Moreno D.A., Muries B., Alcaraz-López C., Bastías E., García-Viguera C., Carvajal M. Minerals in plant food: Effect of agricultural practices and role in human health. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2010;30(2):295-309. DOI: 10.1051/agro/2009022

Maryami Z., Huertas-García A.B., Azimi M.R., Hernández-Espinosa N., Payne T., Cervantes F. et al. Variability for glutenins, gluten quality, iron, zinc and phytic acid in a set of one hundred and fifty-eight common wheat landraces from Iran. *Agronomy*. 2020;10(11):1797. DOI: 10.3390/agronomy10111797

Mitrofanova O.P., Khakimova A.G. New genetic resources in wheat breeding for an increased grain protein content. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(4):545-554. [in Russian] (Митрофанова О.П., Хакимова А.Г. Новые генетические ресурсы в селекции пшеницы на увеличение содержания белка в зерне. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2016;20(4):545-554). DOI: 10.18699/VJ16.177

Morgounov A., Gomez-Becerra H.F., Abugalieva A., Dzhunusova M., Yessimbekova M., Muminjanov H. et al. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. *Euphytica*. 2007;155(1-2):193-203. DOI: 10.1007/s10681-006-9321-2

Morgounov A., Keser M., Kan M., Küçükçongar M., Özdemir F., Gummadov N. et al. Wheat landraces currently grown in Turkey: distribution, diversity, and use. *Crop Science*. 2016;56(6): 3112-3124. DOI: 10.2135/cropsci2016.03.0192

Murphy K.M., Reeves P.G., Jones S.S. Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars. *Euphytica*. 2008;163(3):381-390. DOI: 10.1007/s10681-008-9681-x

Pototskaya I.V., Shamanin V.P., Shepelev S.S., Bhatta M., Morgounov A.I. Analysis of the genome D polymorphism of synthetic wheat obtained on the basis of *Ae. tauschii* L. *Russian Journal of Genetics*. 2021;57(2):188-195. DOI: 10.1134/S1022795421020083

Qamar Z.U., Bansal U.K., Dong C.M., Alfred R.L., Bhave M., Bariana H.S. Detection of puroindoline (*Pina-D1* and *Pinb-D1*) allelic variation in wheat landraces. *Journal of Cereal Science*. 2014;60(3):610-616. DOI: 10.1016/j.jcs.2014.07.007

Sehgal D., Dreisigacker S., Belen S., Küçüközdemir Ü., Mert Z., Özer E. et al. Mining centuries old *in situ* conserved Turkish wheat landraces for grain yield and stripe rust resistance genes. *Frontiers in Genetics*. 2016;7:201. DOI: 10.3389/fgene.2016.00201

Shewry P.R. Do ancient types of wheat have health benefits compared with modern bread wheat? *Journal of Cereal Science*. 2018;79:469-476. DOI: 10.1016/j.jcs.2017.11.010

Shewry P.R., Pellny T.K., Lovegrove A. Is modern wheat bad for health? *Nature Plants*. 2016;2(7):16097. DOI: 10.1038/nplants.2016.97

Shukla A.K., Behera S.K., Pakhre A., Chaudhary S.K. Micronutrients in soils, plants, animals and humans. *Indian Journal of Fertilisers*. 2018;14(4):30-54.

Suchowilska E., Wiwart M., Kandler W., Krska R. A comparison of macro- and microelement concentrations in the whole grain of four *Triticum* species. *Plant, Soil and Environment*. 2012;58(3):141-147. DOI: 10.17221/688/2011-PSE

Velu G., Crespo-Herrera L., Huert J., Payne T., Guzman C., Singh R.P. Assessing genetic diversity to breed compet-

itive biofortified wheat with increased grain Zn and Fe concentrations. *Frontiers in Plant Science*. 2019;9:1971. DOI: 10.3389/fpls.2018.01971

Wang M., Kong F., Liu R., Fan Q., Zhang X. Zinc in wheat grain, processing, and food. *Frontiers in Nutrition*. 2020;7:124. DOI: 10.3389/fnut.2020.00124

Winfield M.O., Allen A.M., Wilkinson P.A., Burridge A.J., Barker G.L.A., Coghill J. et al. High density genotyping of the A.E. Watkins collection of hexaploid landraces identifies a large molecular diversity compared to elite bread wheat. *Plant Biotechnology Journal*. 2018;16(1):165-175. DOI: 10.1111/pbi.12757

Wingen L.U., Orford S., Goram R., Leverington-Waite M., Bilham L., Patsiou T.S. et al. Establishing the A.E. Watkins landrace cultivar collection as a resource for systematic gene discovery in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2014;127(8):1831-1842. DOI: 10.1007/s00122-014-2344-5

Zuev E.V., Brykova A.N., Kudryavtseva E.Yu. Results of analyzing the passport database 'spring bread wheat landraces in the VIR collection'. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(1):7-11. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-7-11. [in Russian] (Зуев Е.В., Брыкова А.Н., Кудрявцева Е.Ю. Результаты анализа паспортной базы данных «Местные сорта яровой мягкой пшеницы коллекции ВИР». *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(1):7-11). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-7-11

Информация об авторах

Владимир Петрович Шаманин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, vp.shamanin@omgau.org, https://orcid.org/0000-0003-4767-9957

Инна Владимировна Потоцкая, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, iv.pototskaya@omgau.org, https://orcid.org/0000-0003-3574-2875

Светлана Алексеевна Ессе, аспирант, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, sa.malyavko@omgau.org, https://orcid.org/0000-0001-9880-5904

Марина Сергеевна Гладких, кандидат сельскохозяйственных наук, агроном, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, ms.gavrilova@omgau.org, https://orcid.org/0000-0002-9473-865X

Сергей Сергеевич Шепелев, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 644008 Россия, Омск, Институтская пл., 1, sergeyschepelew@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4282-8725

Евгений Валерьевич Зуев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, и. о. заведующего отделом, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова; 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, e.zuev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Наталья Александровна Виниченко, инженер, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Курчатовский геномный центр – филиал ИЦиГ СО РАН, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, vinia@ngs.ru, https://orcid.org/0000-0002-7610-8654

Хамит Коксель, профессор, Университет Истинье, 34010 Турция, Стамбул, Эдирне Чырпичи Йолу, 9, hamitkoksel@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4150-2413

Алексей Иванович Моргунов, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, 010011 Казахстан, Астана, пр. Женис, 62, alexey.morgounov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7082-5655

Information about the authors

Vladimir P. Shamanin, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, vp.shamanin@omgau.org, https://orcid.org/0000-0003-4767-9957

Inna V. Pototskaya, Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, iv.pototskaya@omgau.org, https://orcid.org/0000-0003-3574-2875

Svetlana A. Esse, Postgraduate Student, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, sa.malyavko@omgau.org, https://orcid.org/0000-0001-9880-5904

Marina S. Gladkih, Cand. Sci. (Agriculture), Agronomist, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, ms.gavrilova@omgau.org, https://orcid.org/0000-0002-9473-865X

Sergey S. Shepelev, Cand. Sci. (Agriculture), Head of a Laboratory, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Sq., Omsk 644008, Russia, sergeyschepelew@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-4282-8725

Evgeny V. Zuev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Acting Head of a Department, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, e.zuev@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0001-9259-4384

Natalia A. Vinichenko, Engineer, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kurchatov Genomic Center, branch of the IC&G SB RAS, 10 Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk 630090, Russia, vinia@ngs.ru, https://orcid.org/0000-0002-7610-8654

Hamit Koksel, Professor, Istinye University, 9 Edirne Çırpıcı Yolu, Istanbul 34010, Turkey, hamitkoksel@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-4150-2413

Alexey I. Morgounov, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, 62 Zhenis Ave., Astana 010011, Kazakhstan, alexey.morgounov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7082-5655

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 12.05.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 12.05.2023; approved after reviewing on 08.11.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.16:632.4:575.1
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-116-123

CC BY

Наследование ювенильной устойчивости коллекционных образцов ячменя из Эфиопии к мучнистой росе

Р. А. Абдуллаев, О. В. Яковлева, Т. В. Лебедева

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

Автор, ответственный за переписку: Ольга Владимировна Яковлева, oly.yakovleva@mail.ru

Актуальность. Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – одна из ключевых продовольственных культур, занимающая четвертое место в мире по уровню посевных площадей и по объему производства среди зерновых. Часто одним их основных факторов, снижающим урожайность и качество продукции, является распространение в коммерческих посевах грибных патогенов. Среди болезней ячменя одной из самых распространенных и наиболее вредоносных считается мучнистая роса (возбудитель – *Blumeria graminis* (DC.) Golovin ex Speer f. sp. *hordei* Marchal). Устойчивость растений к *B. graminis* ограничивает распространение заболевания, а создание устойчивых сортов позволяет избежать снижения продуктивности растений. Специфичность отношений «хозяин – паразит» и утрата эффективности многих генов определяют необходимость постоянного изучения ранее не исследованных местных форм ячменя и поиска новых, наиболее эффективных генов устойчивости.
Материалы и методы. Исследовали генетический контроль ювенильной устойчивости к *B. graminis* у 14 образцов ярового ячменя из Эфиопского (Абиссинского) центра происхождения культурных растений. Инфекционным материалом для заражения ячменя служила природная популяция патогена. Показателями резистентности коллекционных форм считались интенсивность спороношения, а также качественные реакции тканей растения в ответ на проникновение гриба (некрозы и хлорозы). Оценка устойчивости к мучнистой росе проводилась в лабораторных и полевых условиях. Генетический контроль признака устойчивости изучали методом гибридологического анализа с последующей статистической обработкой.
Результаты и выводы. Ячмени из Эфиопского центра формообразования отличаются большим генетическим разнообразием. Изучение наследования ювенильной устойчивости к мучнистой росе позволило определить моногенный контроль признака у всех исследуемых образцов. Для селекции на иммунитет рекомендуются 10 образцов ячменя с одним рецессивным эффективным аллелем устойчивости и 4 – с доминантным контролем признака.

Ключевые слова: линии ячменя, генотип, аллель, гены устойчивости, патоген, *Blumeria graminis* f. sp. *hordei*

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № 0481-2022-0001 «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: Абдуллаев Р.А., Яковлева О.В., Лебедева Т.В. Наследование ювенильной устойчивости коллекционных образцов ячменя из Эфиопии к мучнистой росе. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):116-123. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-116-123

© Абдуллаев Р.А., Яковлева О.В., Лебедева Т.В., 2023

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-116-123

Inheritance of juvenile resistance to powdery mildew in barley accessions from Ethiopia

Renat A. Abdullaev, Olga V. Yakovleva, Tatiana V. Lebedeva

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

Corresponding author: Olga V. Yakovleva, oly.yakovleva@mail.ru

Background. Barley (*Hordeum vulgare* L.) is one of the key food crops, ranking fourth in the world in terms of sown area and production among cereals. Often, one of the main factors that reduces yield and product quality is the spread of fungal pathogens in commercial crops. Powdery mildew (causative agent: *Blumeria graminis* (DC.) Golovin ex Speer f. sp. *hordei* Marchal) is considered one of the most common and harmful among barley diseases. Plant resistance to *B. graminis* limits the spread of the disease, and the development of resistant cultivars prevents a decrease in plant productivity. The specificity of the host–pathogen relationship and the loss of efficiency in many genes determine the need for a continuous study of previously unexplored local barley forms and a search for new, most effective resistance genes.
Materials and methods. The genetic control of juvenile resistance to *B. graminis* was studied in 14 accessions of spring barley from the Ethiopian (Abyssinian) center of crop origin. The natural population of the pathogen served as infectious material for infecting barley. The intensity and nature of sporulation as well as the qualitative reactions of plant tissues in response to the penetration of the fungus (necrosis and chlorosis) were accepted as indicators of resistance in the accessions. Powdery mildew resistance was assessed under laboratory and field conditions. The genetic control of the resistance trait was studied using the method of hybridological analysis followed by statistical processing.
Results and conclusions. Barleys from the Ethiopian center of morphogenesis are characterized by great genetic diversity. Studying the inheritance of juvenile resistance to powdery mildew made it possible to ascertain the monogenic control of the trait in all studied forms. Ten barley accessions with one effective recessive resistance allele and four with the dominant control of the trait may be recommended for immunity-targeted breeding.

Keywords: barley lines, allele, genotype, resistance genes, pathogen, *Blumeria graminis* f. sp. *hordei*

Acknowledgements: the research was performed within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. 0481-2022-0001 “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: Abdullaev R.A., Yakovleva O.V., Lebedeva T.V. Inheritance of juvenile resistance to powdery mildew in barley accessions from Ethiopia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):116-123. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-116-123

Введение

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) является одной из ключевых продовольственных культур, занимающей по уровню посевных площадей и по объему производства среди зерновых четвертое место в мире. В нашей стране, по данным Росстата, в 2021 г. посевы ячменя составили 5194,5 тыс. га, средняя урожайность культуры – 28,8 ц/га (Federal State Statistics…, 2021). Ряд биологических особенностей (короткий вегетационный период, высокая адаптивность, относительная нечувствительность к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды) позволяет возделывать ячмень в различных почвенно-климатических зонах. Часто одним из факторов, снижающих урожайность и качество продукции, является распространение в посевах ячменя грибных болезней.

Среди болезней зерновых культур одной из самых распространенных и наиболее вредоносных является мучнистая роса. Возбудитель мучнистой росы злаков относится к классу аскомицетов (Ascomicetes), семейству мучнисторосяных грибов. *Blumeria graminis* (DC.) Golovin ex Speer – облигатный паразит, имеет узкоспециализированные формы, различающиеся по отношению к растению-хозяину. Так, на видах рода *Hordeum* L. развивается форма f. sp. *hordei* Marchal. Патоген поражает листья и листовые влагалища, колосья, стебли. В зависимости от климатических условий, потери урожая зерновых культур от болезни могут достигать 50% и более (Gong et al., 2013; Tratwal, Bocianowski, 2014). При этом современные сорта ячменя через 3–5 лет после создания могут частично или полностью терять устойчивость к патогену (Wang et al., 2023). Невосприимчивость растений к мучнистой росе ограничивает распространение заболевания, а создание устойчивых сортов позволяет избегать снижения продуктивности растений. Для этого необходим поиск новых, наиболее эффективных генов резистентности для использования их в современных селекционных сортах.

В литературе описано более ста генов, контролирующих устойчивость ячменя к мучнистой росе, но из них большая часть является аллелями известных генов *Mla* (хромосома 1H) и *Mlo* (хромосома 4H) (Seeholzer et al., 2010; Kusch, Panstruga, 2017; Dreiseitl, 2020). К сожалению, многие аллели малоэффективны против северо-западной популяции *B. graminis*.

Почти изогенные линии с генами *Mlc*, *Mlg*, *Mlh*, *Mlk*, *Mlnn*, *Mlp*, *Mlat*, *Ml(CP)*, *Ml(1402)*, *Ml(4145)*, *Ml(Ru2)*, *Ml05*, *Ml(La)* восприимчивы к популяции гриба в Санкт-Петербурге, а из 24 образцов с аллелями гена *Mla* устойчивы лишь носители четырех – *Mla16*, *Mla18*, *Mla19* и *Mlai*. Из девяти изученных форм с известными мутантными аллелями *mlo* высоким уровнем устойчивости к патогену характеризуются восемь – *mlo1*, *mlo3*, *mlo4*, *mlo5*, *mlo8*, *mlo9*, *mlo10*, *mlo11* (Abdullaev et al., 2019). Образцы – носители локуса *mlo* (*Mildew Locus O*), за исключением *mlo11*, получены путем искусственного мутагенеза и не встречаются в природных популяциях ячменя. Выращивание растений – *mlo*-мутантов сопровождается негативными плейотропными эффектами гена: снижением урожайности, преждевременным увяданием листьев, а также восприимчивостью к другим патогенным грибам (Acevedo-Garcia et al., 2014). Специфичность отношений «хозяин – паразит» и утрата эффективности многих генов определяет необходимость постоянного изучения ранее не исследованных местных форм ячменя и поиска новых эффективных генов устойчивости. Ранее, в лабораторных условиях в фазе проростков, оценили 925 образцов ячменя из Эфиопского (Абиссинского) центра разнообразия (Abdullaev et al., 2019). Среди них были выделены наиболее резистентные образцы, используемые нами в гибридологическом анализе.

Цель настоящей работы – изучить наследование признака устойчивости к *B. graminis* у генотипов ячменя из Эфиопии.

Материал и методы.

Изучили генетический контроль ювенильной устойчивости к возбудителю мучнистой росы у 14 образцов ярового ячменя, выделившихся по устойчивости к заболеванию (табл. 1). Природная (северо-западная) популяция патогена служила инфекционным материалом для заражения растений в фазе проростков и взрослых растений. Работы по выращиванию и гибридизации образцов ячменя проводили на экспериментальном поле научно-производственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (ППЛ ВИР, Санкт-Петербург, Пушкин). Опыление материнских растений проводили твелл-методом (Merezhko et al., 1973). В генетический анализ включали потомство одного растения каждого образца.

При изучении наследования признака устойчивости к болезни образцы ячменя скрещивали с восприимчивым сортом ‘Белогорский’ (к-22089, Россия, Ленинградская область), который использовали также в качестве накопителя инфекции и контроля при скрининге. Для определения аллельных отношений генов резистентные образцы ячменя из Эфиопии скрещивали с линиями – носителями известных эффективных генов *mlo10* (к-30224*)*, *mlo11* (к-30225), *Mla18* (к-31007) и *Mla19* (к-30238).

В лабораторных условиях в пластмассовые кюветы на увлажненную вату высевали по 1 рядку исходные родительские формы и гибриды первого поколения, а также 7-8 рядков гибридов второго поколения. Заражение растений патогеном проводили в фазу второго листа. Оценку поражения гибридов проводили в момент гибели неустойчивой родительской формы или контроля (при изучении аллельных отношений генов). Параметрами устойчивости служили степень спороношения, а также реакции тканей растений в ответ на проникновение гриба (некрозы и хлорозы). Степень поражения первого листа диагностировали на восьмой – десятый день после инокуляции, используя шкалу E. B. Mains и S. M. Dietz (1930). К устойчивым формам (R) относили растения, сходные по степени поражения с резистентной родительской формой (0, 1, 2 балла). Неустойчивыми (S) считали растения, сходные с восприимчивым родителем или контролем (баллы 3, 4). После статистической проверки однородности результаты расщепления гибридов второго поколения (F_2) по признаку устойчивости к мучнистой росе потомства индивидуальных растений гибридов первого поколения объединяли. Для проверки соответствия фактически полученных и теоретически ожидаемых значений использовали критерий χ^2 Пирсона. Расчеты проводили для 95-процентного уровня значимости (Dospekhov, 1985). Статистическая обработка данных гибридологического анализа выполнена с помощью программы Microsoft Excel.

Вирулентность патогена анализировали с использованием 47 линий ячменя, несущих известные гены устойчивости к *B. graminis*. Устойчивость взрослых растений исследовали на экспериментальном поле научно-произ-

Таблица 1. **Образцы ячменя, устойчивые к популяции мучнистой росы в фазах проростков и колошения**
Table 1. **Barley accessions resistant the powdery mildew population at the seedling and heading phases**

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Разновидность / Variety	Поражение, балл* / Disease severity, score*		
			Взрослые растения, поле / Adult plants, field		Проростки, лаборатория / Seedlings, laboratory
			2019	2020	
3554	местный	*pallidum*	7	7	1
5448	Abyn 8	*duplinigrum*	7	7	1
17554	Ep-80 Abissinien	*duplinigrum*	7	7	1
19975	Линия AHOR 1635/66	*deficiens, pallidum*	9	7	0
20041	Л. AHOR 4256/6	*pallidum*	7	7	2
20064	Линия AHOR 2574/65	*nigripallidum*	7	7	1
20077	Линия AHOR 2574/63	*duplinigrum*	7	7	1
20087	Линия AHOR 1501/65	*nigripallidum, pallidum*	7	7	2
20097	Линия AHOR 1506/66	*dupliatrum, duplinigrum*	7	7	0
20864	местный	*nutans*	7	7	0
21139	DZ02-180	*pallidum*	7	9	0
22752	местный	*nudimelanocrithum*	7	7	0
22986	Dz02-557	*deficiens*	7	7	0
25009	местный	*nigrinudum*	7	7	0
Белогорский (районированный сорт)			1	1	4

Примечание: * – ювенильная устойчивость образцов к *B. graminis* выражена в баллах по шкале E. B. Mains и S. M. Dietz (1930), реакция взрослых растений – по шкале И. Г. Лоскутова и др. (Loskutov et al., 2012)

Note: * – juvenile resistance of the accessions to *B. graminis* is expressed in points on the scale by E. B. Mains and S. M. Dietz (1930), while the reaction of adult plants on the scale by I. G. Loskutov et al. (2012)

водственной базы «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР». Устойчивость к болезни образцов ячменя оценивали с помощью балловой шкалы дважды – в фазы колошения и молочной спелости колоса. Баллы 7, 9 соответствуют реакции устойчивости, баллы 1, 3, 5 – восприимчивости (Loskutov et al., 2012).

Результаты и обсуждение

Генотипы ячменя из Эфиопии, устойчивые к популяции патогена в фазе проростков, сохраняли устойчивость на всех этапах онтогенеза в течение нескольких лет (табл. 1).

Наследование признака устойчивости к возбудителю мучнистой росы у генотипов ячменя из Эфиопии изучали на стадии проростков. В комбинациях от скрещивания 10 образцов (к-5448, к-17554, к-19975, к-20041, к-20077, к-20087, к-20097, к-22752, к-22986, к-25009) с восприимчивым сортом ‘Белогорский‘ гибриды F_1 были восприимчивы к болезни (балл 4), что указывает на рецессивный характер наследования устойчивости у этих образцов. Растения F_1 от скрещивания образцов к-3454, к-20064, к-20864 и к-21139 с сортом ‘Белогорский‘ оказались устойчивыми (0-1 балл) к болезни, что предполагает доминантный характер наследования признака у этой группы образцов.

Анализ расщепления фенотипов в гибридных популяциях второго поколения показал, что в фазе проростков у всех образцов ячменя наблюдается моногенный контроль устойчивости к *B. graminis*.

При этом у образцов к-5448, к-17554, к-19975, к-20041, к-20077, к-20087, к-20097, к-22752, к-22986 и к-25009 ген, контролирующий устойчивость к болезни, является рецессивным, а у образцов к-20064, к-20864, к-21139 и к-3454 – доминантным (табл. 2).

Соотношение устойчивых и восприимчивых растений от скрещивания сорта ‘Белогорский‘ с образцами к-20041, к-20097, к-22752, к-20064 в прямых и обратных комбинациях представлены в таблице 2. Реципрокные скрещивания устойчивых образцов с восприимчивой формой не выявили влияния материнского или отцовского родителя на характер расщепления.

В лабораторных условиях (стадия проростков) и в поле (взрослые растения) оценили 47 почти изогенных линий ячменя, с идентифицированными генами устойчивости. Носители генов *mlo* (аллели 1, 3–5, 8–11) и *Mla* (аллели 18, 19, i) не поражались или слабо поражались популяцией возбудителя мучнистой росы, формирующейся в условиях ППЛ ВИР. Образец к-31005 с аллелем *Mla16*, ранее характеризовавшийся высокой устойчивостью к патогену, оказался восприимчивым к *B. graminis* во взрослой фазе развития в 2022 г. (табл. 3). Поте-

Таблица 2. **Распределение гибридов второго поколения (F_2) по устойчивости к *Blumeria graminis***
Table 2. **Distribution of the second-generation (F_2) hybrids according to their resistance to *Blumeria graminis***

Комбинация скрещивания / Cross combination	Изучено растений / Plants studied	Фактическое соотношение фенотипов (У : В)* / Actual ratio of phenotypes (R : S)*	χ^2 (1 : 3)	χ^2 (3 : 1)
к-5448 × Белогорский	329	84 : 245	0,05	–
к-17554 × Белогорский	433	93 : 340	2,87	–
к-19975 × Белогорский	471	112 : 359	0,37	–
к-20041 × Белогорский	309	74 : 235	0,19	–
к-20064 × Белогорский	420	312 : 108	–	0,11
к-20087 × Белогорский	441	92 : 349	4,03	–
к-20097 × Белогорский	549	147 : 402	0,92	–
к-20864 × Белогорский	420	312 : 108	–	0,11
к-21139 × Белогорский	387	287 : 100	–	0,15
к-22752 × Белогорский	358	78 : 280	1,97	–
к-22986 × Белогорский	567	143 : 424	0,01	–
к-25009 × Белогорский	347	74 : 273	2,50	–
Белогорский × к-20041	346	94 : 252	0,87	–
Белогорский × к-20077	413	84 : 329	4,77	–
Белогорский × к-20097	571	150 : 421	0,49	–
Белогорский × к-22752	428	122 : 306	2,17	–
Белогорский × к-20064	424	308 : 116	–	1,26
Белогорский × к-3454	512	395 : 117	–	1,26

Примечание: * У : В – устойчивые : восприимчивые; $\chi^2 < 3,84$, $P > 0,05$
Note: * R : S – resistant : susceptible; $\chi^2 < 3.84$, $P > 0.05$

ря эффективности гена *Mla16* свидетельствует об изменении структуры популяции гриба с преобладанием вирулентной (вирулентных) рас возбудителя мучнистой росы.

Проведенный фитопатологический тест показал, что представленные в таблице 1 устойчивые образцы ячменя из Эфиопии могут быть защищены рецессивным аллелем гена *mlo* либо доминантным – *Mla*. Для проверки этой гипотезы были проведены скрещивания выделенных нами образцов с устойчивыми линиями ячменя, защищенных генами *mlo10* (к-30224), *mlo11* (к-30225), *Mla18 (*к-31007) и *Mla19* (к-30238) (табл. 4).

Линии ячменя к-3454, к-20064, к-21139, защищенные одним доминантным эффективным геном к мучнистой росе, скрестили с носителями аллелей *Mla*. Изучение аллельных отношений генов устойчивости у выделившихся образцов к-3454 и к-20064 с почти изогенными линиями в популяциях гибридов второго поколения (F_2) показало, что выделенные нами образцы ячменя защищены генами, отличающимися от *Mla18* и *Mla19.* Устойчивость линии к-21139 контролирует ген, неаллельный *Mla18.* Образец к-17554 имеет рецессивный ген, аллельный *mlo11.* Анализ расщепления гибридов F_2 на устойчивые и восприимчивые фенотипы в комбинации к-20077 × к-30225 (*mlo11*) указывает на взаимодействие двух рецессивных генов (7R : 9S; $\chi^2 = 0,03$). Образец к-20077 защищен одним рецессивным геном, отличающимся от *mlo11.*

Соотношение устойчивых и восприимчивых фенотипов в F_2 от скрещивания устойчивого образца к-19975 с носителем гена *mlo10* (к-30224) оказалось 370 (R) и 70 (S), что соответствует соотношению 13R : 3S ($\chi^2 = 2,33$) и указывает на взаимодействие доминантного и рецессивного генов устойчивости к мучнистой росе. Однако это противоречит ранее сделанному выводу о рецессивном характере наследования устойчивости образца к-19975. Возможно, это связано с эффектом смены доминирования у одной из родительских линий.

Многолетние (2015–2021 гг.) фитопатологические исследования показывали незначительные изменения вирулентности популяции *B. graminis* на северо-западе и юге России (Abdullaev et al., 2019; Abdullaev et al., 2021b). Степень поражения многих тестерных линий – носителей известных генов – различалась по годам, и только образцы с аллелями *mlo1*, *mlo3*, *mlo4*, *mlo5*, *mlo8*, *mlo9*, *mlo10*, *mlo11*, *Mla16*, *Mla18*, *Mla19*, *Mlai* (см. табл. 3) характеризовались высокой устойчивостью к патогену в течение всего периода наблюдений. Вместе с тем оценка устойчивости взрослых растений в 2022 г. на полях ППЛ ВИР показала сильное поражение почти изогенной ли-

Таблица 3. Линии ячменя с известными эффективными генами устойчивости к северо-западной популяции *Blumeria graminis*

Table 3. Barley lines with known effective genes of resistance to the northwestern *Blumeria graminis* population

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Происхождение / Origin	Поражение, балл* / Damage, score	
			Взрослые растения, поле / Adult plants, field	Проростки, лаборатория / Seedlings, laboratory
30218	Изогенная линия (ИЛ)** сорта Ingrid *mlo1*	Germany	7	1
30219	ИЛ сорта Ingrid *mlo3*	Germany	7	0
30220	ИЛ сорта Ingrid *mlo4*	Germany	7	0
30221	ИЛ сорта Ingrid *mlo5*	Germany	7	0
30222	ИЛ сорта Ingrid *mlo8*	Germany	7	0
30223	ИЛ сорта Ingrid *mlo9*	Germany	7	2
30224	ИЛ сорта Ingrid *mlo10*	Germany	7	1
30225	ИЛ сорта Ingrid *mlo11*	Germany	7	1
30238	Diamant × IB-86B *Mla19*	Germany	7	0
31005	Mla16	Germany	3	1
31007	Mla18	Israel	7	0
31011	Mlai	Israel	7	0
22089	Белогорский (контроль)	Россия	1	4

Примечание: * – ювенильная устойчивость образцов к *B. graminis* выражена в баллах по шкале E. B. Mains и S. M. Dietz (1930), реакция взрослых растений – по шкале И. Г. Лоскутова и др. (Loskutov et al., 2012); ** ИЛ – изогенная линия

Note: * – juvenile resistance of the accessions to *B. graminis* is expressed in points on the scale by E. B. Mains and S. M. Dietz (1930), while the reaction of adult plants on the scale by I. G. Loskutov et al. (2012); ** IL – isogenic line

Таблица 4. Распределение по устойчивости к *Blumeria graminis* гибридов второго поколения (F_2) от скрещивания устойчивых образцов и линий с известными эффективными генами

Table 4. *Blumeria graminis* resistance distribution in the second-generation (F_2) hybrids from crosses between resistant accessions and lines with known effective genes

Комбинация скрещивания / Cross combination	Изучено растений / Plants studied	Фактическое соотношение фенотипов (У : В)* / Actual ratio of phenotypes (R : S)*	χ^2 (7 : 9)	χ^2 (13 : 3)	χ^2 (15 : 1)
к-31007 (*Mla18*) × к-20064	381	358 : 23	–	–	0,04
к-31007 (*Mla18*) × к-3454	435	405 : 30	–	–	0,31
к-30238 (*Mla19*) × к-3454	321	300 : 21	–	–	0,05
к-30238 (*Mla19*) × к-20064	467	436 : 31	–	–	0,12
к-21139 × к-31007 (*Mla18)*	163	148 : 15	–	–	2,41
к-30224 (*mlo10*) × к-19975	440	370 : 70	–	2,33	–
к-30225 (*mlo11*) × к-20077	229	99 : 130	0,03	–	–
к-17554 × 30225 (*mlo11*)	203	203 : 0	–	–	–

Примечание:* У : В – устойчивые : восприимчивые

Note: * R : S – resistant : susceptible

нии к-31005 с эффективным аллелем *Mla16*. Значимое изменение структуры популяции гриба подчеркивает необходимость постоянного поиска нового селекционного материала для создания высокоустойчивых сортов ячменя.

Ранее с помощью молекулярных маркеров у образцов ячменя к-5448, к-17554, к-20041, к-20097, к-22752, к-22986, к-25009 был идентифицирован ген *mlo11* (Abdullaev et al., 2019), у генотипа к-20087 выявлен вариантный аллель *mlo11*(*cnv2*) (Abdullaev et al., 2021a). Настоящее исследование указывает на моногенный контроль наследования устойчивости к мучнистой росе у перечисленных выше форм. Исследовательский интерес представляют высокоустойчивые образцы к-19975, к-20077 с одним рецессивным аллелем, нетождественным *mlo11* и *mlo11*(*cnv2*), а также носители предположительно неизвестных доминантных генов – к-3454, к-20064, к-20864, к-21139.

Заключение

Изучение генетического разнообразия ячменей из Эфиопии продемонстрировало широкую изменчивость по устойчивости к возбудителю мучнистой росы – грибу *Blumeria graminis*. При изучении наследования ювенильной устойчивости к мучнистой росе у четырнадцати образцов определен моногенный контроль признака. Для селекции на иммунитет могут быть предложены десять образцов ячменя (к-5448, к-17554, к-19975, к-20041, к-20077, к-20087, к-20097, к-22752, к-22986, к-25009) с одним рецессивным эффективным аллелем устойчивости, а также четыре образца (к-3454, к-20064, к-20864, к-21139), имеющие по одному доминантному гену устойчивости.

References / Литература

Abdullaev R.A., Alpatieva N.V., Lebedeva T.V., Kovaleva O.N., Radchenko E.E., Anisimova I.N. Identification of barley accessions from the VIR collection carrying the *mlo11(cnv2)* powdery mildew resistance allele. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021a;4(3):37-44. [in Russian] (Абдуллаев Р.А., Алпатьева Н.В., Лебедева Т.В., Ковалева О.Н., Радченко Е.Е., Анисимова И.Н. Идентификация носителей аллеля *mlo11(cnv2)* устойчивости к мучнистой росе среди ячменей коллекции ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2021a;4(3):37-44). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-3-o3

Abdullaev R.A., Lebedeva T.V., Alpatieva N.V., Batasheva B.A., Anisimova I.N., Radchenko E.E. Powdery mildew resistance of barley accessions from Dagestan. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021b;25(5):528-533. DOI: 10.18699/VJ21.059

Abdullaev R.A., Lebedeva T.V., Alpatieva N.V., Yakovleva O.V., Kovaleva O.N., Radchenko E.E., Anisimova I.N., Batasheva B.A., Karabitsina Yu.I., Kuznetsova E.B. Genetic diversity of barley accessions from Ethiopia for powdery mildew resistance. *Russian Agricultural Sciences*. 2019;45(3):232-235. DOI: 10.3103/S1068367419030029

Acevedo-Garcia J., Kusch S., Panstruga R. Magic mystery tour: MLO proteins in plant immunity and beyond. *New Phytologist*. 2014;204(2):273-281. DOI: 10.1111/nph.12889

Dospekhov B.A. Methodology of field trial (Metodika polevogo opyta). Moscow: Agropromizdat; 1985. [in Russian] (Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат; 1985).

Dreiseitl A. Specific resistance of barley to powdery mildew, its use and beyond: a concise critical review. *Genes*. 2020;11(9):971. DOI: 10.3390/genes11090971

Federal State Statistics Service. Main results of the agricultural microcensus in 2021. Collection of Statistics (Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki. Osnovnye itogi selskokhozyaystvennoy mikroperepisi 2021 goda. Statisticheskiy sbornik). Moscow: Statistika Rossii; 2022. [in Russian] (Федеральная служба государственной статистики. Основные итоги сельскохозяйственной микропереписи 2021 года. Статистический сборник. Москва: Статистика России; 2022). URL: https://34.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Основные%20итоги%30сельскохозяйственной%микропереписи%202021%20года%20по%20%20Российской%20Федерации.pdf [дата обращения: 25.01.2023].

Gong X., Li C., Zhang G., Yan G., Lance R., Sun D. Novel genes from wild barley *Hordeum spontaneum* for barley improvement. In: G. Zhang, C. Li, X. Lui (eds). *Advance in Barley Sciences: Proceedings of 11th International Barley Genetics Symposium*. Dordrecht: Springer; 2013. p.69-86. DOI: 10.1007/978-94-007-4682-4_6

Kusch S., Panstruga R. *mlo*-based resistance: an apparently universal "weapon" to defeat powdery mildew disease. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2017;30(3):179-189. DOI: 10.1094/MPMI-12-16-0255-CR

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 kollektsii yachmenya i ovsa). St. Petersburg: VIR; 2012. [in Russian] (Лоскутов И.Г., Ковалева О.Н., Блинова Е.В. Методические указания по изучению и сохранению мировой коллекции ячменя и овса. Санкт-Петербург: ВИР; 2012).

Mains E.B., Dietz S.M. Physiologic forms of barley mildew *Erysiphe graminis hordei*. *Phytopathology*. 1930;20(3):229-239.

Merezhko A.F., Ezrokhin L.M., Yudin A.E. Guidelines for an effective pollination technique for cereal crops (Metodicheskiye ukazaniya po effektivnomu metodu opyleniya zernovykh kultur). Leningrad: VIR; 1973. [in Russian] (Мережко А.Ф., Эзрохин Л.М., Юдин А.Е. Методические указания по эффективному методу опыления зерновых культур. Ленинград: ВИР; 1973).

Seeholzer S., Tsuchimatsu T., Jordan T., Bieri S., Pajonk S., Yang W. et al. Diversity at the *Mla* powdery mildew resistance locus from cultivated barley reveals sites of positive selection. *Molecular Plant–Microbe Interactions*. 2010;23(4):497-509. DOI: 10.1094/MPMI-23-4-0497

Tratwal A., Bocianowski J. *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* virulence frequency and the powdery mildew incidence on spring barley in the Wielkopolska province. *Journal of Plant Protection Research*. 2014;54(1):28-35. DOI: 10.2478/jppr-2014-0005

Wang Y., Zhang G., Wang F., Lang X., Zhao X., Zhu J. et al. Virulence variability and genetic diversity in *Blumeria graminis* f. sp. *hordei* in Southeastern and Southwestern China. *Plant Disease*. 2023;107(3):809-819. DOI: 10.1094/PDIS-04-22-0944-RE

Информация об авторах

Ренат Абдуллаевич Абдуллаев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, abdullaev.1988@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-1021-7951

Ольга Владимировна Яковлева, 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, oly.yakovleva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6537-0868

Татьяна Вениаминовна Лебедева, 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, riginbv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2344-9233

Information about the authors

Renat A. Abdullaev, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, abdullaev.1988@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-1021-7951

Olga V. Yakovleva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, oly.yakovleva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-6537-0868

Tatiana V. Lebedeva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, riginbv@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2344-9233

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 12.04.2023; одобрена после рецензирования 14.06.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 12.04.2023; approved after reviewing on 14.06.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 634.8:575.18:575.113.2
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-124-132

CC BY

Аллельное разнообразие SSR-локуса VVIB23, сцепленного с полом цветка, в генотипах дикорастущего винограда Краснодарского края

Е. Т. Ильницкая[1], М. В. Макаркина[1], Е. А. Кожевников[1], И. В. Горбунов[2]

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

[2] Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия, Анапа, Россия

Автор, ответственный за переписку: Елена Тарасовна Ильницкая, ilnitskaya79@mail.ru

Актуальность. Изучение дикорастущего винограда представляет интерес с точки зрения расширения знаний о генетическом разнообразии генофонда культуры, поиска новых источников устойчивости. Одно из основных отличий диких форм от культивируемых заключается в типе репродуктивной системы: дикий виноград представлен однополыми формами и опыляется перекрестно, в то время как культурные лозы являются, за редким исключением, гермафродитами и способны к самоопылению. В настоящее время определен ДНК-маркер, позволяющий определять пол цветка винограда.

Материалы и методы. Тридцать шесть генотипов дикорастущих лоз винограда, отобранных в 2019–2021 гг. на территории Заповедника «Утриш» в окрестностях города Геленджика и в государственном природном заказнике «Красный лес» (правый берег реки Кубань), изучили с помощью ДНК-маркера VVIB23 к гену *Sex*, определяющему пол цветка. Исследование выполнено методом ПЦР с оценкой результатов на генетическом анализаторе «Нанофор 05».

Результаты. Установлено, что исследуемые образцы винограда вариабельны по SSR-локусу VVIB23 – обнаружено 7 типов аллелей. В 14 генотипах выявлено наличие аллелей, соответствующих мужскому типу цветка, в 21 – женскому. ПЦР-фрагмент, размер которого по литературным данным коррелирует с гермафродитизмом, не был обнаружен, что характерно для диких генотипов. Методом ДНК-маркерного анализа не удалось определить пол цветка одного образца.

Заключение. По данным ДНК-маркерного анализа определено, что изучаемые дикорастущие образцы винограда являются двудомными формами.

Ключевые слова: дикий виноград, мужской тип цветка, женский тип цветка, ген *Sex*, ДНК-маркер VVIB23, полиморфизм

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Краснодарского края (грант № 19-416-230025 р_а).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Ильницкая Е.Т., Макаркина М.В., Кожевников Е.А., Горбунов И.В. Аллельное разнообразие SSR-локуса VVIB23, сцепленного с полом цветка, в генотипах дикорастущего винограда Краснодарского края. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):124-132. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-124-132

© Ильницкая Е.Т., Макаркина М.В., Кожевников Е.А., Горбунов И.В., 2023

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-124-132

Allelic diversity of the SSR locus VVIB23 linked to the flower sex in wild-growing grapevine genotypes of Krasnodar Territory

Elena T. Ilnitskaya[1], Marina V. Makarkina[1], Evgeny A. Kozhevnikov[1], Ivan V. Gorbunov[2]

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

[2] *North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Anapa Zonal Experiment Station of Viticulture and Wine-making, Anapa, Russia*

Corresponding author: Elena T. Ilnitskaya, ilnitskaya79@mail.ru

Background. Studying wild-growing grapevines is of interest because it expands the knowledge on the genetic diversity within the gene pool and helps to search for new resistance sources. One of the main differences between wild vines and cultivars is the type of their reproductive system: wild grapes are represented by cross-pollinated dioecious vines, while cultivated ones are, with rare exceptions, hermaphrodites capable of self-pollination. A DNA marker applicable to determine the grape flower sex has been identified.
Materials and methods. The VVIB23 DNA marker to the *Sex* gene determining the flower sex was used to study 36 genotypes of wild-growing grapes selected in 2019–2021 within the Utrish Nature Reserve near Gelendzhik and the Krasny Les State Nature Reserve on the right bank of the Kuban River. PCR technique was applied, and the results were evaluated on a Nanofor 05 genetic analyzer.
Results. The studied grapevine accessions were found to be variable for the VVIB23 SSR locus: 7 types of alleles were identified. Alleles corresponding to the male flower type were present in 14 genotypes, and those corresponding to the female type in 21. A PCR fragment whose size, according to the published data, correlated with hermaphroditism was not found, which is typical for wild genotypes. The DNA marker analysis failed to determine the flower sex of one accession.
Conclusion. The results of the DNA marker analysis showed that the studied wild-growing grapevine genotypes were dioecious forms.

Keywords: wild grapes, male flower type, female flower type, the *Sex* gene, DNA marker VVIB23, polymorphism

Acknowledgements: this work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Krasnodar Territory Administration (Grant No. 19-416-230025 p_a).
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Ilnitskaya E.T., Makarkina M.V., Kozhevnikov E.A., Gorbunov I.V. Allelic diversity of the SSR locus VVIB23 linked to the flower sex in wild-growing grapevine genotypes of Krasnodar Territory. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):124-132. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-124-132

Введение

Виноград является одной из лидирующих культур в мировом сельском хозяйстве. Среди всего биоразнообразия виноградной лозы наибольший интерес в экономическом и социально-историческом аспектах представляет вид *Vitis vinifera* L. Принято считать, что данный вид появился в Евразии примерно 65 млн лет назад (This et al., 2008). По современной номенклатуре *V. vinifera* подразделяют на два подвида: *V. vinifera* subsp. *sylvestris* (Gmel.) Hegi, объединяющий дикие лозы, и *V. vinifera* subsp. *sativa* (DC.) Hegi (= subsp. *vinifera*), включающий культивируемые сорта.

Популяции дикорастущих форм винограда представлены одичалыми культурными лозами и непосредственно дикими формами. Изучение дикого винограда интересно с точки зрения расширения знаний о генетическом разнообразии генофонда, а также может быть полезно для поиска источников ценных признаков (устойчивости к абиотическим и биотическим стрессовым факторам).

Исследование дикорастущих форм винограда в настоящее время проводится как по ампелографическим признакам, так и молекулярно-генетическими методами (Popescu et al., 2013; Biagini et al., 2014; Karataş et al., 2014; Doulati-Baneh et al., 2015; Benito et al., 2017; Zdunić et al., 2020; Küpe et al., 2021; Jahnke et al., 2021).

Одно из основных отличий диких форм от культивируемых заключается в типе репродуктивной системы: дикие формы винограда являются однополыми и опыляются перекрестно, в то время как одомашненные лозы являются, за редким исключением, гермафродитами и способны к самоопылению.

Согласно модели A. J. Antcliff (1980), считается, что пол цветка винограда определяется одним главным локусом с тремя возможными аллелями – H (Hermaphrodite, гермофродитный), F (Female, женский) и M (Male, мужской). Согласно его теории, мужская аллель доминирует над гермафродитной, которая, в свою очередь, доминирует над женской. Таким образом, цветки, несущие аллель M, демонстрируют мужской фенотип, и только растения, имеющие аллель F в гомозиготном состоянии, производят женские цветки.

Локус *Sex*, определяющий пол цветка виноградной лозы, был определен в нескольких исследованиях по генетическому картированию популяций различного генетического происхождения. Так, M. A. Dalbó et al. (2000) идентифицировали ген *Sex* на 2-й хромосоме при картировании популяции от скрещивания Horizon (Seyval × Schuyler) × Illinois 547-1 (*V. cinerea* B9 × *V. rupestris* B38). В этом исследовании микросателлитный локус VVS3 был определен как наиболее сцепленный с локусом пола цветка. Позднее, при картировании популяций различного генетического происхождения, S. Riaz et al. (2006) и J. Battilana et al. (2013) показали, что маркер пола цветка VVIB23 имеет наибольшую сцепленность с локусом *Sex*. Кроме того, в ходе изучения полиморфизма маркера VVIB23 J. Battilana et al. (2013) установили, что размеры фрагментов 284, 288 и 304 пн статистически значимо связаны с половыми аллелями H, F и M соответственно. В связи с этим маркер VVIB23 был предложен для ДНК-маркерного отбора.

Краснодарский край в настоящее время занимает лидирующую позицию в виноградо-винодельческой отрасли Российской Федерации. Возделывание винограда на территории края велось и в давние исторические времена (Fisenko et al., 1979). Однако научной информации об изучении дикорастущего винограда в регионе крайне мало. Нами проводятся исследования в данном направлении.

В процессе экспедиционных исследований территории Краснодарского края вдоль Черноморского побережья (Большой Утриш, окрестности Геленджика) и реки Кубань (Красный лес) были обнаружены и описаны 36 экземпляров дикорастущего винограда (Gorbunov et al., 2020; Gorbunov et al., 2021; Gorbunov et al., 2022; Ilnitskaya et al., 2022). Для части образцов удалось морфологически определить тип цветка, для других образцов такой возможности не было.

Цель данной работы – с помощью ДНК-маркера VVIB23 определить пол цветка у найденных дикорастущих образцов винограда, сопоставить данные имеющейся морфологической и молекулярно-генетической оценки и изучить полиморфизм данного локуса в генотипах исследуемого дикорастущего винограда.

Материалы и методы

Аллельное состояние гена *Sex*, обуславливающего пол цветка, изучалось на 36 генотипах дикорастущих форм винограда, отобранных на территории Краснодарского края в 2019–2021 гг. вдоль побережья Черного моря – Большой Утриш (Водопадная щель (В1-В10), Лобанова щель (Л1-Л6), окрестности Геленджика (Г1-Г7) и реки Кубань (Красный лес) (К1-К5).

В качестве контроля для аллели гермафродитизма использовали ДНК сорта ‘Кишмиш Ваткана’ (размеры аллелей данного сорта по анализируемому локусу известны) (Riaz et al., 2013), для контроля женского типа цветка – ДНК сорта ‘Талисман’ (растения данного сорта имеют женский тип цветка) (Krasokhina, Kostrikin, 2006).

Экстракцию ДНК производили при помощи метода с использованием CTAB (цетилтриметиламмония бромид) из молодых листьев и верхушек виноградного растения (Rogers, Bendich, 1985).

Аллели гена *Sex* определяли при помощи наиболее информативного тесно сцепленного SSR-маркера VVIB23 методом полимеразной цепной реакции (ПЦР), реализованной на амплификаторе MasterCycler nexus GX2 (Eppendorf, Германия), по следующему протоколу: предварительная денатурация при 95°C – 3 мин, затем 34 цикла, состоящих из трех ступеней: денатурация при 95°C – 30 с, отжиг праймеров при 55°C – 30 с, элонгация при 72°C – 45 с; финальная элонгация при 72°C – 4 мин.

Смесь ПЦР объемом 20 мкл включала следующие компоненты: 50–100 нг матрицы ДНК, 1,75 ед. активности Taq-полимеразы («СибЭнзайм», Россия), 1х-буфер для Taq-полимеразы с сульфатом аммония и магнием, dNTP по 0,2 мМ («СибЭнзайм», Россия) и 4 пмоль каждого праймера («Синтол», Россия).

Продукты амплификации разделяли методом капиллярного гель-электрофореза на приборе «Нанофор 05» (Институт аналитического приборостроения РАН, Россия). Полученные первичные данные обрабатывали при помощи ПО GenMarker v 3.1.

Статистическую обработку идентифицированных аллелей проводили в программе GenAlEx 6.5.

Молекулярно-генетические анализы выполнены с использованием оборудования ЦКП Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия по направлению «Геномные и постгеномные технологии».

Результаты и обсуждение

Проанализировано ДНК 36 образцов дикорастущего винограда с помощью микросателлитного маркера VVIB23 к гену пола цветка *Sex.* Согласно J. Battilana et al. (2013), размеры фрагментов 284, 288 и 304 пн связаны с половыми аллелями типа цветка H, F и M соответственно. Однако стоит отметить, что размер аллели, коррелирующий с наличием гермафродитизма у винограда, в литературных источниках разнится. Так, S. Riaz et al. (2013) указывают, что фрагмент 282 пары нуклеотидов (пн) отвечает за наличие аллели H. Вероятно, что исследования S. Riaz et al. (2013) и J. Battilana et al. (2013) проводили параллельно и представленные различия являются математической погрешностью, связанной с различными условиями постановки экспериментов (оборудование, реактивы и т. д.). К сожалению, в данных работах не представлены общие аллельные профили контрольных сортов, на которые можно было бы ориентироваться. Однако в статье S. Riaz et al. (2013) есть ДНК-профиль сорта 'Кишмиш Ваткана', аллельный состав которого мы взяли за контроль в нашей работе. Также в работу была включена ДНК сорта 'Талисман', у которого женский тип цветка (Krasokhina, Kostrikin, 2006).

Для удобства определения аллелей пола цветка полученные аллельные профили по локусу VVIB23 мы представили в двух интерпретациях – согласно данным S. Riaz et al. (2013) и J. Battilana et al. (2013) (табл. 1).

В результате генотипирования 36 образцов дикорастущего винограда с помощью маркера VVIB23 было определено наличие аллели M (303 (304) пн) в 14 генотипах. В одном образце (Л1) ни одну известную аллель, коррелирующую с полом цветка, не удалось идентифицировать (см. табл. 1). Можно отметить, что аллель 308 пн, которая определена в Л1, ранее обнаруживалась исключительно в дикорастущих образцах с мужским типом цветка из Азербайджана и Армении, согласно данным S. Riaz et al. (2018), однако данная аллель, согласно литературным данным, не определена как аллель, размер которой коррелирует с полом цветка.

В изучаемой выборке более чем у трети образцов (Л2, Л3, В1-В5, В8, А2, Ш5, Г6, Г7) есть как аллель F, так и аллель M (на рисунке 1 представлен аллельный профиль образца В2). В этих случаях мы определили пол цветка как мужской, основываясь на теории A. J. Antcliff (1980), описанной выше.

В одном образце из Атмачевой щели (А1) была определена аллель 288 (290), на 2 нуклеотида отличающаяся

Таблица 1. Идентифицированные аллели микросателлитного локуса VVIB23, сцепленного с геном пола цветка *Sex*

Table 1. Identified alleles of the microsatellite locus VVIB23 linked to the flower *Sex* gene

Образец / Accession	Аллель 1 / Allele 1	Аллель 2 / Allele 2	Пол цветка по данным ДНК-анализа / Flower sex according to the DNA analysis	Пол цветка по фенотипической оценке / Flower sex according to phenotypic evaluation
	Riaz (Battilana)	Riaz (Battilana)		
Кишмиш Ваткана (контроль) / Kishmish Vatkana (control)	**282** (**284**)	299 (300)	H	♂♀
Талисман (контроль) / Talisman (control)	288 (**290**)	307 (309)	F	♀
Л1 / L1	308 (310)	308 (310)	–	–
Л2 / L2	286 (288)	303 (**304**)	M	–
Л3 / L3	286 (288)	303 (**304**)	M	–
Л4 / L4	286 (**288**)	286 (**288**)	F	–
Л5 / L5	286 (**288**)	286 (**288**)	F	–
Л6 / L6	286 (**288**)	286 (**288**)	F	–
В1 / V1	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
В2 / V2	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
В3 / V3	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
В4 / V4	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
В5 / V5	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
В6 / V6	286 (**288**)	294 (296)	F	–

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Образец / Accession	Аллель 1 / Allele 1	Аллель 2 / Allele 2	Пол цветка по данным ДНК-анализа / Flower sex according to the DNA analysis	Пол цветка по фенотипической оценке / Flower sex according to phenotypic evaluation
	Riaz (Battilana)	Riaz (Battilana)		
В7 / V7	286 (**288**)	294 (296)	F	♀
В8 / V8	286 (288)	303 (**304**)	M	–
В9 / V9	286 (**288**)	286 (**288**)	F	♀
В10 / V10	286 (**288**)	286 (**288**)	F	♀
А1	288 (**290**)	294 (296)	F	–
А2	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
А3	286 (**288**)	308 (310)	F	♂
Ш1 / Sh1	286 (**288**)	308 (310)	F	–
Ш2 / Sh2	286 (**288**)	308 (310)	F	–
Ш3 / Sh3	286 (**288**)	298 (300)	F	♀
Ш4 / Sh4	286 (**288**)	298 (300)	F	♀
Ш5 / Sh5	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
Г1 / G1	286 (**288**)	286 (**288**)	F	–
Г2 / G2	286 (**288**)	286 (**288**)	F	♀
Г3 / G3	294 (296)	303 (**304**)	M	♂
Г4 / G4	286 (**288**)	286 (**288**)	F	♀
Г5 / G5	286 (**288**)	286 (**288**)	F	♀
Г6 / G6	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
Г7 / G7	286 (288)	303 (**304**)	M	♂
К1	286 (**288**)	286 (**288**)	F	♀
К2	286 (**288**)	308 (310)	F	♀
К3	286 (**288**)	286 (**288**)	F	♀
К4	286 (**288**)	286 (**288**)	F	–
К5	292 (294)	303 (**304**)	M	♂

Примечание: полужирным выделены аллели, коррелирующие с формированием определенного пола цветка; F, ♀ – женский тип цветка; M, ♂ – мужской тип цветка; H, ♂♀ – гермафродитный тип цветка

Note: alleles correlating with the formation of a certain flower sex are boldfaced; F, ♀ – female flower type; M, ♂ – male flower type; H, ♂♀ – hermaphrodite flower type

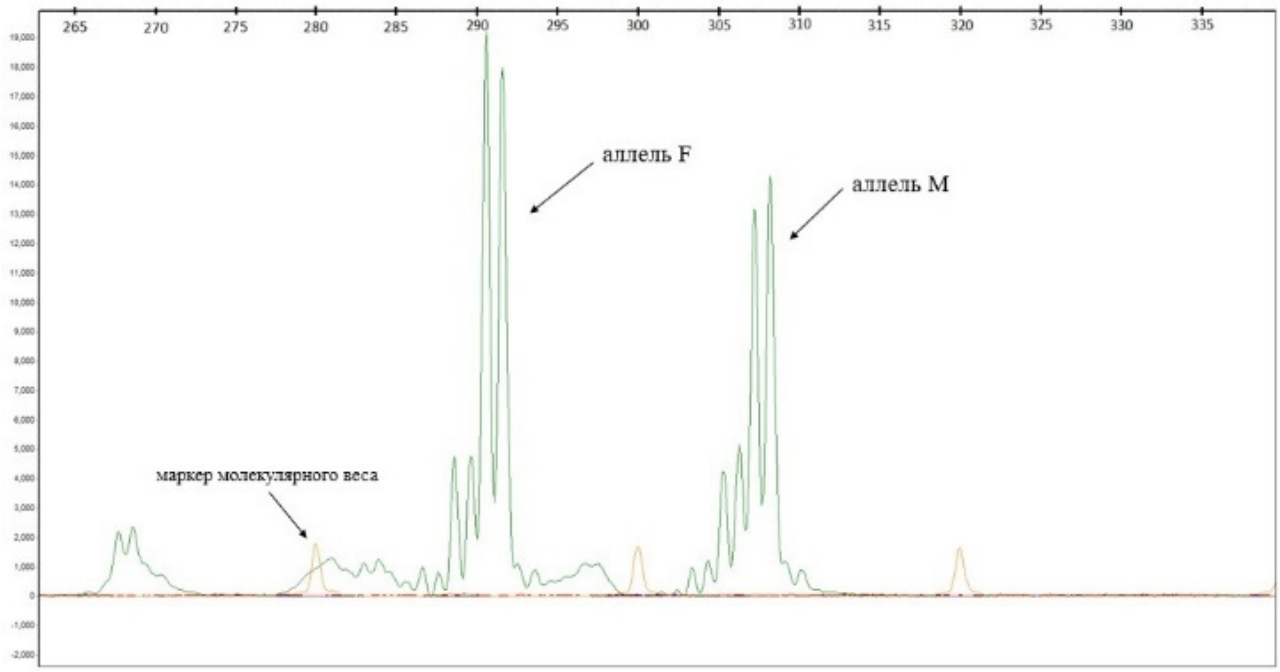
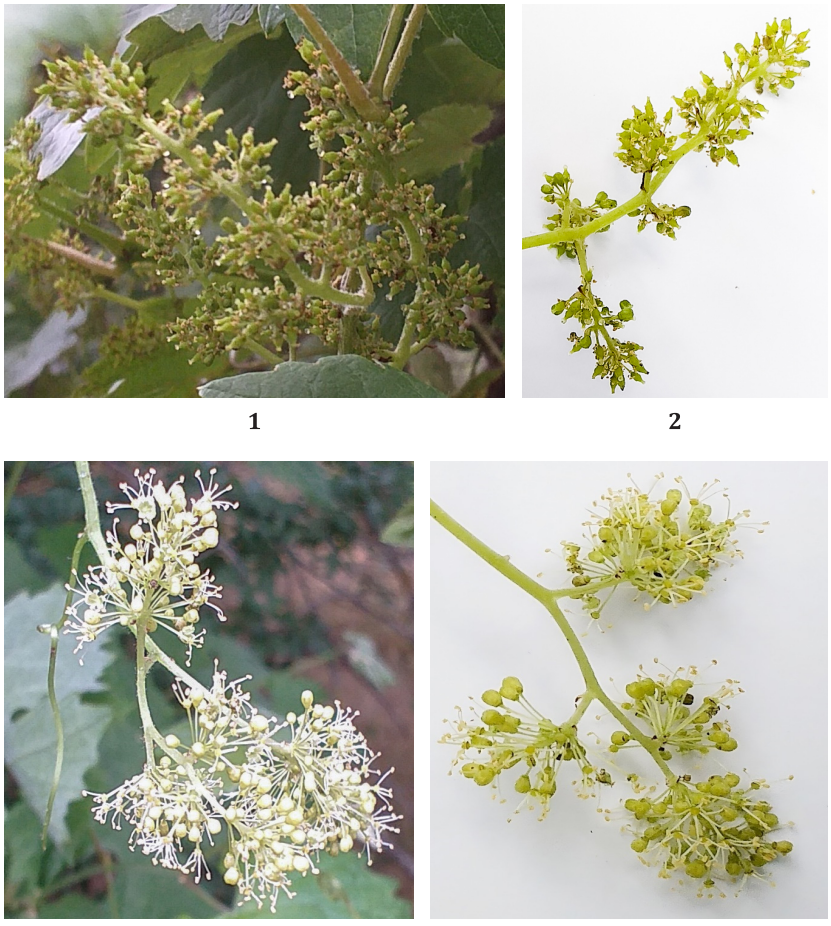


Рис. 1. **Визуализация идентифицированных аллелей в образце B2 из Водопадной щели (мужской тип цветка)**
Fig. 1. **Visualization of the identified alleles in accession B2 from Vodopadnaya Shchel (male flower type)**



1 **2**

3 **4**

Рис. 2. **Тип цветка у изучаемых образцов: 1, 2 – женский тип цветка у образца Ш3; 3, 4 – мужской тип цветка у образца Ш5 (Широкая щель, заповедник «Утриш»)**
Fig. 2. **Flower types in the studied accessions: 1, 2 – female flower type in accession Sh3; 3, 4 – male flower type in accession Sh5 (Shirokaya Shchel, Utrish Nature Reserve)**

от размера аллели, коррелирующей с женским типом цветка у диких форм. Однако данный образец мы отнесли к женскому типу цветка в соответствии с контрольным образцом ('Талисман'), в котором также была определена аллель 288 (290), – данный сорт имеет цветки женского типа. Разницу в 2 нуклеотида можно связать с полиморфизмом локуса в культурных и диких формах. Этот факт также отмечен в исследованиях J. Battilana et al. (2013): в образцах сортов с женским типом цветка были определены генотипы, которые подтверждают связь между фрагментом 290 пн в локусе VVIB23 и половой аллелью F в культурных сортах: 'Dattier Noir' (290–290 пн), 'Picolit' (288–290 пн) и 'Moscato Rosa' (290–302 пн) (Battilana et al., 2013). Таким образом, аллель размером 288 (290) пн также коррелирует с аллельным состоянием гена *Sex*, определяющим формирование женского пола цветка. Учитывая вышеизложенное, аллельный профиль женского типа цветка определен в 21 генотипе.

Аллели размером 282 (284) пн, коррелирующие с наличием гермафродитизма, в исследуемых генотипах не выявлены (см. табл. 1). У ряда анализируемых образцов пол цветка удалось определить фенотипически (Gorbunov et al., 2022; Ilnitskaya et al., 2022) (см. табл. 1, рис. 2).

Полученные данные ДНК-анализа соответствуют морфологическим наблюдениям, за исключением образца А3 (см. табл. 1). J. Battilana et al. (2013) отмечают, что эффективность маркера составляет около 95%. В наших исследованиях сопоставление имеющихся фенотипических и генетических данных подтверждает эффективность маркерной системы.

Изучаемая выборка генотипов в целом характеризуется относительно высоким полиморфизмом по SSR-локусу VVIB23 – идентифицировано 7 типов аллелей (табл. 2).

Отмечено, что генотипы из разных мест произрастания отличаются по вариабельности локуса. Так у 6 из 10 образцов из Водопадной щели ДНК-аллельные профили локуса VVIB23 идентичные (В1–В5, В8), а у образцов из Атмачевой щели (А1–А3) все три профиля различаются, однако данное наблюдение может быть связано с различным количеством образцов в выборках из разных мест (см. табл. 1).

В превалирующем большинстве генотипов определено гетерозиготное состояние по исследуемым локусам, что отразилось на показателях ожидаемой (He) и фактической (Ho) гетерозиготности: значения фактической превышают значения ожидаемой (см. табл. 2).

Наиболее часто встречаемой аллелью в локусе VVIB23 является 286 (288) пн (см. рис. 2). К редким (встречаются единично) можно отнести аллели 288 (290) и 292 (294) пн (табл. 3).

Полученные данные соответствуют имеющимся в литературе. Например, в работе S. Riaz et al. (2018) также наиболее встречаемой аллелью в выборке из 403 дикорастущих образцов винограда бассейна Средиземного моря и Центральной Азии была аллель 286, редкой – аллель 293 пн (значение на один нуклеотид больше, чем в нашей выборке, однако данное отличие можно считать погрешностью).

Заключение

Проведен ДНК-анализ 36 генотипов дикорастущих образцов винограда, обнаруженных на территории Краснодарского края, при помощи SSR-маркера VVIB23, сцепленного с геном пола цветка *Sex*. Изучаемые дикорастущие лозы винограда вариабельны по SSR-локусу VVIB23 – обнаружено 7 типов аллелей. Было определено наличие аллелей, соответствующих мужскому типу цветка, в 14 генотипах, женскому – в 21. У одного образца пол цветка определить не удалось. Данные молекулярно-генетического анализа соответствуют морфологическим наблюдениям о поле цветка изучаемых форм, за исключением одного образца. ПЦР-фрагмент размером 282 (284) пн, коррелирующий с наличием аллели гермафродитизма, не был обнаружен, что является характерным для диких генотипов винограда.

Таблица 2. Характеристика микросателлитного локуса VVIB23 в исследуемых генотипах дикорастущего винограда

Table 2. Characterization of the microsatellite locus VVIB23 in the studied wild grapevine genotypes

N	Na	Ne	Ho	He
36	7	2,367	0,639	0,578

Примечание: N – количество образцов; Na – количество выявленных различных аллелей; Ne – эффективное число аллелей; Ho – фактическая гетерозиготность; He – ожидаемая гетерозиготность

Note: N – number of accessions; Na – number of different alleles identified; Ne – number of effective alleles; Ho – observed heterozygosity; He – expected heterozygosity

Таблица 3. Частота встречаемости выявленных аллелей микросателлитного локуса VVIB23 в исследуемой выборке

Table 3. Occurrence frequencies for the identified alleles of the microsatellite locus VVIB23 in the studied set of accessions

Аллель / Allele	286 (288)	288 (290)	292 (294)	294 (296)	298 (300)	303 (304)	308 (310)
Частота встречаемости / Allele frequencies	0,611	0,014	0,014	0,056	0,028	0,194	0,083

References / Литература

Antcliff A.J. Inheritance of sex in *Vitis*. *Annales del l'Amelioration des Plantes*. 1980;30:113-122.

Battilana J., Lorenzi S., Moreira F.M., Moreno-Sanz P., Failla O., Emanuelli F. et al. Linkage mapping and molecular diversity at the flower sex locus in wild and cultivated grapevine reveal a prominent SSR haplotype in hermaphrodite plants. *Molecular Biotechnology*. 2013;54(3):1031-1037. DOI: 10.1007/s12033-013-9657-5

Benito A., Muñoz-Organero G., de Andrés M.T., Ocete R., García-Muñoz S., López M.A. et al. *Ex situ* ampelographical characterisation of wild *Vitis vinifera* from fifty-one Spanish populations. *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 2017;23(1):143-152. DOI: 10.1111/ajgw.12250

Biagini B., De Lorenzis G., Imazio S., Failla O., Scienza A. Italian wild grapevine (*Vitis vinifera* L. subsp. *sylvestris*) population: insights into eco-geographical aspects and genetic structure. *Tree Genetics and Genomes*. 2014;10(5):1369-1385. DOI: 10.1007/s11295-014-0767-4

Dalbó M.A., Ye G.N., Weeden N.F., Steinkellner H., Sefc K.M., Reisch B.I. A gene controlling sex in grapevines placed on a molecular marker-based genetic map. *Genome*. 2000;43(2):333-340. DOI: 10.1139/g99-136

Doulati-Baneh H., Mohammadi S.A., Labra M., De Mattia F., Bruni I., Mezzasalma V. et al. Genetic characterization of some wild grape populations (*Vitis vinifera* subsp. *sylvestris*) of Zagros mountains (Iran) to indentify a conservation strategy. *Plant Genetic Resources*. 2015;13(1):27-35. DOI: 10.1017/S1479262114000598

Fisenko Yu.F., Fisenko V.N., Kovalenko F.A. Winemaking in Kuban (Vinodeliye Kubani). Krasnodar: Krasnodar Book Publishers; 1979. [in Russian] (Фисенко Ю.Ф., Фисенко В.Н., Коваленко Ф.А. Виноделие Кубани. Краснодар: Краснодарское книжное издательство; 1979).

Gorbunov I.V., Ilnitskaya E.T., Lukyanov A.A., Makarkina M.V., Mikhailovsky S.S., Pankin M.I. The Kuban grapes wild forms growing on the Red Forest nature reserve territory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;677:042072. DOI: 10.1088/1755-1315/677/4/042072

Gorbunov I.V., Ilnitskaya E.T., Lukyanov A.A., Mikhailovsky S.S., Makarkina M.V., Pankin M.I. et al. Variety of wild-growing grapes of the Utrish reserve. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;548:042050. DOI: 10.1088/1755-1315/548/4/042050

Gorbunov I.V., Lukyanova A.A., Lifanov I.V., Vinogradova S.V. Phenotypic and genotypic features of wild forms of Kuban grapes. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2022;3(67):5-10. [in Russian] (Горбунов И.В., Лукьянова А.А., Лифанов И.В., Виноградова С.В. Фенотипические и генотипические особенности дикорастущих форм винограда Кубани. *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2022;3(67):5-10). DOI: 10.12737/2073-0462-2022-5-10

Ilnitskaya E.T., Makarkina M.V., Gorbunov I.V., Kotlyar V.K., Kozhevnikov E.A. Morphological and genetic characteristics of wild-growing vines on Tonkiy Cape territory of Gelendzhik City. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2022;75(3):85-96. [in Russian] (Ильницкая Е.Т., Макаркина М.В., Горбунов И.В., Котляр В.К., Кожевников Е.А. Морфологические и генетические характеристики дикорастущих форм винограда на территории Тонкого мыса города Геленджик. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2022;75(3):85-96). DOI: 10.30679/2219-5335-2022-3-75-85-96

Jahnke G., Nagy Z.A., Koltai G., Oláh R., Májer J. Morphological, phenological and molecular diversity of woodland grape (*Vitis sylvestris* Gmel.) genotypes from the Szigetköz, Hungary. *Mitteilungen Klosterneuburg*. 2021;71(1):90-98.

Karataş D.D., Karatas H., Garcia-Muñoz S. Morphological characterization of endangered wild grapevine *Vitis vinifera* ssp. *silvestris* in Eastern Turkey. *Journal of the American Pomological Society*. 2014;68(1):14-23.

Krasokhina S.I., Kostrikin I.A. New table grape variety Talisman (Novy stolovy sort vinograda Talisman). *Horticulture and Viticulture*. 2006;(1):23. [in Russian] (Красохина С.И., Кострикин И.А. Новый столовый сорт винограда Талисман. *Садоводство и виноградарство*. 2006;(1):23).

Küpe M., Ercisli S., Jovanović-Cvetković T., Eyduran S.P., Ayed R.B. Molecular characterization of wild grapes from northeastern part of Turkey. *Genetika*. 2021;53(1):93-102. DOI: 10.2298/GENSR2101093K

Popescu C.F., Dejeu L.C., Ocete R.R. Preliminary characterization of wild grapevine populations (*Vitis vinifera* ssp. *sylvestris*) grown along the Danube River. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2013;41(2):472-477. DOI: 10.15835/nbha4129317

Riaz S., Boursiquot J.M., Dangl G.S., Lacombe T., Laucou V., Tenscher A.C. et al. Identification of mildew resistance in wild and cultivated Central Asian grape germplasm. *BMC Plant Biology*. 2013;13:149. DOI: 10.1186/1471-2229-13-149

Riaz S., De Lorenzis G., Velasco D., Koehmstedt A., Maghradze D., Bobokashvili Z. et al. Genetic diversity analysis of cultivated and wild grapevine (*Vitis vinifera* L.) accessions around the Mediterranean basin and Central Asia. *BMC Plant Biology*. 2018;18(1):137. DOI: 10.1038/s41438-020-0335-z

Riaz S., Krivanek A.F., Xu K., Walker M.A. Refined mapping of the Pierce's disease resistance locus, *PdR1*, and *Sex* on an extended genetic map of *Vitis rupestris* × *V. arizonica*. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;113(7):1317-1329. DOI: 10.1007/s00122-006-0385-0

Rogers S.O., Bendich A.J. Extraction of DNA from milligram amounts of fresh, herbarium and mummified plant tissues. *Plant Molecular Biology*. 1985;5(2):69-76. DOI: 10.1007/BF00020088

This P., Lacombe T., Thomas M.R. Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *Trends in Genetics*. 2006;22(9):511-519. DOI: 10.1016/j.tig.2006.07.008

Zdunić G., Lukšić K., Nagy Z.A., Mucalo A., Hančević K., Radić T. et al. Genetic structure and relationships among wild and cultivated grapevines from Central Europe and part of the Western Balkan Peninsula. *Genes*. 2020;11(9):962. DOI: 10.3390/genes11090962

Информация об авторах

Елена Тарасовна Ильницкая, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ilnitskaya79@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2446-0971

Марина Викторовна Макаркина, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, konec_citatu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3397-0666

Евгений Анатольевич Кожевников, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, zhenya.kozhevnikov.2017@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-1305-3614

Иван Викторович Горбунов, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, Анапская зональная опытная станция виноградарства и виноделия – филиал СКФНЦСВВ, 353456 Россия, Анапа, Пионерский проспект, 36, wunsch27@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4702-9148

Information about the authors

Elena T. Ilnitskaya, Cand. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, ilnitskaya79@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2446-0971

Marina V. Makarkina, Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, konec_citatu@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3397-0666

Evgeny A. Kozhevnikov, Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, zhenya.kozhevnikov.2017@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-1305-3614

Ivan V. Gorbunov, Cand. Sci. (Biology), Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, Anapa Zonal Experiment Station of Viticulture and Wine-making, branch of the NCFSCHVW, 36 Pionersky Ave., Anapa 353456, Russia, wunsch27@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4702-9148

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 29.12.2022; одобрена после рецензирования 09.07.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 29.12.2022; approved after reviewing on 09.07.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 634.11:575.22
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-133-142

CC BY

Встречаемость локуса устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7* у образцов диких видов яблони (*Malus* Mill.)

А. С. Лыжин, Н. Н. Савельева

Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, Мичуринск, Россия,

Автор, ответственный за переписку: Александр Сергеевич Лыжин, Ranenburzhetc@yandex.ru

Актуальность. Бактериальный ожог (возбудитель *Erwinia amylovora* (Burill) Winslow et al.) – опасное заболевание плодовых культур. В Российской Федерации бактериальный ожог относится к числу карантинных заболеваний. Устойчивость яблони к бактериальному ожогу контролируется полигенно. Однако сведения о генотипах диких видов и разновидностей рода *Malus* Mill. по отдельным локусам устойчивости весьма ограничены. Цель исследования – изучение генетической коллекции диких видов и разновидностей яблони по локусу устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7* для выявления перспективных источников устойчивости к *E. amylovora*.
Материалы и методы. Объектами исследования являлись 23 диких и два культурных вида яблони (50 образцов) генетической коллекции ФНЦ им. И.В. Мичурина. Для выявления локуса устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7* использовались фланкирующие SCAR-маркеры AE10-375, GE-8019 и SSR-маркер CH-F7-Fb1.
Результаты и выводы. Маркер GE-8019 идентифицирован у 50,0% проанализированных образцов яблони, маркер AE10-375 – у 76,0%, маркер CH-F7-Fb1 – у 30,0%. Выявлен межвидовой и внутривидовой полиморфизм рода *Malus* по анализируемому локусу устойчивости, а также по отдельным ДНК-маркерам, сцепленным с *FBF7.* Фланкирующие локус *FBF7* маркеры GE-8019 и AE10-375 выявлены у 42,0% изучаемых генотипов. При этом три диагностических маркера (GE-8019, AE10-375, CH-F7-Fb1) идентифицированы у семи из исследованных образцов: *M. × robusta* var. *persicifolia* (Carr.) Rehd. (к-41279), *M. × cerasifera* var. *hiemalis* Spach. (к-2342) (серия *Baccatae*), *M. sylvestris* (L.) Mill. (к-73, к-123), *M. × spectabilis* var. *albi plena* (Ait.) Borkh. (к-2416) (серия *Malus*), *M. × sargentii* (Rehd.) Langenf. (к-2428) (серия *Toringonae*) и *M. coronaria* (L.) Mill. (к-2336) (серия *Coronariae*), которые являются перспективными генетическими источниками устойчивости к *E. amylovora*.

Ключевые слова: генетический полиморфизм, *Erwinia amylovora*, молекулярные маркеры, источники устойчивости

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания ФНЦ имени И.В. Мичурина по проекту FGSU-2022-0002 «Разработать модели идеального сорта по основным промышленным садовым культурам, усовершенствовать методы направленной и маркер-опосредованной селекции и на их основе создать новые генотипы с повышенной устойчивостью к комплексу биотических и абиотических стрессоров, с высокой продуктивностью и улучшенным качеством плодов, конкурентоспособных на российском и мировом рынках».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Лыжин А.С., Савельева Н.Н. Встречаемость локуса устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7* у образцов диких видов яблони (*Malus* Mill.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):133-142. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-133-142

© Лыжин А.С., Савельева Н.Н., 2023

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-133-142

Occurrence of the *FBF7* fire blight resistance locus in accessions of apple wild species (*Malus* Mill.)

Alexander S. Lyzhin, Natalia N. Saveleva

I.V. Michurin Federal Science Center, Michurinsk, Russia

Corresponding author: Alexander S. Lyzhin, Ranenburzhetc@yandex.ru

Background. Fire blight (*Erwinia amylovora* (Burill) Winslow et al.) is a dangerous disease of fruit crops. In the Russian Federation, fire blight is one of the quarantine diseases. Apple resistance to fire blight is controlled polygenically. However, the data on the genotypes of *Malus* Mill. wild species and varieties in the context of individual resistance loci are scarce. The purpose of the research was studying the genetic collection of apple wild species according to the *FBF7* fire blight resistance locus to identify promising sources of resistance to *E. amylovora*.
Materials and methods. The materials of this study included 23 wild and two cultivated apple-tree species (50 accessions) from the genetic collection of the I.V. Michurin FSC. The *FBF7* QTL for fire blight resistance was identified with the flanking SCAR-markers AE10-375 and GE-8019, and SSR-marker CH-F7-Fb1.
Results and conclusion. The GE-8019 marker was identified in 50.0% of the apple accessions, AE10-375 in 76.0% of the accessions, and CH-F7-Fb1 in 30.0%. Inter- and intraspecific polymorphism of the *Malus* genus was revealed for the analyzed resistance locus, as well as for individual DNA markers linked to the *FBF7* QTL. The GE-8019 and AE10-375 markers flanking the *FBF7* QTL were found in 42.0% of the studied genotypes. Meanwhile, three diagnostic markers (GE-8019, AE10-375, and CH-F7-Fb1) were identified only in 7 accessions: *M. × robusta* var. *persicifolia* (Carr.) Rehd. (к-41279), *M. × cerasifera* var. *hiemalis* Spach. (к-2342) (Ser. *Baccatae*), *M. sylvestris* (L.) Mill. (k-73 and k-123), *M. × spectabilis* var. *albi plena* (Ait.) Borkh. (к-2416) (Ser. *Malus*), *M. × sargentii* (Rehd.) Langenf. (k-2428) (Ser. *Toringonae*), and *M. coronaria* (L.) Mill. (к-2336) (Ser. *Coronariae*). These forms are promising genetic sources of resistance to *E. amylovora*.

Keywords: genetic diversity, *Erwinia amylovora*, molecular markers, sources of resistance

Acknowledgments: the research was performed within the framework of the state task delegated to the I.V. Michurin FSC, Project No. FGSU-2022-0002 "To develop models of an ideal cultivar for the main commercial horticultural crops, improve methods of targeted and marker-assisted selection, and produce on their basis new genotypes with increased resistance to a set of biotic and abiotic stressors, with high productivity and improved fruit quality, competitive in the Russian and world markets".
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Lyzhin A.S., Saveleva N.N. Occurrence of the *FBF7* fire blight resistance locus in accessions of apple wild species (*Malus* Mill.). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 2023;184(4):133-142. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-133-142

Введение

Бактериальный ожог (возбудитель – бактерия *Erwinia amylovora* (Burill) Winslow et al.) – опасное заболевание плодовых культур, широко распространенное во многих странах мира (США, Канада, Италия, Германия, Швейцария, Австралия, Япония и др.) (Le Roux et al., 2010; Schlathölter et al., 2018). В России первый официально подтвержденный случай заражения бактериальным ожогом зафиксирован в 2003 г. (Калининградская область). В настоящее время очаги бактериального ожога зарегистрированы в 13 субъектах Российской Федерации, в том числе в Тамбовской области (Drenova, 2019). *E. amylovora* поражает все органы растения, вызывая некроз и отмирание тканей. Патоген может поразить от 20 до 60% насаждений, из которых до 20% впоследствии погибает (Drenova, 2019; Kostick et al., 2019). Во многих странах мира, в том числе и в России, *E. amylovora* является карантинным патогеном. В перечне Европейской и Средиземноморской организации по карантину и защите растений (ЕОКЗР) возбудитель бактериального ожога плодовых культур внесен в список А2. В Российской Федерации *E. amylovora* включена в Перечень ограниченно распространенных, а также Единый перечень карантинных объектов Евразийского экономического союза (Yerokhova, Orlinski, 2017).

Генетическая детерминация устойчивости яблони к *E. amylovora* имеет полигенный характер. Локусы количественных признаков (QTL) выявлены в первую очередь у различных диких видов и разновидностей рода *Malus* Mill.: у *M. × robusta* 5 – на хромосоме 3 (LG 3), у декоративного сорта ‘Evereste’ (получен от дикого вида) и *M. × floribunda* 821 – на LG 12. Кроме того, источниками устойчивости к бактериальному ожогу являются отдельные образцы *M. baccata* (L.) Borkh., *M. × atrosanguinea* (Spach) C.K. Schneid., *M. fusca* (Raf.) C.K. Schneid., *M. × prunifolia* (Willd.) Borkh., *M. × robusta* var. *persicifolia* (Carr.) Rehd., *M. sieversii* (Ledeb.) M.J. Roem. У диких видов яблони вклад отдельных QTL в проявление устойчивости к *E. amylovora* может достигать 80% (Durel et al., 2009; Kost et al., 2015; Harshman et al., 2017). У сортов яблони домашней (*M. domestica* Borkh.) также идентифицированы отдельные QTL устойчивости к бактериальному ожогу: на LG 5 (‘Jonathan’), LG 10 (‘Starking’, ‘Red Delicious’ – почковая мутация), однако их вклад в проявление устойчивости меньше, чем у диких видов (Le Roux et al., 2010; Nybom et al., 2012). Одним из наиболее важных локусов устойчивости к бактериальному ожогу, выявленных у *M. domestica*, является QTL на LG7 (сорт ‘Fiesta’), который обеспечивает до 46,6% устойчивости к *E. amylovora* (Kellerhals et al., 2013; Papp et al., 2015). В результате проведенного филогенетического анализа был установлен предполагаемый источник локуса устойчивости на LG7 – сорт ‘Cox’s Orange Pippin’, который получили в результате свободного опыления сорта ‘Ribston Pippin’ около 1700 г. во Франции. Впоследствии для данного QTL (*FBF7*) были разработаны фланкирующие ДНК-маркеры. Валидацию маркеров провели на 81 генотипе яблони, в том числе 31 сорте (включая полученные с использованием ‘Cox’s Orange Pippin’) и 50 гибридных сеянцах комбинации Milwa × 1217 (Khan et al., 2007). В настоящее время ДНК-маркеры, сцепленные с локусом *FBF7*, широко применяются для анализа генетических коллекций сортов яблони домашней и идентификации устойчивых к *E. amylovora* генотипов. В частности, в Научно-исследовательском институте плодоводства и цветоводства в Скерневице (Польша) изучали коллекцию из 31 сорта яблони европейской селекции и выделили 12 форм, характеризующихся наличием сцепленных с QTL *FBF7*-маркеров (Keller-Przybyłkowicz et al., 2009). В совместном исследовании Шведского университета сельскохозяйственных наук и Польского научно-исследовательского института плодоводства и цветоводства было проанализировано 205 сортов и форм яблони, и у 45 генотипов был диагностирован QTL *FBF7* (Nybom et al., 2012). В Швейцарском институте растениеводства ведутся исследования по использованию ДНК-маркеров в селекции яблони на устойчивость к *E. amylovora* (Baumgartner et al., 2015). В России работы по идентификации устойчивых к бактериальному ожогу генотипов яблони с использованием диагностических ДНК-маркеров ведутся специалистами Федерального научного центра имени И.В. Мичурина (Lyzhin, Saveleva, 2021a) и Мичуринского государственного аграрного университета (Shamshin et al., 2020). Однако вопросы генетической детерминации устойчивости к бактериальному ожогу и встречаемости отдельных локусов у диких видов и разновидностей яблони в настоящее время изучены недостаточно и требуют дополнительных исследований. Возможность использования ДНК-маркеров от *M. domestica* для анализа других видов рода *Malus* обусловлена их генетической близостью: виды рода хорошо совместимы и легко скрещиваются между собой. Кроме того, культивируемые сорта яблони (*M. domestica*) получены от исходных диких видов, в первую очередь – *M. sieversii*. В формирование генома *M. domestica* также внесли вклад *M. sylvestris* (L.) Mill., *M. baccata*, *M. orientalis* (Uglitzk.) Juz., *M. mandshurica* (Maxim.) Kom., *M. × prunifolia* (Urbanovich et al., 2010; Cornille et al., 2012). Некоторые локусы агробиологических признаков (например, гены устойчивости к парше *Rvi6*, мучнистой росе *Pl-1*, *Pl-2* и др.), интрогрессированые в геном культурных форм от исходных диких видов (Ponomarenko V.V., Ponomarenko K.V., 2011), также встречаются у различных представителей рода *Malus*, а ДНК-маркеры, используемые для их идентификации, применимы для анализа как культурных, так и диких форм (Sharifnabi et al., 2020; Gautam, Modgil, 2022). Таким образом, локус *FBF7*, помимо некоторых форм яблони домашней, может также присутствовать и у других видов яблони.

Цель исследования – изучение генетической коллекции диких видов и разновидностей яблони (*Malus*) по локусу устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7* для выявления перспективных источников устойчивости к *E. amylovora*.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2020–2023 гг. Биологическими объектами исследования являлись 23 диких и два культурных вида (*M. domestica* и *M. × cerasifera*) рода *Malus* (50 образцов) генетической коллекции Федерального научного центра имени И.В. Мичурина (таблица). Образцы привлечены в Мичуринск из Майкопской опытной станции ВИР академиком РАН, доктором сельскохозяйственных наук Н. И. Савельевым. Анализируемые виды по классификации Лангельфельда (Langenfeld, 1991) относятся к пяти секциям:

в секции *Gymnomeles* Koehne изучено 16 образцов, из них 15 из серии *Baccatae* Rehd. и 1 из серии *Hupehenses* Langenf.;

в секции *Malus* Langenf. – 26, из них 1 из серии *Asiaticae* Langenf., 10 из серии *Sieversinae* Langenf., 6 из серии *Orientalis* Langenf. и 9 из серии *Malus*;

Таблица. Полиморфизм видов и разновидностей яблони по сцепленным с QTL *FBF7* устойчивости к бактериальному ожогу молекулярным маркерам

Table. Polymorphism of apple-tree species and varieties according to molecular markers linked to the *FBF7* QTL of fire blight resistance

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	*Malus* Mill. spp.	ДНК-маркер / DNA marker		
		GE-8019	AE10-375	CH-F7-Fb1
		397 пн / 397 bp	375 пн / 375 bp	210 пн / 210 bp
Секция *Gymnomeles* Koehne				
Серия *Baccatae* Rehd.				
к-14207	*M. baccata* (L.) Borkh.	1	1	0
к-2316	*M. baccata* (L.) Borkh.	1	1	0
к-2317	*M. baccata* (L.) Borkh.	0	1	0
к-2319	*M. baccata* (L.) Borkh.	1	1	0
к-2324	*M. baccata* (L.) Borkh.	1	1	0
к-2333	*M. baccata* var. *coerulescens* Borkh.	1	1	0
к-41277	*M. mandshurica* (Maxim.) Kom.	0	0	1
к-41275	*M. mandshurica* subsp. *sachalinensis* (Kom.) Lich.	0	1	0
к-890	*M. mandshurica* subsp. *sachalinensis* (Kom.) Lich.	0	0	0
к-43199	*M.* × *robusta* (Carr.) Rehd.	1	1	0
к-41279	*M.* × *robusta* var. *persicifolia* (Carr.) Rehd.	1	1	1
к-2314	*M.* × *cerasifera* var. *aurantiaca* Spach.	0	0	1
к-2342	*M.* × *cerasifera* var. *hiemalis* Spach.	1	1	1
к-2332	*M.* × *cerasifera* var. *odorata* Spach.	0	1	1
к-1457	*M. pallasiana* Juz.	0	0	0
Серия *Hupehenses* Langenf.				
к-14945	*M. hupehensis* (Pamp.) Rehd.	0	1	1
Секция *Malus* Langenf.				
Серия *Asiaticae* Langenf.				
к-2343	*M. asiatica* Nakai.	0	1	0
Серия *Sieversinae* Langenf.				
к-13280	*M. sieversii* (Ledeb.) M.J. Roem.	1	0	0
к-13975	*M. sieversii* (Ledeb.) M.J. Roem.	1	1	0
к-2385	*M. pumila* var. *gallica* Mill.	0	1	1
к-13279	*M. niedzwetzkyana* (Dieck.) Langenf.	0	0	0
к-29422	*M. niedzwetzkyana* (Dieck.) Langenf.	1	0	0
к-29429	*M. niedzwetzkyana* (Dieck.) Langenf.	1	0	0
к-2393	*M.* × *purpurea* var. *aldenhamensis* (Barbier.) Rehd.	0	1	0
к-14973	*M.* × *purpurea* var. *eleyi* (Barbier.) Rehd.	0	1	0
к-2396	*M.* × *purpurea* var. *pendula* (Barbier.) Rehd.	0	1	0
к-2392	*M.* × *purpurea* (Barbier) Rehd.	0	0	0

Таблица. Окончание
Table. The end

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	*Malus* Mill. spp.	ДНК-маркер / DNA marker		
		GE-8019	AE10-375	CH-F7-Fb1
		397 пн / 397 bp	375 пн / 375 bp	210 пн / 210 bp
Серия *Orientalis* Langenf.				
к-29460	*M. orientalis* (Uglitzk.) Juz.	0	1	0
к-29476	*M. orientalis* (Uglitzk.) Juz.	0	1	0
к-29484	*M. orientalis* (Uglitzk.) Juz.	1	1	0
к-41623	*M. orientalis* (Uglitzk.) Juz.	0	0	0
к-49478	*M. orientalis* (Uglitzk.) Juz.	0	1	1
к-13283	*M. orientalis* subsp. *turkmenorum* (Juz. et M. Pop.) Langenf.	1	1	0
Серия *Malus*				
к-73	*M. sylvestris* (L.) Mill.	1	1	1
к-123	*M. sylvestris* (L.) Mill.	1	1	1
к-29493	*M. sylvestris* (L.) Mill.	0	1	0
к-2454	*M.* × *prunifolia* (Willd.) Borkh.	1	1	0
к-14942	*M. caspiriensis* Langenf.	0	1	1
к-14943	*M. caspiriensis* Langenf.	0	1	0
к-2416	*M.* × *spectabilis* var. *albi plena* (Ait.) Borkh.	1	1	1
к-2495	*M.* × *spectabilis* var. *rubra plena* (Ait.) Borkh.	1	0	0
к-711	*M. domestica* Borkh. Антоновка обыкновенная	0	0	0
Секция *Sorbomalus* Zabel.				
Серия *Toringonae* (Rehd.) Langenf.				
к-2312	*M.* × *arnoldiana* Rehd.	0	1	1
к-2346	*M.* × *floribunda* Siebold.	0	1	0
к-2428	*M.* × *sargentii* (Rehd.) Langenf.	1	1	1
к-2322	*M. sieboldii* (Regel) Rehd.	1	1	0
к-2407	*M.* × *scheidekerii* Spaeth.	1	1	0
Серия *Kansuenses* Rehd.				
к-2424	*M. transitoria* (Batal.) C.K. Schneid.	1	1	0
Секция *Chloromeles* (Decne.) Rehd.				
Серия *Coronariae* (Rehd.) Langenf.				
к-2336	*M. coronaria* (L.) Mill.	1	1	1
Секция *Eriolobus* (C.K. Schneid.) Langenf.				
к-2345	*M. florentina* (Zuce.) C.K. Schneid.	1	1	0

в секции *Sorbomalus* Zabel. – 6, из них 5 из серии *Toringonae* (Rehd.) Langenf. и 1 из серии *Kansuenses* Rehd.;

в секциях *Chloromeles* (Decne.) Rehd. (серия *Coronariae* (Rehd.) Langenf.) и *Eriolobus* (C.K. Schneid) Langenf. – по одному.

Для выявления локуса *FBF7* использовались SCAR-маркеры AE10-375, GE-8019 и SSR-маркер CH-F7-Fb1 (Khan et al., 2007).

SCAR-маркеры AE10-375 и GE-8019 были разработаны на основе фланкирующих QTL *FBF7* RAPD-маркеров AE10-400 и GE80-19-0550: дистанция от маркера AE10-375 до пика QTL составляет 4 сМ, от маркера GE-8019 – 6 сМ. Расстояние между фланкирующими маркерами составляет 10 сМ. Маркер CH-F7-Fb1 картирован с той же стороны от QTL, что и AE10-375, и используется для повышения надежности молекулярно-генетического анализа.

Маркер AE10-375 имеет целевой ампликон размером 375 пн, маркер GE-8019 – ампликон размером 397 пн. Данные продукты амплифицируются только при наличии в генотипе локуса *FBF7*. Микросателлитный маркер CH-F7-Fb1 имеет ампликоны 174 и 210 пн. С QTL *FBF7* сцеплен продукт размером 210 пн (Khan et al., 2007). Для надежной идентификации локуса *FBF7* необходимо проведение анализа по трем маркерам и у генотипов, характеризующихся наличием QTL *FBF7*; на электрофореграмме должны четко присутствовать целевые ампликоны всех трех маркеров (Khan et al., 2007). Для сокращения времени анализа допустимо проведение анализа по маркерам AE10-375 и GE-8019, которые фланкируют QTL *FBF7* (Sehic et al., 2009; Nybom et al., 2012). Однако в дальнейшем выделенные формы должны быть дополнительно проанализированы по маркеру CH-F7-Fb1.

Используемые для идентификации QTL *FBF7* праймеры синтезированы НПК «Синтол» (Россия) и имеют следующую нуклеотидную последовательность:

AE10-375-for: 5'-CTGAAGCGCACGTTCTCC-3'
AE10-375-rev: 5'-CTGAAGCGCATCATTTCTGATAG-3'
GE-8019-for: 5'-TTGAGACCGATTTTCGTGTG-3'
GE-8019-rev: 5'-TCTCTCCCAGAGCTTCATTGT-3'
CH-F7-Fb1-for: 5'-AGCCAGATCACATGTTTTCATC-3'
CH-F7-Fb1-rev: 5'-ACAACGGCCACCAGTTTATC-3'

ПЦР проводили в амплификаторе T100 (Bio-Rad, США) по программе, описанной ранее (Lyzhin, Saveleva, 2021a).

Разделение продуктов амплификации осуществлялось методом электрофореза в 2,0-процентном агарозном геле. Визуализацию и анализ результатов электрофореза проводили с использованием системы гель-документирования ChemiDoc XRS+ (Bio-Rad, США). Определение размера ампликонов проводили с использованием ДНК-маркера Step 100 («Биолабмикс», Россия).

Результаты и обсуждение

В результате проведенного скрининга маркер GE-8019 идентифицирован у 50,0% образцов, относящихся к 14 из проанализированных диких видов яблони (см. таблицу) и одному культурному (*M. × cerasifera* var. *hiemalis*). Маркер AE10-375 идентифицирован у 76,0% образцов, относящихся к 21 дикому виду из 23 исследованных и двум разновидностям *M. × cerasifera* (*hiemalis* и *odorata*). Маркер CH-F7-Fb1 идентифицирован у 30,0% образцов, относящихся к 11 диким видам и трем разновидностям *M. × cerasifera* (*aurantiaka, hiemalis* и *odorata*).

Примеры электрофоретических спектров маркеров AE10-375, GE-8019 и CH-F7-Fb1 у диких видов и разновидностей яблони приведены на рисунке, результаты идентификации – в таблице.

В тех сериях, где было изучено свыше пяти образцов, маркер GE-8019 наиболее часто встречается в сериях *Toringonae* – 60,0% проанализированных образцов, *Malus* – 55,5% и *Baccatae* – 53,3%. Маркер AE10-375 широко представлен у генотипов яблони всех серий, при этом в серии *Toringonae* он выявлен у 100% проанализированных образцов, в сериях *Baccatae*, *Orientalis* и *Malus* он выявлен у более 70,0% образцов. Маркер CH-F7-Fb1 наиболее широко представлен в сериях *Malus* и *Toringonae* – 44,4% и 40,0% образцов соответственно.

При этом необходимо отметить, что в наших исследованиях у использованных для анализа ДНК-маркеров могут также присутствовать дополнительные ампликоны большего или меньшего размера, не описанные разработчиками. Данные фрагменты свидетельствуют о полиморфизме изучаемого локуса или являются результатом неспецифической амплификации, могут быть использованы в качестве положительного контроля при постановке ПЦР, однако не должны учитываться при анализе результатов амплификации.

Хотя бы один из трех изучаемых маркеров присутствует у 45 анализируемых образцов, относящихся к 22 диким видам яблони, и одному виду, встречающемуся только в культуре. Комбинация двух маркеров из трех присутствует у 20 образцов (14 видов), что составляет 40,0% от их общего количества. Все три маркера присутствуют только у 7 образцов (14,0%), относящихся к шести видам: *M. × robusta* var. *persicifolia* (к-41279) и *M. × cerasifera* var. *hiemalis* (к-2342) из секции *Gymnomeles* (серия *Baccatae*); *M. sylvestris* (к-73, к-123) и *M. × spectabilis* var. *albi plena* (к-2416) из секции *Malus* (серия *Malus*); *M. × sargentii* (к-2428) из секции *Sorbomalus* (серия *Toringonae*) и *M. coronaria* (к-2326) из секции *Chloromeles* (серия *Coronariae*). У образцов видов *M. pallasiana* (к-1457), *M. mandshurica* subsp. *sachalinensis* (к-890), *M. niedzwetzkyana* (к-13279), *M. × purpurea* (к-2392), *M. orientalis* (к-41623) и *M. domestica* Borkh. ‘Антоновка обыкновенная’ (к-711) (12,0% от общего количества) изучаемые маркеры в генотипе отсутствуют.

Другими исследователями у некоторых диких видов яблони также были идентифицированы отдельные маркеры. В частности, маркеры GE-8019 и AE10-375 по отдельности были выявлены в некоторых популяциях яблони Недзвецкого (*M. niedzwetzkyana*), произрастающих в Казахстане. При этом, как и в наших исследованиях, комбинации маркеров GE-8019 и AE10-375 у представителей данного вида не обнаружено (Nurtaza et al., 2022). Необходимо также отметить, что по данным полевой оценки в условиях Иссык-Кульской, Джалал-Абадской областей Кыргызстана яблоня Недзвецкого характеризуется средним уровнем устойчивости к *E. amylovora* (Doolotkeldieva et al., 2021a, b).

Наряду с межвидовым разнообразием, для фланкирующих QTL *FBF7* ДНК-маркеров характерен также внутривидовой полиморфизм, в частности среди образцов *M. orientalis* маркер GE-8019 выявлен у образца к-29484 и подвида *turkmenorum* (к-13283), но отсутствует у остальных (к-29460, к-29476, к-41623, к-49478); маркер AE10-375 присутствует у 5 образцов (к-29484, к-29476, к-49478, к-29460, к-13283), но отсутствует у образца к-41623; маркер CH-F7-Fb1 присутствует только у образ-

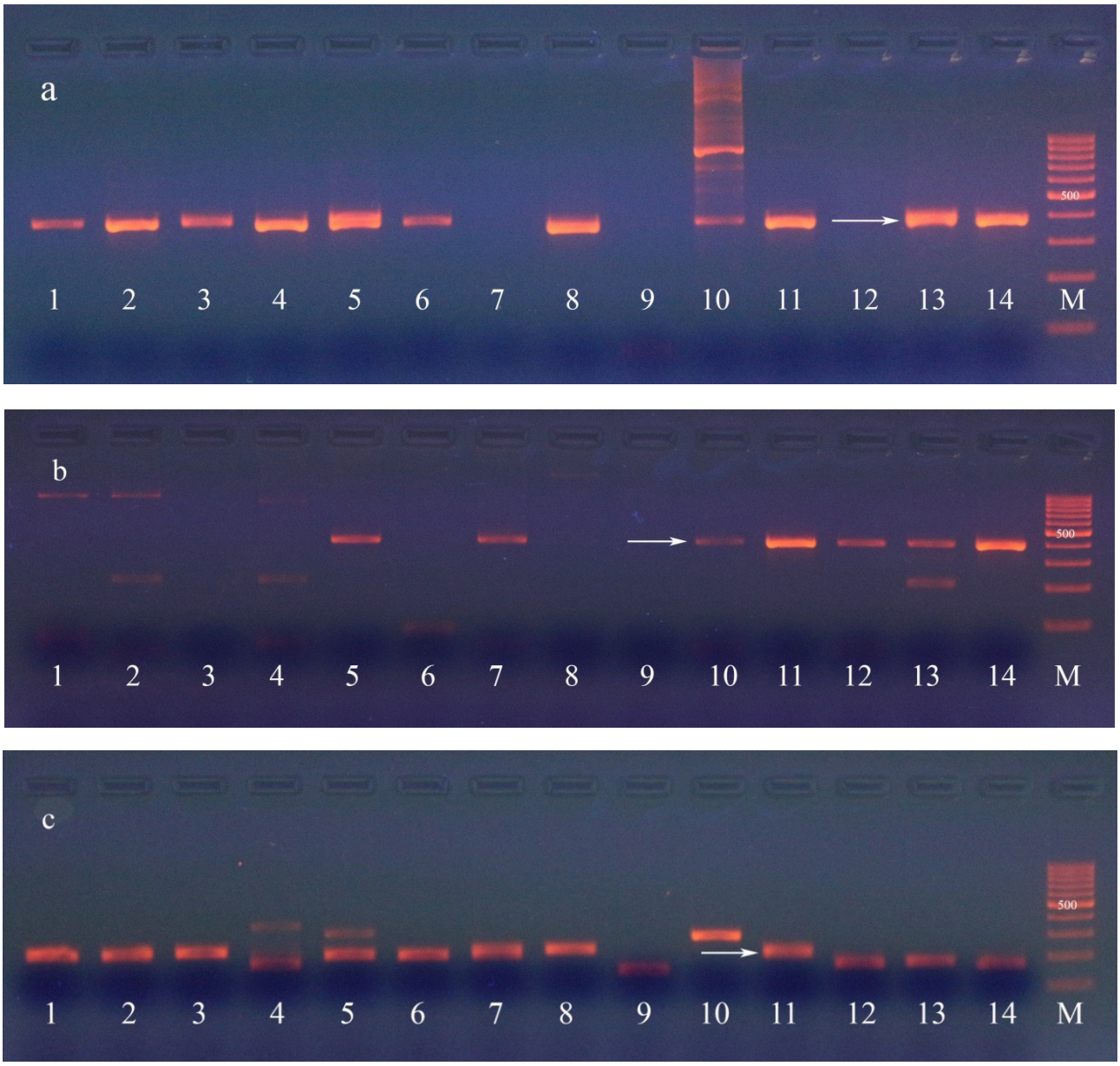


Рисунок. Электрофоретический спектр маркеров AE10-375 (a), GE-8019 (b) и CH-F7-Fb1 (c) у видов и разновидностей яблони:

1 – *M. turkmenorum* (к-13283); **2** – *M. florentina* (к-2345); **3** – *M. mandshurica* (к-41277); **4** – *M. caspiriensis* (к-14942); **5** – *M. hupehensis* (к-14945); **6** – *M. × cerasifera* var. *odorata* (к-2332); **7** – *M. × purpurea* (к-2392); **8** – *M. coronaria* (к-2336); **9** – *M. × cerasifera* var. *aurantiaka* (к-2314); **10** – *M. baccata* (к-2324); **11** – *M. × purpurea* var. *aldenhamensis* (к-2393); **12** – *M. pallasiana* (к-1457); **13** – *M. transitoria* (к-2424); **14** – *M. × cerasifera* var. *hiemalis* (к-2342).

M – маркер молекулярного веса ДНК; стрелками указаны продукты амплификации маркеров AE10-375 (375 пн), GE-8019 (397 пн) и CH-F7-Fb1 (210 пн)

Figure. Electrophoretic profile of the DNA markers AE10-375 (a), GE-8019 (b), and CH-F7-Fb1 (c) in apple-tree wild species and varieties:

1 – *M. turkmenorum* (k-13283); **2** – *M. florentina* (k-2345); **3** – *M. mandshurica* (k-41277); **4** – *M. caspiriensis* (k-14942); **5** – *M. hupehensis* (k-14945); **6** – *M. × cerasifera* var. *odorata* (k-2332); **7** – *M. × purpurea* (k-2392); **8** – *M. coronaria* (k-2336); **9** – *M. × cerasifera* var. *aurantiaka* (k-2314); **10** – *M. baccata* (k-2324); **11** – *M. × purpurea* var. *aldenhamensis* (k-2393); **12** – *M. pallasiana* (k-1457); **13** – *M. transitoria* (k-2424); **14** – *M. × cerasifera* var. *hiemalis* (k-2342).

M – DNA molecular weight marker; arrows indicate amplification products of the markers AE10-375 (375 bp), GE-8019 (397 bp), and CH-F7-Fb1 (210 bp)

ца *M. orientalis* к-49478 (см. таблицу). Внутривидовой полиморфизм по устойчивости диких яблонь к бактериальному ожогу также подтверждается другими исследователями (Volk et al., 2009). Однако следует отметить особо, что в нашей работе для вида *M. baccata* показан минимальный уровень полиморфизма, поскольку пять из шести исследованных образцов имеют идентичный набор ДНК-маркеров (см. таблицу).

Комбинация маркеров AE10-375 и CH-F7-Fb1 (210 пн), которые картированы с одной стороны от пика QTL *FBF7*, выявлена у 13 образцов, относящихся к 11 видам яблони, что составляет 26,0% от общего количества. У образцов *M. baccata* (к-14207, к-2316, к-2317, к-2319, к-2324, к-2333), *M. mandshurica* subsp. *sachalinensis* (к-41275), *M. × robusta* (к-43199), *M. asiatica* (к-2343), *M. sieversii* (к-13975), *M. × purpurea* (к-2393, к-14973, к-2396), *M. orientalis* (к-29460, к-29476, к-29484, к-13283), *M. sylvestris* (к-29493), *M. × prunifolia* (к-2454), *M. caspiriensis* (к-14943), *M. × floribunda* (к-2346), *M. sieboldii* (к-2322), *M. × scheidekerii* (к-2407), *M. transitoria* (к-2424) и *M. florentina* (к-2345) маркер AE10-375 присутствует, тогда как целевой ампликон маркера CH-F7-Fb1 не выявлен. У *M. mandshurica* (к-41277) и *M. × cerasifera* var. *aurantiaka* (к-2314) идентифицирован маркер CH-F7-Fb1 (210 пн) при отсутствии маркера AE10-375. Подобные результаты получены другими авторами для некоторых сортов яблони домашней. Например, у сортов 'Hordapfel' и 'Blauacher Wädenswil' маркер AE10-375 присутствует, а CH-F7-Fb1 отсутствует, а у сортов *M. domestica* 'Gold Milenium', 'Melfree' и 'Idared' выявлен маркер CH-F7-Fb1, а маркер AE10-375 не выявлен (Keller-Przybyłkowicz et al., 2009). При этом необходимо отметить, что в исследовании M. A. Khan et al. (2007), являющихся разработчиками использованных для анализа диагностических ДНК-маркеров, у всех сортов яблони домашней (*M. domestica*) с маркером AE10-375 также присутствовал и маркер CH-F7-Fb1 (210 пн).

Комбинация маркеров GE-8019 и AE10-375, фланкирующих QTL *FBF7*, выявлена у 21 образца анализируемых видов яблонь, что составляет 42,0%. Наибольшее количество генотипов, характеризующихся наличием маркеров GE-8019 и AE10-375, выявлено в сериях *Toringonae* (60,0%) и *Baccatae* (53,3%). Наличие в генотипе фланкирующих маркеров свидетельствует о присутствии QTL *FBF7*. Однако все три маркера, как было указано выше, идентифицированы только у семи образцов – *M. × robusta* var. *persicifolia* (к-41279), *M. × cerasifera* var. *hiemalis* (к-2342), *M. sylvestris* (к-73, к-123), *M. × spectabilis* var. *albi plena* (к-2416), *M. × sargentii* (к-2428) и *M. coronaria* (к-2336), из которых два генотипа относятся к серии *Baccatae*, три – к серии *Malus*, по одному – к сериям *Toringonae* и *Coronariae*.

Устойчивость *M. × robusta* var. *persicifolia* к бактериальному ожогу подтверждается также данными фитопатологических тестов. При этом установлено, что у данной разновидности механизм устойчивости отличается от *M. × robusta* 5 (локус *FB_MR5*) и, предположительно, может быть детерминирован *FBF7* (Wöhner et al., 2016). *M. × sargentii* и *M. coronaria* характеризуются значительно более высоким уровнем устойчивости к *E. amylovora* по сравнению с *M. domestica* (Dougherty et al., 2021). Для *M. sylvestris* отмечено наличие как устойчивых, так и восприимчивых к бактериальному ожогу генотипов (с преобладанием восприимчивых форм) (Aldwinckle et al., 2002). В нашем исследовании также отмечен внутривидовой полиморфизм *M. sylvestris*: образцы к-73 и к-123 характеризуются наличием локуса *FBF7*, а образец к-29493 его не имеет.

Разновидности *M. × robusta* var. *persicifolia* и *M. × cerasifera* var. *hiemalis* имеют гибридное происхождение и образовались в результате гибридизации *M. baccata* и *M. × prunifolia* (Barsukova, 2018, 2022). При этом у проанализированных нами образцов *M. baccata* (к-14207, к-2316, к-2317, к-2319, к-2324) и *M. × prunifolia* (к-2454) из трех диагностических маркеров локуса *FBF7* присутствует только два – GE-8019 и AE10-375. Полученные данные позволяют предположить, что в их создании принимали участие другие виды яблони, характеризующиеся также наличием маркера CH-F7-Fb1.

M. × sargentii и разновидность *M. × spectabilis* var. *albi plena*, по литературным данным (Barsukova, 2018, 2022), тоже имеют гибридное происхождение, однако исходные формы неизвестны, что не позволяет определить предполагаемый источник локуса *FBF7*. При этом необходимо отметить, что другая разновидность – *M. × spectabilis* var. *rubra plena* – локуса устойчивости к бактериальному ожогу не имеет (из трех маркеров присутствует только GE-8019).

M. coronaria относится к североамериканской группе яблонь, обособившихся в третичном периоде (Barsukova, 2021). Большинство американских видов характеризуется высоким уровнем устойчивости к бактериальному ожогу (Dougherty et al., 2021).

M. sylvestris распространена на территории от Центральной Европы до Передней Азии, является наряду с *M. sieversii* одним из родоначальников культивируемых сортов яблони (*M. domestica*). При этом проанализированные образцы *M. sieversii* локуса *FBF7* не имеют, в связи с чем источником QTL *FBF7* для яблони домашней могли быть некоторые образцы *M. sylvestris*.

Дикие виды яблони также являются источниками других *R*-генов, в частности *M. × robusta* var. *persicifolia* (к-41279) характеризуется наличием генов устойчивости к парше *Rvi4* и устойчивости к мучнистой росе *Pl-1*, *M. × spectabilis* var. *albi plena* (к-2416) – гена устойчивости к парше *Rvi4*, *M. × cerasifera* var. *hiemalis* (к-2342) и *M. coronaria* (к-2336) – гена устойчивости к мучнистой росе *Pl-1*, *M. × sargentii* (к-2428) – гена устойчивости к мучнистой росе *Pl-w* (Savel'ev et al., 2016; Lyzhin, Savel'eva, 2021b), что позволяет использовать их в качестве источников нескольких локусов устойчивости к патогенам.

Заключение

Проведен анализ 23 диких и двух культурных видов яблони (50 образцов) по локусу устойчивости к бактериальному ожогу *FBF7*. Выявлен межвидовой и внутривидовой полиморфизм представителей рода *Malus* по анализируемому локусу устойчивости, а также по отдельным ДНК-маркерам, сцепленным с QTL *FBF7*. Фланкирующие локус *FBF7* маркеры GE-8019 и AE10-375 выявлены у 42,0% изучаемых образцов. При этом три диагностических маркера (GE-8019, AE10-375, CH-F7-Fb1) идентифицированы у *M. × robusta* var. *persicifolia* (к-41279) и *M. × cerasifera* var. *hiemalis* (к-2342) из секции *Gymnomeles* (серия *Baccatae*); *M. sylvestris* (к-73, к-123) и *M. × spectabilis* var. *albi plena* (к-2416) из секции *Malus* (серия *Malus*); *M. × sargentii* (к-2428) из секции *Sorbomalus* (серия *Toringonae*) и *M. coronaria* (к-2326) из секции *Chloromeles* (серия *Coronariae*), которые являются перспективными генетическими источниками устойчивости к *Erwinia amylovora*.

References / Литература

Aldwinckle H.S., Gustafson H.L., Forsline P.L., Bhaskara Reddy M.V. Fire blight resistance of *Malus* species from Sichuan (China), Russian Caucasus, Turkey, and Germany. *Acta Horticulturae*. 2002;590:369-372. DOI: 10.17660/ActaHortic.2002.590.55

Barsukova O.N. Biodiversity of East Asian apple-tree species and their use in breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2022;183(4):12-18. [in Russian] (Барсукова О.Н. Биологическое разнообразие и селекционное использование восточноазиатских видов яблони. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2022;183(4):12-18). DOI: 10.30901/2227-8834-2022-4-12-18

Barsukova O.N. Composition of the collection of wild apple-tree species and its prospects for use in breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(3):95-103. [in Russian] (Барсукова О.Н. Состав коллекции дикорастущих видов яблони и перспективы использования ее в селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(3):95-103). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-95-103

Barsukova O.N. North American apple-tree species: sources of useful agronomic traits for breeding. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):86-90. [in Russian] (Барсукова О.Н. Североамериканские виды яблони – источники хозяйственно ценных признаков для использования в селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(3):86-90). DOI: 10.30901/2227- 8834-2021-3-86-90

Baumgartner I.O., Patocchi A., Frey J.E., Peil A., Kellerhals M. Breeding elite lines of apple carrying pyramided homozygous resistance genes against apple scab and resistance against powdery mildew and fire blight. *Plant Molecular Biology*. 2015;33(5):1573-1583. DOI: 10.1007/s11105-015-0858-x

Cornille A. Gladieux P., Smulders M.J.M., Roldán-Ruiz I., Laurens F., Le Cam B. et al. New insight into the history of domesticated apple: secondary contribution of the European wild apple to the genome of cultivated varieties. *PLoS Genetics*. 2012;8(5):e1002703. DOI: 10.1371/journal.pgen.1002703

Doolotkeldieva T., Bobusheva S., Konurbaeva M. Monitoring the spread of fire blight and its danger for the conservation of genetic resources of local and introduced varieties of apple and pear trees in the biosphere territory Issyk-Kul. *Kyrgyzstan Live Nature Research*. 2021a;(2):151-153. [in Russian] (Доолоткелдиева Т., Бобушева С., Конурбаева М. Мониторинг распространения бактериального ожога и его опасности для сохранения генетических ресурсов местных и интродуцированных сортов яблони и груши биосферной территории Иссык-Куль. *Исследование живой природы Кыргызстана*. 2021a;(2):151-153).

Doolotkeldieva T., Konurbaeva M., Bobusheva S. Monitoring the spread of fire blight and its danger for the conservation of genetic resources of wild apple varieties in the forests of Kyrgyzstan. *Bulletin of Kyrgyz National Agrarian University named after K.I. Skryabin*. 2021b;2(56):35-39. [in Russian] (Доолоткелдиева Т., Конурбаева М., Бобушева С. Мониторинг распространения бактериального ожога и его опасности для сохранения генетических ресурсов дикорастущих сортов яблони в лесах Кыргызстана. *Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К.И. Скрябина*. 2021b;2(56):35-39).

Dougherty L., Wallis A., Cox K., Zhong G.Y., Gutierrez B. Phenotypic evaluation of fire blight outbreak in the USDA *Malus* collection. *Agronomy*. 2021;11(1):144. DOI: 10.3390/agronomy11010144

Drenova N.V. Fire blight in the Russian Federation and current approaches to its diagnostics. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2019;58:131-137. [in Russian] (Дренова Н.В. Ожог плодовых культур в Российской Федерации и современные подходы к его диагностике. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2019;58:131-137). DOI: 10.31676/2073-4948-2019-58-131-137

Durel C.E., Denancé C., Brisset M.N. Two distinct major QTL for resistance to fire blight co-localize on linkage group 12 in apple genotypes 'Evereste' and *Malus floribunda* clone 821. *Genome*. 2009;52(2):139-147. DOI: 10.1139/G08-111

Gautam V., Modgil M. Screening of Indian wild apple accessions with scab and powdery mildew disease resistant gene specific molecular markers. *International Journal of Farm Sciences*. 2022;12(4):1-10. DOI: 10.5958/2250-0499.2022.00098.2

Harshman J.M., Evans K.M., Allen H., Potts R., Flamenco J., Aldwinckle H.S. et al. Fire blight resistance in wild accessions of *Malus sieversii*. *Plant Disease*. 2017;101(10):1738-1745. DOI: 10.1094/PDIS-01-17-0077-RE

Keller-Przybyłkowicz S., Lewandowski M., Korbin M. Molecular screening of apple (*Malus domestica*) cultivars and breeding clones for their resistance to fire blight. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*. 2009;17(2):31-43.

Kellerhals M., Baumgartner I.O., Leumann L., Frey J.E., Patocchi A. Progress in pyramiding disease resistances in apple breeding. *Acta Horticulturae*. 2013;976:487-491. DOI: 10.17660/ActaHortic.2013.976.68

Khan M.A., Durel C.E., Duffy B., Drouet D., Kellerhals M., Gessler C. et al. Development of molecular markers linked to the 'Fiesta' linkage group 7 major QTL for fire blight resistance and their application for marker-assisted selection. *Genome*. 2007;50(6):568-577. DOI: 10.1139/G07-033

Kost T.D., Gessler C., Jänsch M., Flachowsky H., Patocchi A., Broggini G.A.L. Development of the first cisgenic apple with increased resistance to fire blight. *PLoS One*. 2015;10(12):e0143980. DOI: 10.1371/journal.pone.0143980

Kostick S.A., Norelli J.L., Evans K.M. Novel metrics to classify fire blight resistance of 94 apple cultivars. *Plant Pathology*. 2019;68(5):985-996. DOI: 10.1111/ppa.13012

Langenfeld V.T. Apple-trees: morphological evolution, phylogeny, and systematics of the genus. Riga: Zinātne; 1991. [in Russian] (Лангенфельд В.Т. Яблоня. Морфологическая эволюция, филогения, география, систематика. Рига: Зинатне; 1991)

Le Roux P.M.F., Khan M.A., Broggini G.A.L., Duffy B., Gessler C., Patocchi A. Mapping of quantitative trait loci for fire blight resistance in the apple cultivars 'Florina' and 'Nova Easygro'. *Genome*. 2010;53(9):710-722. DOI: 10.1139/G10-047

Lyzhin A.S., Saveleva N.N. Identification of QTL *FBF7* fire blight resistance in apple varieties germplasm. *BIO Web of Conferences*. 2021a;34:02002. DOI: 10.1051/bioconf/20213402002

Lyzhin A.S., Savel'eva N.N. Polymorphism of wild species of p. *Malus* Mill. according to powdery mildew resistance genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series*. 2021b;59(1):62-70. [in Russian] (Лыжин А.С., Савельева Н.Н. Полиморфизм дикорастущих видов р. *Malus* Mill. по генам устойчивости к мучнистой росе. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. 2021b;59(1):62-70). DOI: 10.29235/1817-7204-2021-59-1-62-70

Nurtaza A., Pozharskiy A., Dyussembekova D., Dolgikh S., Nizamdinova G., Taskuzhina A. et al. Conservation of *Malus niedzwetzkyana* Dieck ex Koehne genotypes from Kazakhstan resistant to scab and fire blight diseases. *Research Square*. [preprint] 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1402446/v1

Nybom H., Mikiciński A., Garkava-Gustavsson L., Sehic J., Lewandowski M., Sobiczewski P. Assessment of fire blight tolerance in apple based on plant inoculations with *Erwinia amylovora* and DNA markers. *Trees*. 2012;26(1):199-213. DOI: 10.1007/s00468-011-0649-4

Papp D., Békefi Z., Balotai B., Tóth M. Identification of marker alleles linked to fire blight resistance QTLs in apple genotypes. *Plant Breeding*. 2015;134(3):345-349. DOI: 10.1111/pbr.12258

Ponomarenko V.V., Ponomarenko K.V. The genetic potential of the genus *Malus* Mill. in the apple breeding of the 21th century. *Pomiculture and Small Fruits Culture in Russia*. 2011;28(2):156-163. [in Russian] (Пономаренко В.В., Пономаренко К.В. Генетический потенциал рода *Malus* Mill. в селекции яблони XXI в. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2011;28(2):156-163).

Savel'ev N.I., Lyzhin A.S., Savel'eva N.N. Genetic diversity of the genus *Malus* Mill. on scab resistance genes. *Russian Agricultural Sciences*. 2016;(4):21-24. [in Russian] (Савельев Н.И., Лыжин А.С., Савельева Н.Н. Генетическое разнообразие рода *Malus* Mill. по генам устойчивости к парше. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2016;(4):21-24).

Schlathölter I., Jänsch M., Flachowsky H., Broggini G.A.L., Hanke M.V., Patocchi A. Generation of advanced fire blight-resistant apple (*Malus* × *domestica*) selections of the fifth generation within 7 years of applying the early flowering approach. *Planta*. 2018;247(6):1475-1488. DOI: 10.1007/s00425-018-2876-z

Sehic J., Nyboom H., Garkava-Gustavsson L., Patocchi A., Kellerhals M., Duffy B. Fire blight (*Erwinia amylovora*) resistance in apple varieties associated with molecular markers. *International Journal of Horticultural Science*. 2009;15(1-2):53-57. DOI: 10.31421/IJHS/15/1-2/812

Shamshin I.N., Maslova M.V., Drenova N.V., Dubrovsky M.L., Parusova O.V. Assessment of fire blight resistance in apple clonal rootstocks using molecular markers. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(4):185-191. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-4-185-191

Sharifnabi B., Jamalvand M., Rahimi Tamandegani P., Ghaderi F. Apple powdery mildew resistance genes in Iranian wild apple genotypes. *Iranian Journal of Plant Pathology*. 2020;56(3):319-328. DOI: 10.22034/ijpp.2020.241966

Urbanovich O.Yu., Kazlouskaya Z.A., Khatskevich A.A., Kartel N.A. The analysis of polymorphism SSR-locus of kinds *Malus. Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological Series*. 2010;(1):12-17. [in Russian] (Урбанович О.Ю., Козловская З.А., Хацкевич А.А., Картель Н.А. Анализ полиморфизма SSR-локусов видов *Malus*. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя биологических наук*. 2010;(1):12-17).

Volk G.M., Richards C.M., Henk A.D., Reilley A.A., Reeves P.A., Forsline P.L. et al. Capturing the diversity of wild *Malus orientalis* from Georgia, Armenia, Russia, and Turkey. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2009;134(4):453-459. DOI: 10.21273/JASHS.134.4.453

Wöhner T., Szentgyörgyi E., Peil A., Richter K., Hanke M.V., Flachowsky H. Homologs of the FB_MR5 fire blight resistance gene of *Malus* × *robusta* 5 are present in other *Malus* wild species accessions. *Tree Genetics and Genomes*. 2016;12(1):2. DOI: 10.1007/s11295-015-0962-y

Yerokhova M.D., Orlinski A.D. Fire blight – a dangerous quarantine disease. *Journal of Plant Protection and Quarantine*. 2017;(11):32-34. [in Russian] (Ерохова М.Д., Орлинский А.Д. Бактериальный ожог плодовых – опасное карантинное заболевание. *Защита и карантин растений*. 2017;(11):32-34).

Информация об авторах

Александр Сергеевич Лыжин, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, 393774 Россия, Тамбовская область, Мичуринск, ул. Мичурина, 30, Ranenburzhetc@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9770-8731

Наталья Николаевна Савельева, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный научный центр имени И.В. Мичурина, 393774 Россия, Тамбовская область, Мичуринск, ул. Мичурина, 30, saveleva_natalya_nic@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4874-7536

Information about the authors

Alexander S. Lyzhin, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, I.V. Michurin Federal Science Center, 30 Michurina St., Michurinsk, Tambov Province 393774, Russia, Ranenburzhetc@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9770-8731

Natalia N. Saveleva, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, I.V. Michurin Federal Science Center, 30 Michurina St., Michurinsk, Tambov Province 393774, Russia, saveleva_natalya_nic@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4874-7536

Вклад авторов: Лыжин А.С. – исследование; анализ данных; подготовка рукописи; ответственность за плагиат и самоплагиат. Савельева Н.Н. – сбор биологического материала.
Contribution of the authors: Lyzhin A.S. – research; data analysis; preparation of the manuscript; responsibility for plagiarism and self-plagiarism. Saveleva N.N. – collection of biological material.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.04.2023; одобрена после рецензирования 05.07.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 19.04.2023; approved after reviewing on 05.07.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 635.654:631.527.3
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-143-152

CC BY

Новые сорта овощной вигны (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) селекции ВИР

М. В. Гуркина[1], М. О. Бурляева[2]

[1] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Астраханская опытная станция – филиал ВИР, Астрахань, Россия*

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

Автор, ответственный за переписку: Марина Олеговна Бурляева, m.burlyaeva@vir.nw.ru

Актуальность. Вигна – важная бобовая культура, имеющая огромную пищевую и хозяйственную ценность, занимающая в мире по посевным площадям среди зерновых бобовых культур четвертое место. Она хорошо переносит высокие температуры и устойчива к засухе, поэтому для возделывания в аридных условиях Нижнего Поволжья новые сорта вигны, адаптированные к местным условиям, представляют значительный интерес.
Материалы и методы. Сорта создавались путем массового и индивидуального отбора из староместных образцов вигны, хранящихся в коллекции ВИР. Селекция сортов проводилась на Астраханской опытной станции – филиале ВИР в 2012–2018 гг., конкурсные испытания – в 2019–2021 гг.
Результаты. Созданы сорта ‘Самма Нова’ и ‘Паста Грин’ овощного направления использования. Урожайность бобов у ‘Самма Нова’ – 121,8–148,5 ц/га, семян – 9,18–11,35 ц/га, содержание белка в семенах – 28,8%, в бобах – 27,1%, длина периода вегетации – 57–66 дней. Сорт кустовой, характеризуется дружным созреванием бобов и семян, пригоден для механизированного возделывания. Урожайность бобов ‘Паста Грин’ – 246,8–258,4 ц/га, семян – 8,2–10,4 ц/га, содержание белка в бобах – 29,1%, в семенах – 23,6%. Сорт среднеспелый, с вьющимся стеблем, предназначен для выращивания на шпалере. По большинству изученных показателей сорта значительно превосходят стандарт ‘Сибирский Размер’. В ходе селекционной работы с образцами вигны было выявлено, что сбор бобов в фазу технической спелости стимулирует растения к образованию новых бобов, что в свою очередь удлиняет период плодоношения и увеличивает продуктивность. Максимальное число бобов у всех изученных сортов образуется в первые 20 дней периода плодоношения.
Заключение. В 2022 г. по итогам конкурсного и станционного испытания сорта ‘Самма Нова’ и ‘Паста Грин’ были зарегистрированы в Госреестре селекционных достижений РФ. Зоны возделывания и семеноводства данных сортов – Астраханская и Волгоградская обл., Краснодарский и Ставропольский края, Республика Крым.

Ключевые слова: спаржевая вигна, селекция, сорт, продуктивность бобов

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: Гуркина М.В., Бурляева М.О. Новые сорта овощной вигны (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) селекции ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):143-152. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-143-152

© Гуркина М.В., Бурляева М.О., 2023

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-143-152

New cultivars of vegetable cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) developed at VIR

Maria V. Gurkina[1], Marina O. Burlyaeva[2]

[1] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Astrakhan Experiment Station of VIR, Astrakhan, Russia*

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

Corresponding author: Marina O. Burlyaeva, m.burlyaeva@vir.nw.ru

Background. Cowpea is an important legume crop of great nutritional and economic value, ranking fourth in the world among leguminous crops in the area of cultivation. This crop is known to tolerate high temperatures and droughts, so new cowpea cultivars adapted to the local arid conditions of the Lower Volga are of considerable interest.
Materials and methods. Mass and individual selection techniques were applied to develop new cultivars from cowpea landraces held in the VIR collection. Selection was carried out at Astrakhan Experiment Station of VIR in 2012–2018, and variety trials took place in 2019–2021.
Results. Cvs. 'Samma Nova' and 'Pasta Grin' were released for vegetable use. The pod yield of 'Samma Nova' is 12.18–14.85 t/ha, seed yield is 0.92–1.14 t/ha, protein content is 28.8% in seeds and 27.1% in pods, and its growing season is 57–66 days. The cultivar is bushy, with synchronous pod and seed maturation, suitable for mechanized cultivation. The pod yield of 'Pasta Grin' is 24.68–25.84 t/ha, seed yield is 0.82–1.04 t/ha, protein content is 29.1% in pods and 23.6% in seeds. It is a mid-season cultivar, with a rambling stem, intended for growing on a trellis. Both cultivars significantly exceeded the reference (cv. 'Sibirsky Razmer") in most of the studied indicators. The breeding work with cowpea accessions showed that pod harvesting at the commercial ripeness stage stimulated plants to develop new pods, which extended the duration of fruiting and increased productivity. The maximum number of pods in all studied cultivars was formed in the first 20 days of the fruiting period.
Conclusion. In 2022, according to the results of competitive and local trials, cvs. 'Samma Nova' and 'Pasta Grin' were included in the State Register for Selection Achievements (National List). The zones of cultivation and seed production for these cultivars are Astrakhan and Volgograd Provinces, Krasnodar and Stavropol Territories, and the Republic of Crimea.

Keywords: asparagus cowpea, breeding, cultivar, pod productivity

Acknowledgements: this work 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: Gurkina M.V., Burlyaeva M.O. New cultivars of vegetable cowpea (V*igna unguiculata* (L.) Walp.) developed at VIR. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):143-152. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-143-152

Введение

Вигна (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) – важная бобовая культура, возделываемая в субтропиках и тропиках Африки, Азии, на юге Европы, в Центральной и Южной Америке. По посевным площадям среди зерновых бобовых культур занимает четвертое место в мире после сои, фасоли и нута (https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL). Растения (семена, зеленые бобы, листочки и ростки) широко используется в питании людей, и у многих из них составляют большую часть ежедневного рациона. В странах Америки вигну используют не только как пищевую культуру, но и для улучшения плодородия почвы, а также на пастбищах для выпаса крупного рогатого скота (Timko, Singh, 2008).

Семена и зеленые бобы вигны богаты растительными белками, витаминами группы В, фосфором, магнием, железом, жирными кислотами (линолевой и линоленовой), фосфолипидами, полифенолами (антоцианы, проантоцианидины, флавоноиды) и пр. (Ha et al., 2010; Cai et al., 2003; Hachibamba et al., 2013). Причем содержание антоцианов и их антиоксидантная активность у вигны с черной и красной окраской семенной кожуры значительно выше, чем у черносемянных сои и фасоли, а также красносемянной адзуки (*V. angularis* (Willd.) Ohwi et Ohashi) (Orita et al., 2019). Высокая питательная ценность культуры обуславливает ее использование в нутрицевтическом питании как источника веществ, необходимых для нормальной жизнедеятельности человека (Phillips et al., 2003; Belane, Dakora, 2012; Shevkani et al., 2015).

Известно, что по сравнению с другими бобовыми культурами вигна хорошо адаптируется к высоким температурам и устойчива к засухе (Hall, 2004). Поэтому для возделывания в аридных условиях Нижнего Поволжья, где актуально расширение ассортимента сельскохозяйственных культур и увеличение производства высокобелковых продуктов питания, *V. unguiculata* представляет значительный интерес. Новые сорта вигны, адаптированные к жаркому и сухому климату региона, могли бы с успехом выращиваться на сельскохозяйственных предприятиях, а семена и зеленые овощные бобы использоваться в производстве замороженных овощных смесей или консервов, замещая аналогичные импортные товары (Zhuzhukin, Bagdalova, 2017; Burlyaeva et al., 2021).

На сегодняшний день в Госреестр селекционных достижений РФ включено 30 овощных сортов. Селекцией вигны занимается ряд ведущих научно-исследовательских учреждений и селекционно-семеноводческих фирм. Из их числа патентообладателем 8 сортов является Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) (State Register…, 2023).

Благодаря богатейшей коллекции семян, собранной со всего земного шара, ученые ВИР обладают широкими возможностями в использовании исходного материала для различных задач селекции. С 2008 г. на Астраханской опытной станции – филиале ВИР проводится интродукционное и эколого-географическое изучение образцов вигны и выделение овощных (спаржевых) форм, адаптированных к условиям южных регионов России. В качестве исходного материала были использованы староместные образцы из коллекции ВИР. Основной задачей являлось создание скороспелого, продуктивного сорта с высокими пищевыми качествами бобов (без волокна и пергаментного слоя в створках плода), устойчивого к болезням, пригодного для возделывания в условиях открытого грунта в областях с высокими температурами и бедными, малоплодородными почвами. В 2012 г., после проведения индивидуальных и массовых отборов, изучения образцов в коллекционном и контрольном питомниках, предварительного и конкурсного испытания, был зарегистрирован первый сорт спаржевой вигны ‘Глория’. В дальнейшем была поставлена цель создать более раннеспелые сорта с компактной формой куста и высоким расположением бобов над почвой, пригодные к механизированной уборке, для выращивания широкорядным способом с шириной междурядий 70 см. Результатом селекционной работы стали три сорта – ‘Астраханская Красавица’, ‘Каспийская Заря’ и ‘Жемчужина Каспия’, которые были внесены в Реестр селекционных достижений и допущены к использованию в 2019 г. (Burlyaeva et al., 2019)

Целью настоящего исследования стало создание новых продуктивных овощных сортов для условий Нижнего Поволжья, отличающихся по длине вегетационного периода и имеющих разные морфотипы, для использования в сельскохозяйственном производстве и на приусадебных участках. Для ее выполнения решались следующие задачи:

– отбор раннеспелых форм с детерминантным типом куста, высоким расположением бобов и одновременным созреванием для возделывания в открытом грунте в качестве пропашной культуры;

– выделение форм с неограниченным (индетерминантным) типом роста, плодоносящих в течение всего периода вегетации, для выращивания на шпалерах;

– сравнение сортов с разными морфотипами по урожайности бобов в разные периоды вегетации.

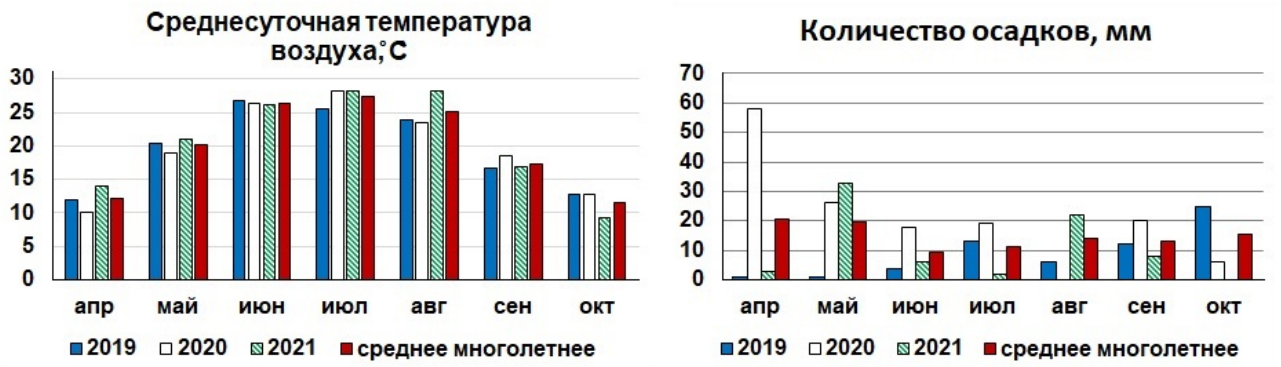
Материалы и методы

Экспериментальная часть выполнялась на Астраханской опытной станции – филиале ВИР (АОС ВИР), расположенной в зоне закаспийских пустынь и дельты Волги, в течение 2012–2021 гг. В 2012–2017 гг. велась селекционная работа с исходным материалом, в 2017–2019 гг. – конкурсное сортоиспытание созданных сортов, в 2019–2021 гг. – углубленное исследование продуктивности бобов в различные даты вегетации. Почвы на опытном поле были аллювиально-луговые, тяжелосуглинистые, слабозасоленные (тип засоления хлоридно-сульфатный), слабозакисленные и с небольшим содержанием гумуса.

Климат Астраханской области относится к засушливым и резко континентальным, по среднемноголетним данным характеризуется суммой активных температур выше 10°С – 3600–3800°С, суммой осадков за период активной вегетации – 140 мм, гидротермическим коэффициентом – 0,4 (http://www.pogodaiklimat.ru/history/34880.htm).

Погодные условия в годы углубленного анализа продуктивности бобов сильно варьировали (рис. 1).

Подготовка почвы и агротехника соответствовали требованиям культуры и рекомендациям для возделывания овощных пропашных культур в Астраханской области. Образцы выращивали по схеме 140 × 10 см, площадь делянки составляла 8,4 м^2. Посев проводили вручную в первой декаде мая. Орошение велось с помощью системы капельного полива с шагом эмиттера 20 см. Для оценки сортов в конкурсном сортоиспытании в качестве стандарта использовали сорт ‘Сибирский Размер’ – один из самых скороспелых образцов вигны в условиях России.



a **b**

Рис. 1. Погодные условия в годы исследований (2019–2021 гг., Астраханская область):
a – среднесуточная температура воздуха; **b** – количество осадков, выпавших за вегетационный период

Fig. 1. Weather conditions in the years of the study (2019–2021, Astrakhan Province):
a – mean daily air temperature; **b** – precipitation amount during the growing season

Анализ образцов проведен в соответствии с методическими указаниями по изучению коллекции зерновых бобовых культур (Vishnyakova et al., 2018), «Международному классификатору видов рода *Vigna* Savi» (Burlyaeva et al., 2016) и «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур» (Methodology for state crop …, 1971; Methodology for state crop…, 1989; Methodology for state crop…, 2019).

Изучение урожайности и динамики формирования бобов в течение вегетационного периода вели на 10 растениях в двух повторностях. Подсчет числа бобов осуществляли двумя способами: 1) собирали бобы в фазу технической спелости по мере их формирования (через каждые 3–5–7–10 дней); 2) проводили одноразовую уборку сухих бобов в конце вегетации.

Результаты и обсуждение

По результатам многолетней оценки 220 образцов овощной вигны из коллекции ВИР на АОС ВИР был выделен исходный материал для селекции сортов с необходимыми характеристиками. В дальнейшем путем индивидуального и массового отбора созданы сорта ‘Самма Нова’ и ‘Паста Грин’, которые в 2022 г. по итогам конкурсного испытания были зарегистрированы в Госреестре селекционных достижений РФ (State Register…, 2023). Зоны возделывания и семеноводства этих сортов – Астраханская и Волгоградская области, Краснодарский и Ставропольский края, Республика Крым. Сорта рекомендованы для использования в кулинарии, для замораживания и консервирования.

Сорт ‘Самма Нова’ (рис. 2) относится к раннеспелой группе, период от всходов до начала цветения составляет 37–40 дней, от всходов до начала технической спелости бобов – 45–50 дней, вегетационный период – 57–66 дней. Растение слабооблиственное, с компактным кустом, длина стебля – 45–60 см. Листья зеленые. Цветки крупные, фиолетовые. Бобы в фазе технической спелости слабоизогнутые, слегка четковидные, на поперечном сечении округлые, без пергаментного слоя и волокна в створках, зеленые, длиной 25–32 см, толщиной 0,8 см. Высота прикрепления нижних бобов – 28–32 см. Достоинством сорта является высокое расположение цветоносов над травостоем, что значительно облегчает уборку. Масса 100 бобов – 579–861 г. Среднее число бобов на растении – 14, максимальное – 24. Число семян в бобе – 12–14. Семена эллиптические, красно-коричневые. Масса 1000 семян – 150 г. Урожайность бобов – 121,8–148,5 ц/га, семян – 9,18–11,35 ц/га. Сорт характеризуется одновременным созреванием бобов и семян. Содержание белка в семенах – 28,8%, в бобах – 27,1% на сухое вещество. Рекомендован для выращивания на широких междурядьях (140 см) в качестве пропашной культуры. Патент № 12294. Дата регистрации – 12.07.2022 (State Register…, 2023).

Сорт ‘Паста Грин’ (см. рис. 2) относится к среднеспелой группе, период от всходов до начала цветения составляет 41–50 дней, от всходов до начала технической спелости бобов – 50–57 дней, от всходов до созревания – 74–80 дней. Растение вьющееся, длина стебля – 120–150 см. Листья зеленые. Цветки крупные, фиолетовые. Бобы в технической спелости слабоизогнутые, округлые в поперечном сечении, без пергаментного слоя и волокна в створках, ярко-зеленые, длиной 46–55 см, толщиной 0,8 см. Высота прикрепления нижних бобов – 12–15 см. Масса 100 бобов – 818–1180 г. Среднее число бобов на растении – 45, максимальное – 65. Достоинством сорта является очень высокая продуктивность бобов. Число семян в бобе – 9–11 штук. Семена эллиптические, красно-коричневые. Масса 1000 семян – 110–120 г. Урожайность бобов – 246,8–258,4 ц/га, превышает сорт-стандарт ‘Сибирский Размер’ на 78–96 ц/га. Урожайность семян – 8,2–10,4 ц/га. Содержание белка в бобах – 29,1%, в семенах – 23,6% на сухое вещество. Рекомендован для выращивания на шпалере. Патент № 12295. Дата регистрации – 12.07.2022 (State Register…, 2023).

Изучение структуры продуктивности и динамики формирования урожая новых сортов вигны.

Анализ образцов позволил выявить определенные закономерности в формировании урожая бобов у овощной вигны. Во все годы изучения у всех сортов число бобов с растения на делянках в опыте, где плоды собирались последовательно по мере достижения технической спелости, значительно превышало их количество в другом варианте опыта, в котором бобы убирали одномоментно в зрелом сухом виде в конце вегетации растений (рис. 3). Разница составляла от 16 до 92 бобов, при этом наиболее существенное увеличение отмечено у сортов ‘Самма Нова’ и ‘Паста Грин’ в 2021 г., что было связано



‘Самма Нова’ ‘Паста Грин’

Рис. 2. **Сорта овощной вигны ‘Самма Нова’ и ‘Паста Грин’ селекции Астраханской опытной станции – филиала ВИР**
(фото М. В. Гуркиной)

Fig. 2. **Vegetable cowpea cultivars ‘Samma Nova’ and ‘Pasta Grin’ developed at VIR**
(photo by M. V. Gurkina)



Рис. 3. **Изменчивость числа бобов вигны, собранных в несколько приемов в стадии технической спелости в течение всего периода вегетации и при одномоментной уборке в конце периода плодоношения**
(2019–2021 гг., Астраханская область)

Fig. 3. **Variability in the number of cowpea pods harvested several times at the commercial ripeness stage throughout the entire growing season and simultaneously at the end of the fruiting period**
(2019–2021, Astrakhan Province)

с благоприятными погодными условиями, позволившими вигне более длительно формировать плоды. Причиной данного явления могут служить биологические особенности культуры. По-видимому, обрыв бобов в фазу технической спелости стимулировал продолжение цветения и образования новых завязей, так как растение не тратило силы на образование и развитие семян.

В опыте, где бобы собирались последовательно по мере их достижения технической спелости, сорта вигны значительно отличались как по продолжительности фаз вегетационного периода, так и продуктивности бобов (табл. 1, 2). 'Самма Нова' в 2019 г. вступил в фазу плодоношения на 51 день после всходов, одновременно со стандартом 'Сибирский Размер', а в 2020 и 2021 г. – на два дня позже стандарта. 'Паста Грин' отставал от них по этому показателю на 6–9 дней. Следует отметить, что период от начала цветения до первого сбора бобов у новых сортов был короче на 3-4 дня, чем у стандарта 'Сибирский Размер'.

При посеве в первой половине мая техническая спелость первых бобов у стандарта и раннеспелого сорта 'Самма Нова' отмечалась 28 июня – 5 июля, у сорта 'Паста Грин' – 5–15 июля. Число сборов за весь период вегетации растений варьировало у разных сортов от 18 до 24 раз. Период между сборами колебался от трех до пяти дней в течение первых 10 сборов и от 6 до 10 дней в по-

Таблица 1. Фенологические даты и продолжительность межфазных периодов вегетации у сортов овощной вигны
(2019–2021 гг., Астраханская область)

Table 1. Phenological dates and the duration of interphase periods for the tested cowpea cultivars
(2019–2021, Astrakhan Province)

Название признака	'Сибирский Размер', стандарт			'Самма Нова'			'Паста Грин'		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Дата посева / всходов	15.05 / 21.05	05.05 / 23.05	06.05 / 16.05	15.05 / 21.05	05.05 / 23.05	06.05 / 16.05	15.05 / 21.05	05.05 / 23.05	06.05 / 16.05
Продолжительность периода от всходов до начала цветения, дни	40	31	33	43	37	38	51	44	41
Дата первого сбора бобов*	05.07	06.07	28.06	05.07	08.07	30.06	11.07	15.07	05.07
Продолжительность периода от начала цветения до первого сбора бобов*, дни	11	13	10	8	9	7	6	9	9
Продолжительность периода от всходов до первого сбора бобов*, дни	51	44	43	51	46	45	57	53	50
Продолжительность периода от начала сбора бобов до максимальной урожайности бобов*, дни	38	53	35	6	49	88	15	51	17
Дата заключительного сбора бобов*	19.09	27.09	27.09	30.09	27.09	27.09	19.09	27.09	27.09
Общая продолжительность периода сбора бобов*, дни	86	82	90	86	80	88	80	73	83
Число сборов бобов*	19	24	20	21	23	20	19	20	18
Продолжительность периода от всходов до начала созревания семян, дни	59	51	53	60	52	57	66	68	62
Продолжительность периода от всходов до 75-процентного созревания семян, дни	67	58	59	66	57	63	80	79	74

Примечание: * – в технической спелости

Note: * – at commercial ripeness

Таблица 2. Элементы структуры продуктивности сортов овощной вигны
(2019–2021 гг., Астраханская область)

Table 2. Yield structure components in the studied cowpea cultivars
(2019–2021, Astrakhan Province)

Название признака / Сорт	'Сибирский Размер', стандарт			'Самма Нова'			'Паста Грин'		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Число бобов с растения за весь период уборки, шт.*	31,3	58,3	47,0	45,6	86,7	154,0	88,9	96,6	159,1
Продуктивность бобов с растения, г*	327,0	747,6	415,5	285,2	638,5	1139,4	691,0	864,9	1573,2
Продуктивность бобов с растения за первые 20 дней уборки, г/% от общей продуктивности*	147,4 / 45	225,1 / 30	202,6 / 48	126,1 / 44	286,7 / 45	354,3 / 31	436,9 / 63	322,3 / 37	915,1 / 8
Масса одного боба, г*	14,0	16,7	16,4	8,2	4,8	5,8	11,0	12,0	12,3
Урожайность бобов, кг/м²*	0,78	1,78	1,00	0,82	1,52	2,71	1,65	2,03	3,74
Число сухих бобов с растения за весь период вегетации, шт.	11,6	19,8	28,5	22,0	70,7	69,7	69,9	62,5	66,7
Масса 1000 семян, г	160	160	107	127	124	110	93	129	112
Продуктивность семян с растения, г	10,2	23,8	22,1	14,5	61,3	63,2	37,9	29,2	32,6
Урожайность семян с 1 м², г	21,9	56,7	52,6	51,7	146	150,5	63,1	69,5	77,6

Примечание: * – убранных в стадии технической спелости
Note: * – harvested at commercial ripeness

следующие. Заключительные сборы бобов проводились 19–30 сентября в период, когда в регионе наблюдаются первые заморозки. Таким образом, длительность плодоношения новых сортов варьировала в пределах от 73 до 88 дней. Однако интенсивность образования плодов в разное время вегетации растений у сортов была неодинакова. Самый нестабильный по продуктивности и урожайности был сорт 'Самма Нова'. Возможно, на него сильнее, чем на другие сорта, влияли погодные условия (засуха и высокие температуры) в период плодоношения. Максимальное число бобов у него выявлено на шестой день после первого сбора в 2019 г., на 49-й день в 2020 г. и на 88-й день в 2021 г. 'Паста Грин' показал максимальную продуктивность растения в первой половине периода плодоношения (на 15–17-й день) в 2019 и 2021 г. (см. табл. 2).

Исследуя динамику формирования бобов в разные периоды сбора в течение вегетации растений, отраженную графически на рисунке 4, можно сделать вывод, что плодоношение сортов вигны имеет волнообразный характер. Число бобов с делянки у стандарта кратно увеличивалось во второй половине периода сбора, на 35–53-й день от появления первых плодов в фазе технической спелости, и достигало 37–76 штук за один день. 'Самма Нова' и 'Паста Грин' характеризовались несколькими ярко выраженными скачками уровня урожайности с пиками в три срока, распределяющимися достаточно равномерно по всему периоду сбора бобов. Первая волна высокой урожайности у 'Самма Нова' наблюдалась на 6–9-й день от начала сбора, число бобов с делянки в разные годы составляло 69, 100 и 107 штук за один день. Вторая волна отмечалась на 10, 40 и 51-й день, число бобов варьировало от 64 до 162. Максимальная урожайность сорта проявилась на 34, 58 и 88-й день, число бобов равнялось 66, 104 и 206 штук. Высокие показатели урожайности у 'Паста Грин' отмечались в 2019 г. в первой половине периода плодоношения – на 8, 11 и 15-й день от начала сбора; число бобов с делянки составило 345 штук (38,8% от общего числа собранных плодов). В 2020 г. пики урожайности у этого сорта были зарегистрированы на 20, 46 и 51-й день; число бобов равнялось 87, 85 и 158 соответственно. Самые высокие показатели урожайности у 'Паста Грин' наблюдались в 2021 г. В этот год у сорта были зафиксированы два периода высокой урожайности – на 17–21-й и на 53-й день: в эти сроки число бобов за один день сбора составило 389 и 198 штук соответственно.

Продуктивность овощных сортов вигны складывается из двух параметров – числа бобов и массы одного боба. У новых сортов вигны она значительно превышала стандарт в течение трех лет исследований (см. табл. 2) несмотря на то, что масса одного боба у стандарта была выше на 8,0–9,2 г. По итогам трехлетнего изучения

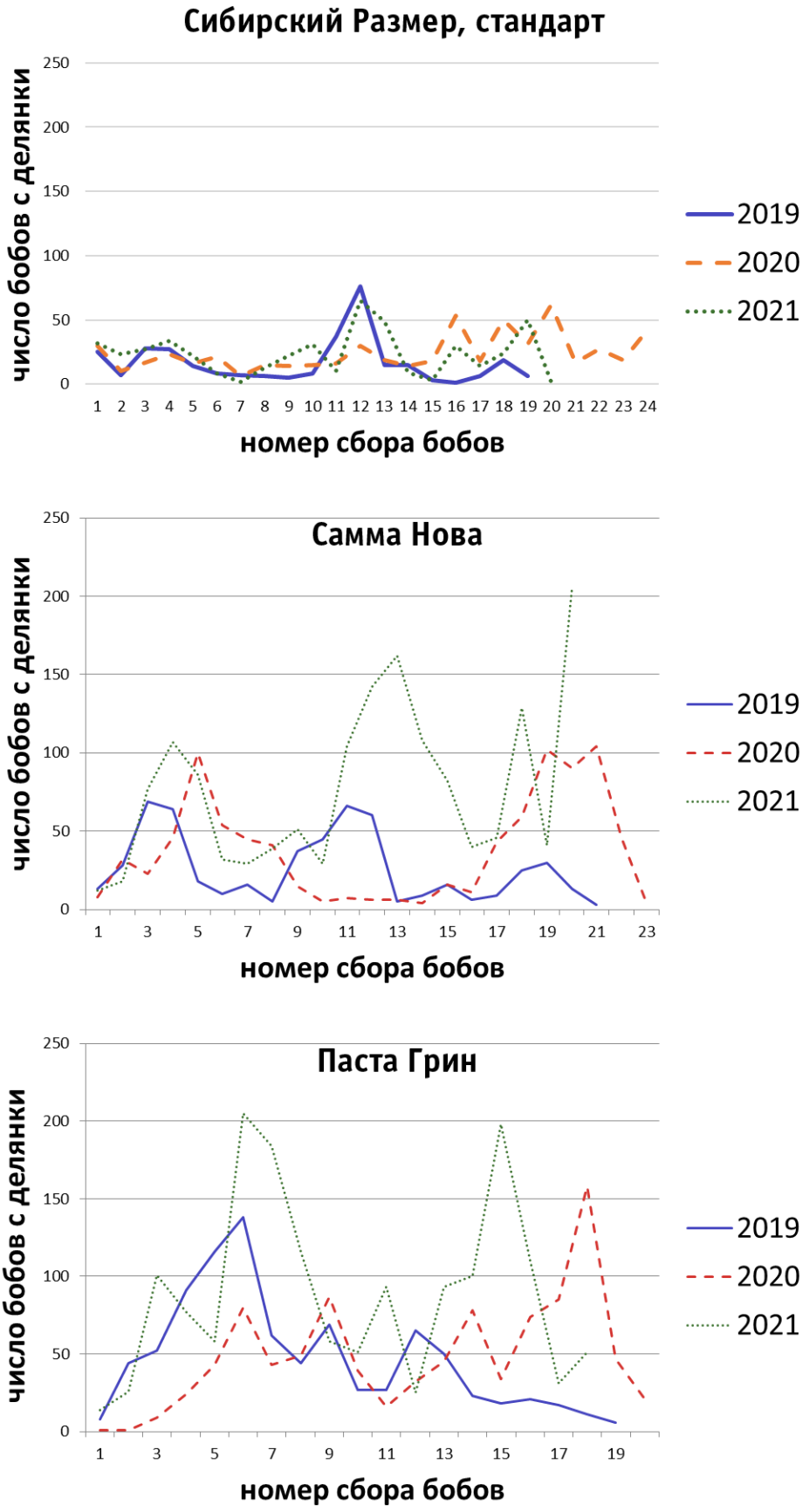


Рис. 4. Динамика формирования бобов у сортов овощной вигны в разные периоды сбора (2019–2021 гг., Астраханская область)

Fig. 4. Pod formation dynamics in the tested cowpea cultivars at different harvesting times (2019–2021, Astrakhan Province)

в среднем число бобов с растения у сорта ‘Самма Нова’ равнялось 95,4 шт., у ‘Паста Грин’ – 114,8. Продуктивность бобов с растения превысила стандарт на 138% у сорта ‘Самма Нова’ (687,7 г) и 209% у сорта ‘Паста Грин’ (1043 г).

Анализируя изменчивость продуктивности новых сортов вигны и учитывая динамику образования бобов, можно предложить различный алгоритм использования сортов. На приусадебных участках и в частных небольших хозяйствах сорта можно культивировать в течение лета – осени и получать свежие бобы на протяжении всего периода вегетации. При промышленном возделывании сортов, когда необходимо одномоментно собрать продукцию и освободить участок под другие культуры, можно рекомендовать выращивать овощную вигну не весь вегетационный период, так как по результатам наших исследований основная масса бобов образуется в начале – середине периода плодоношения. У сорта ‘Самма Нова’ за первые 20 дней плодоношения формируется от 31 до 45% бобов (от общего урожая), у ‘Паста Грин’ – от 37 до 63%. Таким образом, прекращение сбора бобов не в конце периода плодообразования не приведет к существенной потере урожая. Кроме того, такая агротехника культуры будет иметь ряд положительных преимуществ, поскольку оставшуюся на делянках зеленую (листобобовую) массу можно использовать на корм животным или в качестве сидерата для повышения плодородия почвы. В южных регионах с засушливым климатом, где культуры выращиваются на искусственном орошении, сокращение периода вегетации позволит уменьшить потребление воды для полива.

Заключение

В результате исследования новых сортов вигны выявлена интересная биологическая особенность культуры. Последовательный сбор зеленых бобов (в фазу технической спелости) стимулирует растения к образованию новых плодов, что удлиняет период плодоношения. При таком типе сбора урожайность бобов гораздо выше, чем при одномоментной уборке в конце вегетации растений. Потенциальная продуктивность культуры проявляется лучше при многоразовых сборах бобов в течение периода плодообразования.

Плодоношение у сортов вигны имеет волнообразный характер. Повышение продуктивности бобов у сортов ‘Самма Нова’ и ‘Паста Грин’ происходит в три срока, которые достаточно равномерно распределены по всему периоду сбора плодов. Однако максимальная урожайность наблюдается в первые 20 дней после начала стадии технической спелости бобов.

Сорта вигны ‘Самма Нова’ и ‘Паста Грин’ характеризуются высокой продуктивностью, отличным качеством овощных бобов и устойчивостью к высоким температурам. ‘Самма Нова’ отличается кустовой формой растения, ‘Паста Грин’ имеет незаконченный тип роста и вьющийся стебель. Оба сорта пригодны для возделывания в сельскохозяйственном производстве: ‘Самма нова’ – как пропашная культура на широких междурядьях, ‘Паста Грин’ – на шпалерах. При механизированной обработке посевов лучше использовать сорт ‘Самма Нова’, для выращивания в небольших частных хозяйствах – ‘Паста Грин’.

Новые сорта овощной вигны селекции ВИР дополнят ассортимент овощных культур, выращиваемых в засушливых условиях Нижнего Поволжья, и позволят обогатить рацион питания населения.

References / Литература

Belane A.K., Dakora F.D. Elevated concentrations of dietarily-important trace elements and macronutrients in edible leaves and grain of 27 cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) genotypes: Implications for human nutrition and health. *Food and Nutrition Sciences*. 2012;3(3):377-386. DOI: 10.4236/fns.2012.33054

Burlyaeva M.O., Gurkina M.V., Chebukin P.A., Kiseleva N.A. The international descriptors for species of the genus *Vigna* Savi. St. Petersburg: VIR; 2016. [in Russian] (Бурляева М.О., Гуркина М.В., Чебукин П.А., Киселева Н.А. Международный классификатор видов рода *Vigna* Savi. Санкт-Петербург: ВИР; 2016).

Burlyaeva M.O., Gurkina M.V., Chebukin P.A., Perchuk I.N., Miroshnichenko E.V. New varieties of vegetable cowpea (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* (L.) Verdc.) and prospects of their cultivation in southern Russia. *Vegetable Crops of Russia*. 2019;(5):33-37. [in Russian] (Бурляева М.О., Гуркина М.В., Чебукин П.А., Перчук И.Н., Мирошниченко Е.В. Новые сорта вигны (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* (L.) Verdc.) овощного использования, перспективные для возделывания в южных регионах России. *Овощи России*. 2019;(5):33-37). DOI: 10.18619/2072-9146-2019-5-33-37

Burlyaeva M.O., Gurkina M.V., Miroshnichenko E.V. Application of multivariate analysis to identify relationships among useful agronomic characters of cowpea and differentiation of cultivars for vegetable and grain uses. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):36-47. [in Russian] (Бурляева М.О., Гуркина М.В., Мирошниченко Е.В. Применение многомерного анализа для выявления взаимосвязей хозяйственно ценных признаков вигны и дифференциации сортов по овощному и зерновому направлениям использования. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):36-47). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-36-47

Cai R., Hettiarachchy N.S., Jalaluddin M. High-performance liquid chromatography determination of phenolic constituents in 17 varieties of cowpeas. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003;51(6):1623-1627. DOI: 10.1021/jf020867b

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and agriculture data: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL [accessed Aug. 20, 2023].

Ha T.J., Lee M.H., Jeong Y.N., Lee J.H., Han S.I., Park C.H. et al. Anthocyanins in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp. ssp. *unguiculata*]. *Food Science and Biotechnology*. 2010;19(3):821-826. DOI: 10.1007/s10068-010-0115-x

Hachibamba T., Dykes L., Awika J., Minnaar A., Duodu K.G. Effect of simulated gastrointestinal digestion on phenolic composition and antioxidant capacity of cooked cowpea (*Vigna unguiculata*) varieties. *International Journal of Food Science and Technology*. 2013;48(12):2638-2649. DOI: 10.1111/ijfs.12260

Hall A.E. Breeding for adaptation to drought and heat in cowpea. *European Journal of Agronomy*. 2004;21(4):447-454. DOI: 10.1016/j.eja.2004.07.005

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). URL: https://gossortrf.

ru/upload/2019/08/metodica_1.pdf [дата обращения: 25.07.2023].

Methodology for state crop variety trials. Issue 1: General provisions (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vypusk 1: Obshchaya chast). Moscow: Kolos; 1971. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск 1. Общая часть. Москва: Колос; 1971).

Methodology for state crop variety trials. Second issue. Cereals, groats, legumes, maize, and fodder crops (Metodika gosudarstvennogo sortoispytaniya selskokhozyaystvennykh kultur. Vypusk vtoroy. Zernovye, krupyanye, zernobobovye, kukuruza i kormovye kultury). Moscow: Gosagroprom SSSR; 1989. [in Russian] (Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Выпуск второй. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. Москва: Госагропром СССР; 1989).

Orita A., Musou-Yahada A., Shoji T., Oki T., Ohta H. Comparison of anthocyanins, proanthocyanidin oligomers and antioxidant capacity between cowpea and grain legumes with colored seed coat. *Food Science and Technology Research*. 2019;25(2):287-294. DOI: 10.3136/fstr.25.287

Phillips R.D., McWatters K.H., Chinnan M.S., Hung Y.C., Beuchat L.R., Sefa-Dedeh S. et al. Utilization of cowpeas for human food. *Field Crops Research*. 2003;82(2-3):193-213. DOI: 10.1016/S0378-4290(03)00038-8

Shevkani K., Kaur A., Kumar S., Singh N. Cowpea protein isolates: Functional properties and application in gluten-free rice muffins. *LWT – Food Science and Technology*. 2015;63(2);927-933. DOI: 10.1016/j.lwt.2015.04.058

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: 25.07.2023].

Timko M.P., Singh B. Cowpea, a multifunctional legume. In: P.H. Moore, R. Ming (eds). *Genomics of Tropical Crop Plants*. New York, NY: Springer; 2008. p.227-258. DOI: 10.1007/978-0-387-71219-2_10

Vishniyakova M.A., Seferova I.V., Buravtseva T.V., Burlyaeva M.O., Semenova E.V., Filipenko G.I., Aleksandrova T.G., Egorova G.P., Yankov I.I., Bulyntsev S.V., Gerasimova T.V., Drugova E.V. VIR global collection of grain legume crop genetic resources: replenishment, conservation and studying. Guidelines. St. Petersburg: VIR; 2018. [in Russian] (Вишнякова М.А., Сеферова И.В., Буравцева Т.В., Бурляева М.О., Семенова Е.В., Филипенко Г.И., Александрова Т.Г., Егорова Г.П., Яньков И.И., Булынцев С.В., Герасимова Т.В., Другова Е.В. Коллекция мировых генетических ресурсов зерновых бобовых ВИР: пополнение, сохранение и изучение. Методические указания. Санкт-Петербург: ВИР; 2018). DOI: 10.30901/978-5-905954-79-5

Weather and Climate. Reference and Information Portal (Pogoda i klimat. Spravochno-informatsionny portal): [website]. [in Russian] (Погода и климат. Справочно-информационный портал: [сайт]). URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/34880.htm [дата обращения: 21.05.2023].

Zhuzhukin V.I., Bagdalova A.Z. Introduction of asparagus bean (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis* (L.) Verdc.) under the conditions of Lower Volga region. *Zemledelie = Crop Farming*. 2017;(2):36-38. [in Russian] (Жужукин В.И., Багдалова А.З., Интродукция спаржевой вигны (*Vigna unguiculata* subsp *sesquipedalis* (L.) Verdc.) в условиях нижнего Поволжья. *Земледелие*. 2017;(2):36-38).

Информация об авторах

Мария Владиславовна Гуркина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Астраханская опытная станция – филиал ВИР, 416462 Россия, Астраханская обл., Приволжский р-н, с. Яксатово, m.gurkina-08@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6169-6089

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

Information about the authors

Maria V. Gurkina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Astrakhan Experiment Station of VIR, Astrakhan 416462, Russia, m.gurkina-08@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-6169-6089

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

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 02.10.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 07.09.2023; approved after reviewing on 02.10.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 633.14«324»:631.526.32:631.524.7(470.44/47)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-153-162

CC BY

Показатели качества и фракционный состав зерна сортов озимой ржи по крупности в условиях Нижнего Поволжья

Н. Н. Нуждина, Д. А. Жиганов, Т. Я. Ермолаева, Т. Б. Кулеватова, Л. Н. Злобина, Л. В. Андреева, В. А. Куликова, Н. А. Салманова, В. Н. Нечаев

Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Даниил Александрович Жиганов, raiser_saratov@mail.ru

Актуальность. В связи с расширением технологий переработки зерна сортов озимой ржи важно знать генотипически обусловленные характеристики качества зерновой массы, а также ее фракционный состав по размеру.
Материалы и методы. Объектами исследований служили 22 образца селекции научных учреждений России, 3 – Республики Беларусь и 3 сорта селекции ФАНЦ Юго-Востока. Сравнительное испытание проведено в 2021–2022 гг. на делянках площадью 13,2 м^2 в двух полевых повторениях. Показатели качества (натурная масса зерна, масса 1000 зерен, фракционный состав по размеру зерновки, число падения, максимальная высота амилограммы, температура гелеобразования крахмала) определяли стандартными методами. Содержание белка в зерне определяли на инфракрасном анализаторе «Инфратек 1241». Реологические свойства водных суспензий шрота (соотношение «шрот / вода» – 1 : 4) – на роторном вискографе фирмы Brabender по разработанной в лаборатории качества зерна ФАНЦ Юго-Востока методике при температуре 20°С. Статистическая обработка результатов исследований осуществлялась с помощью пакета программ статистического анализа в селекции AGROS (версия 2.13).
Результаты. Выявлено формирование содержания белка на уровне 9,98–10,85% и высокой температуры гелеобразования крахмала в связи с повышенными относительно нормы температурами июня. Наблюдаются значительные различия по фракционному составу зерна между сортами, из которых выделены 12 форм, характеризующихся средней вязкостью суспензии ржаного шрота, с содержанием фракции мелкого зерна до 30% от общей массы.
Заключение. Наблюдается положительная значимая сопряженность между пятью изучаемыми показателями, характеризующими реологические свойства суспензий «вода / шрот» на основе муки из зерна сортов озимой ржи, и фракционным составом зерна 0,82*–0,91*. Содержание фракции мелкого зерна до 30% от общей массы, масса 1000 зерен в пределах 29,0–31,0 г и удлиненная форма зерновки – фенотипические признаки в пользу более высокого содержания пентозанов.

Ключевые слова: натурная масса зерна, число падения, содержание белка, вязкость суспензии, масса фракции зерна (г) менее 2,2 × 20,0 мм в 100 г, сопряженность признаков

Благодарности: работа выполнена согласно госзаданию: FSNM-2022-0003 «Создание и совершенствование системы видов и сортов (гибридов) сельскохозяйственных культур, адаптивных к абиострессорам и устойчивых к основным патогенам, сочетающих высокую потенциальную продуктивность с качеством урожая, с целью снижения экономических рисков в растениеводстве и повышения биоразнообразия в регионе». Статья подготовлена к конференции, посвященной 50-летию лаборатории генетики и цитологии ФАНЦ Юго-Востока.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Нуждина Н.Н., Жиганов Д.А., Ермолаева Т.Я., Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н., Андреева Л.В., Куликова В.А., Салманова Н.А., Нечаев В.Н. Показатели качества и фракционный состав зерна сортов озимой ржи по крупности в условиях Нижнего Поволжья. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):153-162. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-153-162

© Нуждина Н.Н., Жиганов Д.А., Ермолаева Т.Я., Кулеватова Т.Б., Злобина Л.Н., Андреева Л.В., Куликова В.А., Салманова Н.А., Нечаев В.Н., 2023

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-153-162

Grain quality indicators and size-dependent fractional composition in winter rye cultivars under the conditions of the Lower Volga region

Nadezhda N. Nuzhdina, Daniil A. Zhiganov, Tatyana Y. Ermolaeva, Tatyana B. Kulevatova, Lyudmila N. Zlobina, Lyubov V. Andreeva, Valentina A. Kulikova, Nina. A. Salmanova, Vadim. N. Nechaev

Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, Saratov, Russia

Corresponding author: Daniil A. Zhiganov, raiser_saratov@mail.ru

Background. Grain quality indicators of winter rye cultivars were analyzed in connection with the size-dependent fractional composition of their grain in the Lower Volga environments.
Materials and methods. The research material included 22 cultivars developed at various Russian scientific institutions, 3 Belarusian ones, and 3 cultivars bred at the Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region. Comparative trials were conducted in 2021–2022 on 13.2 m^2 plots in two field replications. The following grain quality indicators were studied: grain test weight, 1000 grain weight, size-dependent fractional composition, Hagberg falling number, amylogram peak height, starch gelatinization temperature, protein content, and rheological properties of the meal/water slurry.
Results. Protein content was recorded at a level of 9.98–10.85%, while the starch gelatinization temperature was high due to the June air temperatures higher than the norm. Significant differences among the cultivars were found in the fractional composition of grain: 12 forms were identified with medium viscosity of the meal/water slurry and the fine-grain fraction content up to 30% of the total weight.
Conclusions. There is a positive significant correlation between the five studied indicators characterizing the rheological properties of the meal/water slurry made from the grain of winter rye cultivars and the grain fraction composition (0.82*–0.91*).

Keywords: grain test weight, falling number, protein content, slurry viscosity, grain fraction weight (g) less than 2.2 × 20.0 mm per 100 g, interrelation of characters

Acknowledgements: the study was carried out under the state task: FSNM-2022-0003 “Development and improvement of a system of crop species and cultivars (hybrids) adaptable to abiostressors, resistant to major pathogens, and combining high potential productivity with crop quality in order to reduce economic risks in crop production and increase biodiversity in the region”. The article was prepared for the 50th anniversary of the Genetics and Cytology Laboratory of the Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Nuzhdina N.N., Zhiganov D.A., Ermolaeva T.Y. Kulevatova T.B., Zlobina L.N., Andreeva L.V., Kulikova V.A., Salmanova N.A., Nechaev V.N. Grain quality indicators and size-dependent fractional composition in winter rye cultivars under the conditions of the Lower Volga region. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):153-162. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-153-162

Введение

В Приволжском федеральном округе России озимая рожь является распространенной продовольственной культурой. Значительное количество зерна используется и в производстве кормов. Однако в последнее десятилетие наблюдается сокращение посевов этой культуры; в Саратовской области они составляют 58 287,0 га.

Успешная селекционная работа в научных учреждениях позволила создать сорта озимой ржи, которые прошли районирование в регионах Российской Федерации. Расширение технологий переработки зерна данных сортов, рассмотрение перспективы применения возможны только при знании генотипически обусловленных характеристик качества. Изучению данных вопросов посвящены исследования многих ученых (Shakirzyanov et al., 2019; Goncharenko, 2014).

Основным документом в РФ, определяющим обязательные требования, которым должна соответствовать пищевая или техническая рожь, – это Межгосударственный стандарт ГОСТ 16990-2017 «Рожь. Технические условия» (GOST 16990-2017..., 2019). В соответствии с критериями ЕС ржаное зерно обладает хлебопекарными качествами, если число падения > 120 с, максимальная вязкость, оцениваемая по высоте амилограммы > 200 е. а. и максимальная температура пика клейстеризации > 63°C (Munzing et al., 2004). В определении качества зерна важную роль играют следующие показатели: количество белка, особенности крахмала, активность фермента альфа-амилазы, содержание пентозанов. Косвенная оценка содержания пентозанов проводится по вязкости водно-мучной (шротовой) суспензии (Boros et al., 1993; Ponomareva et al., 2015). Мукомольные качества определяют такие показатели, как масса тысячи зерен (1000 зерен) и натурная масса зерна.

Показатели качества зерна обусловлены большой группой сцепленных генов, экспрессия которых подвержена значительному влиянию генетических и средовых факторов, а также их взаимодействию (Ponomareva, Ponomarev, 2019a). Масса 1000 зерен – признак генотипически обусловленный, с низкой долей дисперсии, характеризующей взаимодействие «генотип – год» – 2,6%. Данный признак тесно связан с выравненностью зерна и натурной массой. Согласно многолетним исследованиям, доля дисперсии, характеризующая влияние года на изменчивость признака «вязкость водного экстракта», составила 49%, взаимодействие «генотип – год» – 16,2%, генотипа – 34,8%, что отражает возможность идентификации сортов по данному показателю. Вязкость водного экстракта ржаного шрота, позволяющая косвенно оценить содержание водорастворимых пентозанов, взаимосвязана умеренной отрицательной связью с массой 1000 зерен (r = –0,522) и выравненностью зерна (r = –0,624) (Ponomareva, Ponomarev, 2019b). Интерес представляют исследования ученых под руководством Р. Р. Исмагилова (Ismagilov, Gaisina, 2015), выявивших на примере сорта ‘Чулпан 7’, что при увеличении толщины зерновки на 1 мм содержание водорастворимых пентозанов снижается на 1,01%.

Цель настоящего исследования – выявить межсортовые различия по качественным показателям в условиях Нижнего Поволжья в связи с индивидуальной характеристикой сорта – формированием урожая зерна с определенным содержанием фракции диаметром поперечного сечения менее 2,2 мм.

Материалы и методы

Полевые эксперименты проводили на опытном участке в севообороте селекционного центра Федерального аграрного научного центра Юго-Востока (ФАНЦ Юго-Востока, г. Саратов). Материалом служило зерно перспективных популяционных сортов озимой ржи инорайонной и собственной селекции урожая 2021 и 2022 г. В качестве стандарта использовали сорт ‘Саратовская 7’. Предшественник – черный пар, площадь делянки – 13,2 м^2, норма высева – 4,0 млн всхожих зерен на гектар. Почвы – южный чернозем с пятнами солонцов, содержание гумуса в пахотном слое – 3,0–3,5%; подвижного фосфора – около 6,0 мг/100 г почвы; калия – 25,0 мг/100 г почвы, реакция почвенного раствора близкая к нейтральной (pH 5,6–6,5).

Анализировали две полевые повторности. Содержание белка в зерне определяли на инфракрасном анализаторе «Инфратек 1241». Число падения оценивали на приборе Falling Number 1500 по методу Хагберга – Пертена. Процесс гелеобразования крахмала и температуру пика высоты кривой, отражающей его, – на амилографе фирмы Brabender; реологические свойства водных суспензий шрота (соотношение «шрот / вода» – 1 : 4) – на роторном вискографе той же фирмы, применяя разработанную в лаборатории качества зерна ФАНЦ Юго-Востока методику (Kulevatova et al., 2016; Ermolaeva et al., 2021). Фиксировались такие показатели, как начальная вязкость суспензии при температуре 20°C ($ВС_0$), вязкость суспензии через 10 и 30 минут эксперимента ($ВС_{10}$, $ВС_{30}$) в единицах вискографа – е. в. Рассчитывали средние скорости изменения вязкости в течение 10 и 30 минут эксперимента по формулам: $\overline{V}_{10} = (ВС_{10} – ВС_0)/10$, $\overline{V}_{30} = (ВС_{30} – ВС_0)/30$. Фракционный состав определяли следующим образом: 100 г зерна просеивали через сито 2,2 × 20 мм, далее взвешиванием устанавливали его массу. Данный размер сит был выбран в связи с тем, что при доработке зерна наиболее часто применяются решета 2,2 ×20 мм. Статистическая обработка результатов исследований осуществлялась с использованием пакета программ статистического и биометрико-генетического анализа в растениеводстве и селекции AGROS (версия 2.13).

Метеорологические условия в годы проведения исследований способствовали активизации ферментов, содержащихся в зерне ржи, и снижению водоудерживающих свойств пентозанов. Май и июнь 2021 г. отличались от нормы повышенным температурным режимом и выпадением осадков в виде кратковременных дождей ($ГТК_{V–VII}$ = 0,75), а в 2022 г. наблюдался пониженный температурный режим в мае, июне и обилие осадков ($ГТК_{V–VII}$ = 0,70) в сравнении с нормой.

Результаты и обсуждение

По показателям, важным для мукомольной промышленности, таким как масса 1000 зерен и натурная масса зерна, сорта достоверно различались между собой. Фракционный анализ выявил различия между крайними значениями индексов у изучаемых форм в 17,9 раз в 2021 г. и в 24,8 в 2022 г. (табл. 1). В 2021 г. у 50% изученных сортов выявлено зерно с натурной массой ниже ограничительной нормы – 715 г/л; можно предположить, что на формирование зерновки отрицательно сказались повышенные температуры воздуха мая и июня. При этом количество зерна, прошедшего через сито 2,2 × 20,0 мм, составило у отдельных сортообразцов северо-восточной

Таблица 1. Физические свойства зерна и его фракционный состав у сортов озимой ржи
Table 1. Physical properties of grain and its fractional composition in winter rye cultivars

Сорт / Cultivar	Натурная масса зерна, г/л / Grain test weight, g/L		Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g		Масса фракции (г) менее 2,2 × 20,0 мм в 100 г зерна / Weight of the grain fraction smaller than 2.2 × 20 mm per 100 g	
	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Марусенька / Marusenka	731	746	38,3	38,7	4,5	2,7
Саратовская 7 / Saratovskaya 7	727	736	35,3	34,4	8,6	9,0
Саратовская 10 / Saratovskaya 10	728	744	34,4	35,0	7,2	6,3
Радонь / Radon	714	730	30,5	31,3	19,0	13,2
Тантана / Tantana	717	707	31,8	28,2	15,6	24,8
Подарок / Podarok	725	736	28,9	28,2	30,4	28,7
Рушник / Rushnik	664	712	22,5	27,2	66,7	37,9
Фаленская 4 / Falenskaya 4	690	721	23,7	23,5	80,5	57,6
Флора / Flora	684	712	21,0	22,8	80,5	67,2
Румба / Rumba	672	694	21,6	22,2	76,8	67,1
Графиня / Grafinya	682	709	22,8	24,4	76,2	61,9
Чулпан 7 / Chulpan 7	707	717	29,0	30,8	33,3	17,8
Таловская 41 / Talovskaya 41	726	739	29,5	29,0	18,7	17,6
Таловская 44 / Talovskaya 44	716	731	29,5	31,7	18,6	14,4
Таловская 45 / Talovskaya 45	715	740	28,8	31,0	18,3	15,2
Безенчукская 110 / Bezenchukskaya 110	725	731	32,5	30,5	16,6	17,0
Безенчукская 87 / Bezenchukskaya 87	729	731	32,6	36,4	5,3	6,0
Роксана / Roksana	705	720	28,5	32,4	29,1	7,5
Антарес / Antares	731	729	34,5	32,7	7,9	12,4
Презент / Prezent	730	742	27,8	30,5	34,0	21,8
Офелия / Ofeliya	713	733	30,0	30,3	33,3	25,1
Голубка / Golubka	714	734	31,6	31,9	22,4	22,5
Паулинка / Paulinka	713	734	29,2	31,8	27,8	17,5
Валдай / Valday	726	740	32,5	31,0	13,6	18,5
Альфа / Alfa	719	734	30,7	29,3	25,6	23,5
Татьяна / Tatyana	709	730	29,7	28,7	24,1	21,7
Московская 12 / Moskovskaya 12	720	730	30,1	30,1	23,6	27,1
Немчиновский 1 / Nemchinovsky 1	701	742	26,1	29,2	30,6	29,4
F	18,9*	3,6*	20,7*	13,7*	63,4*	33,6*
$НСР_{05}$, NSR_{05}	12,4	11,7	2,9	2,8	8,5	8,1

Примечание: $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разница
Note: NSR_{05} is the least significant difference

группы до 80%. Сорта, сформировавшие зерно с натурной массой выше 715 г/л в 2021 г., более устойчивы к среднезасушливым условиям. Период активной вегетации 2022 г. оказался благоприятным для формирования хорошо выполненного зерна у инорайонных сортов. По показателям качества зерна различия между сортами были значимы на 5-процентном уровне (табл. 2). Отмечаются высокие абсолютные значения числа падения у всех сортов в 2021 г., превышающие соответствующие значения 2022 года.

Также по содержанию белка и максимальной температуре гелеобразования крахмала в 2021 г. значения выше в среднем на 9%. Наблюдаются значимые различия по максимальной высоте амилограммы, которая у отдельных сортов варьировала в пределах 250–350 е. а., то есть зерно пригодно для выпечки при бездрожжевом и кисломолочном ведении теста (на закваске); в таком случае можно ожидать образование качественного мякиша хлеба. В 2022 г. у 26 сортов наблюдается формирование высококачественного зерна; мак-

Таблица 2. Выраженность показателей качества зерна озимой ржи в зависимости от условий периода активной вегетации растений

Table 2. Expression levels of winter rye grain quality indicators depending on the conditions during the active growing season of plants

Сорт / Cultivar	Число падения, с / Falling number, sec		Максимальная высота амилограммы, е. а. / Amylogram peak height, a. u.		Максимальная температура гелеобразования крахмала, °С / Starch gelatinization temperature (max), °C		Содержание белка, % / Protein content, %	
	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Марусенька / Marusenka	270	185	265	310	71,8	67,0	10,25	8,65
Саратовская 7 / Saratovskaya 7	298	195	310	285	75,5	64,3	9,98	8,90
Саратовская 10 / Saratovskaya 10	312	231	345	415	73,5	65,3	10,1	9,00
Радонь / Radon	297	228	350	460	71,5	66,8	10,65	8,75
Тантана / Tantana	287	247	280	460	70,0	69,0	10,40	9,00
Подарок / Podarok	293	204	310	380	73,8	67,5	10,65	8,55
Рушник / Rushnik	369	262	490	710	80,8	71,0	10,85	7,9
Фаленская 4 / Falenskaya 4	345	258	450	530	74,5	68,0	10,55	8,75
Флора / Flora	368	246	520	575	80,3	68,5	10,38	8,55
Румба / Rumba	400	238	555	655	84,5	70,5	10,60	8,95
Графиня / Grafinya	321	237	650	490	77,3	70,3	10,50	8,55
Чулпан 7 / Chulpan 7	311	237	315	435	71,8	66,0	10,15	8,90
Таловская 41 / Talovskaya 41	352	216	355	365	76,0	67,0	10,50	8,70
Таловская 44 / Talovskaya 44	353	265	470	405	89,8	69,0	10,75	9,15
Таловская 45 / Talovskaya 45	383	248	465	400	85,0	67,8	10,80	9,75
Безенчукская 110 / Bezenchukskaya 110	249	270	255	495	70,8	68,3	10,80	9,75
Безенчукская 87 / Bezenchukskaya 87	313	224	300	495	74,3	66,8	10,00	9,25
Роксана / Roksana	334	232	355	440	72,8	68,0	10,50	8,9
Антарес / Antares	278	254	270	485	75,3	67,8	10,57	9,5
Презент / Prezent	334	200	320	345	73,0	67,5	10,82	9,65
Офелия / Ofeliya	352	268	350	480	74,0	68,5	10,65	9,0

Таблица 2. Окончание
Table 2. The end

Сорт / Cultivar	Число падения, с / Falling number, sec		Максимальная высота амилограммы, е. а. / Amylogram peak height, a. u.		Максимальная температура гелеобразования крахмала, °С / Starch gelatinization temperature (max), °С		Содержание белка, % / Protein content, %	
	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Голубка / Golubka	347	299	580	550	74,5	69,8	10,80	8,7
Паулинка / Paulinka	350	266	250	505	79,5	67,0	10,32	8,85
Валдай / Valday	342	248	310	400	73,3	68,3	10,77	8,95
Альфа / Alfa	343	261	295	410	73,3	65,3	10,58	9,35
Татьяна / Tatyana	359	244	330	350	71,5	67,8	10,35	8,75
Московская 12 / Moskovskaya 12	327	306	425	505	75,8	67,3	10,3	9,85
Немчиновский 1 / Nemchinovsky 1	355	268	295	555	71,3	66,3	11,20	9,8
F	3,5*	3,1*	5,1*	6,1*	2,6*	NS	3,0*	2,6*
$НСР_{05;}$ $НСР_{05}$	54	47	148	104	9,1		0,53	0,70

Примечание: $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разница
Note: $НСР_{05}$ is the least significant difference

симальная высота амилограммы у них изменяется от 350 до 650 е. а.

По всем без исключения показателям реологических свойств водной суспензии шрота в годы исследований наблюдались достоверные межсортовые различия (табл. 3).

Максимальные значения вязкости наблюдались у сортов ‘Фаленская 4’ и ‘Рушник’ в 2021 г.; у ‘Фаленской 4’, ‘Флоры’, ‘Румбы’, ‘Графини’ – в 2022. Они также характеризуются более высокой массой зерна, прошедшего сквозь сито, то есть количеством зерен с шириной поперечного сечения менее 2,2 мм. Сорта саратовской селекции характеризуются крупнозерностью, с низкой массой прохода сквозь решето, при этом они обладают наименьшей вязкостью водной суспензии. В условиях Нижнего Поволжья интерес представляют селекционные формы, сочетающие вязкость суспензии на уровне межсортовой средней с массой прохода через решето порядка 35–30% и менее; например, гибрид Немчиновский 1, сорта ‘Московская 12’, ‘Татьяна’, ‘Альфа’, ‘Таловская 44’, ‘Таловская 45’, ‘Презент’, ‘Роксана’, ‘Офелия’, ‘Голубка’, ‘Паулинка’, ‘Радонь’, ‘Тантана’. По скорости изменения вязкости суспензии выделяется на минимальном уровне сорт ‘Марусенька’, формируя высоконатурное, наиболее округлое зерно, с наименьшей массой фракции зерна (г) менее 2,2 × 20,0 мм в 100 г. В среднем сорта характеризуются более высокой скоростью нарастания вязкости в течение первых 10 минут эксперимента, в последующем скорость снижается в 1,7–1,8 раза.

Для комплексного изучения показателей качества зерна в их взаимосвязи с фракционным составом зерна был проведен расчет коэффициентов корреляции и детерминации между признаками на генотипическом уровне, с учетом сортов и полевых повторностей (табл. 4). На межсортовом уровне достоверной корреляции между содержанием белка, а также числом падения и фракционным составом зерна не наблюдалось, что и было прогнозируемо, так как содержание белка зависит от поступления макроэлемента азота и его перераспределения в органах растения под влиянием складывающихся температурных условий июня (Derevyanko, 1989). Показатель «число падения» зависит от качества и количества крахмала и особенно от активности фермента *α*-амилазы. Отмечается значимая средняя корреляция по повторностям r_g = 0,50**–0,62** между показателями высоты амилограммы; коэффициент детерминации, отражающий долю изменений (%), которые в данном показателе зависят от фактора «масса мелкой фракции зерна», составил 25–38%. Эти данные согласуются с исследованиями А. А. Гончаренко (Goncharenko, 2014). Выявлена средняя и сильная взаимосвязь массы 1000 зерен и фракционного состава зерна. Данные показатели в отдельные годы могут взаимоопределяться на 86%. Взаимосвязь с натурной массой более стабильна по годам. Наиболее сильная и значимая – это зависимость показателей, отражающих реологические свойства суспензии шрота и фракционного состава зерна сортов, который в 2021, 2022 г на 83–67% в среднем определяет вязкость суспензии в течение эксперимента, а также на 69–58% определяет скорость нарастания вязкости. Полученные результаты согласуются с данными канадских исследователей (Gan et al., 1997), которые рекомендуют обращать внимание при отборе генотипов по вязкости на отношение массы зерновки к ее ширине.

Таблица 3. Количественная выраженность показателей, характеризующих реологические свойства водных суспензий на основе ржаного шрота, и значимость их различий в зависимости от генотипа сорта

Table 3. Quantitative expression of indicators characterizing rheological properties of meal/water slurries based on rye flour, and the significance of their differences depending on the cultivar's genotype

Сорт / Cultivar	Показатели реограммы вискографа, е. в. / Viscograph rheogram values, v. u.						Скорость изменения вязкости, е. в./мин / Viscosity change rate, v. u./min			
	2021 г.			2022 г.			2021 г.		2022 г.	
	BC_0 VS_0	BC_{10} VS_{10}	BC_{30} VS_{30}	BC_0 VS_0	BC_{10} VS_{10}	BC_{30} VS_{30}	$\overline{V}_{10}$	$\overline{V}_{30}$	$\overline{V}_{10}$	$\overline{V}_{30}$
Марусенька / Marusenka	75	105	140	100	115	200	3,0	2,2	2,0	3,3
Саратовская 7 / Saratovskaya 7	85	140	175	130	185	220	5,5	3,0	5,5	3,0
Саратовская 10 / Saratovskaya 10	90	120	150	130	180	230	3,0	2,0	5,0	3,3
Радонь / Radon	100	210	270	140	230	295	11,0	5,7	9,0	5,2
Тантана / Tantana	115	220	280	200	290	395	10,5	5,5	9,0	6,7
Подарок / Podarok	120	205	260	170	245	340	8,5	4,7	7,5	5,6
Рушник / Rushnik	160	340	455	150	245	330	18,0	9,8	9,5	6,0
Фаленская 4 / Falenskaya 4	215	360	460	195	385	515	14,5	8,2	19,0	10,6
Флора / Flora	210	315	390	215	435	550	10,5	6,0	22,0	11,2
Румба / Rumba	160	320	395	210	360	490	16,0	7,8	15,0	12,3
Графиня / Grafinya	170	293	380	205	360	475	12,3	7,0	15,5	7,3
Чулпан 7 / Chulpan 7	125	230	303	125	275	375	10,5	5,9	15,0	6,6
Таловская 41 / Talovskaya 41	120	190	250	165	280	355	7,0	4,3	11,5	6,3
Таловская 44 / Talovskaya 44	110	175	215	120	235	310	6,5	3,5	11,5	6,0
Таловская 45 / Talovskaya 45	110	175	230	130	240	305	6,5	4,0	11,0	5,8
Безенчукская 110 / Bezenchukskaya 110	90	120	150	140	200	265	6,5	4,5	6,0	4,2
Безенчукская 87 / Bezenchukskaya 87	100	155	215	120	175	220	5,5	3,8	5,5	3,3
Роксана / Roksana	160	270	330	155	275	360	11,0	5,7	12,0	6,8
Антарес / Antares	95	145	200	145	220	290	5,0	3,5	7,5	4,8
Презент / Prezent	115	215	290	130	235	315	10,0	5,9	10,5	6,3
Офелия / Ofeliya	115	220	285	165	270	330	10,5	5,7	10,5	5,5
Голубка / Golubka	110	210	285	145	250	335	10,0	5,9	10,5	6,3
Паулинка / Paulinka	135	245	315	150	225	315	11,0	6,0	7,5	5,6
Валдай / Valday	90	155	220	130	220	285	7,5	4,3	9,0	5,2
Альфа / Alfa	105	205	260	140	230	300	10,0	5,2	9,0	5,3
Татьяна / Tatyana	115	200	260	145	265	365	8,5	4,9	12,0	6,5
Московская 12 / Moskovskaya 12	100	195	260	160	275	360	9,5	5,4	12,0	6,6

Таблица 3. Окончание
Table 3. The end

Сорт / Cultivar	Показатели реограммы вискографа, е. в. / Viscograph rheogram values, v. u.						Скорость изменения вязкости, е. в./мин / Viscosity change rate, v. u./min			
	2021 г.			2022 г.			2021 г.		2022 г.	
	BC_0 VS_0	BC_{10} VS_{10}	BC_{30} VS_{30}	BC_0 VS_0	BC_{10} VS_{10}	BC_{30} VS_{30}	$\overline{V}_{10}$	$\overline{V}_{30}$	$\overline{V}_{10}$	$\overline{V}_{30}$
Немчиновский 1 / Nemchinovsky 1	120	215	275	145	260	355	9,5	5,2	11,5	7,0
F	4,5*	13,9*	16,4*	3,3*	5,0*	5,3*	8,1*	4,3*	4,2*	3,4*
$НСР_{05}$, $НСР_{05}$	48	51	60	48	84	107	3,7	2,9	5,7	3,3

Примечание: BC_0 – вязкость суспензии при температуре 20°С в единицах вискографа (е. в.); BC_{10}, BC_{30} – вязкость суспензии после 10 и 30 минут эксперимента в единицах вискографа (е. в.); $НСР_{05}$ – наименьшая существенная разница

Note: VS_0 is the viscosity of the slurry at 20°C in viscograph units (v. u.); VS_{10}, VS_{30} is the viscosity of the slurry after 10 and 30 minutes of the experiment in viscograph units (v. u.); $НСР_{05}$ is the least significant difference

Таблица 4. Взаимосвязь показателей качества зерна с его фракционным составом
Table 4. Relationship between grain quality indicators and the fractional composition of grain

Показатель качества Quality indicator	Масса фракции зерна (г) менее 2,2 × 20,0 мм в 100 г Grain fraction weight (g) less than 2.2 × 20.0 mm per 100 g			
	Коэффициент корреляции, r_g Correlation coefficient, r_g		Коэффициент детерминации, d_{yx} Determination coefficient, d_{yx}	
	2021 г.	2022 г.	2021 г.	2022 г.
Натурная масса зерна, г/л / Grain test weight, g/L	–0,67**	–0,68**	0,45	0,46
Масса 1000 зерен, г /1000 grain weight, g	–-0,58**	–0,93**	0,34	0,86
Содержание белка, % Protein content, %	0,19	–0,31	0,04	0,1
Число падения, с / Falling number, sec	0,30	0,33	0,09	0,1
Высота амилограммы, е. а. / Amylogram height, a. u.	0,50**	0,62**	0,25	0,38
Показатели реологических свойств суспензий шрот / вода / Indicators of rheological properties of the meal/water slurry				
BC_0, е. в. / VS_0	0,91**	0,68**	0,83	0,46
BC_{10}, е. в. / VS_{10}	0,91**	0,88**	0,83	0,77
BC_{30}, е. в. / VS_{30}	0,91**	0,89**	0,83	0,79
е. в./мин / v. u./min	0,78**	0,78**	0,61	0,61
е. в./мин / v. u./min	0,88**	0,75**	0,77	0,56
Натурная масса зерна, г/л / Grain test weight, g/L				
Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	0,49**	0,68**	0,24	0,46
Высота амилограммы, е. а. / Amylogram height, a. u.				
Число падения, с / Falling number, sec	0,61**	0,59**	0,37	0,35

Примечание: ** – значимо на 1-процентном уровне

Note: ** – statistically significant at the 1% level

Выводы

В условиях Нижнего Поволжья интерес с точки зрения селекционной работы и приемлемости к выращиванию товарных партий зерна хлебопекарного назначения имеют сорта, сочетающие такие показатели, как натурная масса зерна на уровне 715 г/л, средние данные по вязкости суспензии шрота, масса фракции зерна менее 2,2 × 20,0 мм – до 30% от общей. В связи с этим хорошую перспективу в производстве имеет отечественный гибрид Немчиновский 1. Сорта 'Валдай', 'Безенчукская 87', Безенчукская 110', 'Саратовская 10', 'Саратовская 7', 'Марусенька' отличаются высоким выходом зерна (до 96%) с шириной поперечного сечения более 2,2 мм. При высоких показателях числа падения и максимальной высоты амилограммы рекомендуется применение муки из такого зерна в изготовлении формовых изделий. Сорта с низкой вязкостью водной суспензии шрота, а следовательно – низким количеством водорастворимых пентозанов применяются в производстве кормов, а с максимальной вязкостью суспензии представляют интерес для селекционных программ на повышение содержания пентозанов.

Выявлена положительная высокозначимая сопряженность между всеми пятью показателями, характеризующими реологические свойства водной суспензии шрота сортов ржи, и фракционным составом зерна на уровне 0,82*–0,91*. Содержание фракции мелкого зерна до 30% от общей массы, масса 1000 зерен в пределах 29,0–31,0 г и удлиненная форма зерновки – фенотипические признаки в пользу более высокого содержания пентозанов.

References / Литература

Boros D., Marquardt R.R., Slominski B.A., Guenter W. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosan content in rye. *Cereal Chemistry*. 1993;70(5):575-580.

Derevyanko A.N. Weather and grain quality of winter crops (Pogoda i kachestvo zerna ozimykh kultur). Leningrad; 1989. [in Russian] (Деревянко А.Н. Погода и качество зерна озимых культур. Ленинград; 1989.)

Ermolaeva T.Ya., Nuzdina N.N., Goverdov D.V., Zlobina L.N., Krupnova O.V., Osyka I.A. et al. Adaptivity of winter rye varieties on reological properties of aqueous suspensions of meal. *Russian Agricultural Sciences*. 2021;(4):27-32. [in Russian] (Ермолаева Т.Я., Нуждина Н.Н., Говердов Д.В., Злобина Л.Н., Крупнова О.В., Осыка И.Л. и др. Адаптивность сортов озимой ржи по реологическим свойствам суспензии шрота. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021;(4):27-32). DOI: 10.31857/S2500262721040062

Gan Y.T., McLeod J.G., Scoles G.J., Campbell G.L. Extract viscosity of winter rye: Variation with temperature and precipitation. *Canadian Journal of Plant Science*. 1997;77(4):555-560. DOI: 10.4141/P96-129

Goncharenko A.A. Topical issues of winter rye breeding (Aktualnye voprosy selektsii ozimoy rzhi). Moscow; 2014. [in Russian] (Гончаренко А.А. Актуальные вопросы селекции озимой ржи. Москва; 2014).

GOST 16990-2017. Interstate standard. Rye. Specifications. Moscow: Standartinform; 2019. [in Russian] (ГОСТ 16990-2017. Межгосударственный стандарт. Рожь. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019). URL: https://files.stroyinf.ru/Data/654/65485.pdf [дата обращения: 23.03.2023].

Ismagilov R.R., Gaysina A.V. The content of water soluble pentosans in rye grain different factions. *Beer and Beverages*. 2015;(3):44-46. [in Russian] (Исмагилов Р.Р., Гайсина А.Ф. Содержание водорастворимых пентозанов в зерне ржи разной фракции. *Пиво и напитки*. 2015;(3):44-46).

Kulevatova T.B., Kayrgaliev D.V., Andreeva L.V. Ermolaeva T. Ya., Zlobina L.N., Nuzdina N.N. Quality of winter rye grain. Educational and methodological guide (Kachestvo zerna ozimoy rzhi. Uchebno-metodicheskoye posobiye). A.I. Pryanishnikov (ed.). Saratov; 2016. [in Russian] (Кулеватова Т.Б., Кайргалиев Д.В., Андреева Л.В., Ермолаева Т.Я., Злобина Л.Н., Нуждина Н.Н. Качество зерна озимой ржи: Учебно-методическое пособие / под. ред. А.И. Прянишникова. Саратов; 2016).

Munzing K., Pottebaum R., Wolf K. Mutterkorn im Roggen und Konsequenzen für die Mühle. *Getreidetechnologie*. 2004;58(6):349-356. [in German]

Ponomareva M.L., Ponomarev S.N. Optimization of grain quality parameters for winter rye breeding. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(3):320-327. [in Russian] (Пономарева М.Л., Пономарев С.Н Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(3):320-327). DOI: 10.18699/vj19.496

Ponomareva M.L., Ponomarev S.N Scientific fundamentals of winter rye breeding. Monograph (Nauchnye osnovy selektsii ozimoy rzhi. Monografiya). Kazan: FEN; 2019. [in Russian] (Пономарева М.Л., Пономарев С.Н. Научные основы селекции озимой ржи: Монография. Казань: ФЭН; 2019).

Ponomareva M.L., Ponomarev S.N. Gilmullina L.F., Mannapova G.S. Phenotypic assessment of pentosane content in rye solvent cake by method of viscosity determination of water extract. *Achievements of Science and technology of AIC*. 2015;29(11):32-35. [in Russian] (Пономарева М.Л., Пономарев С.Н., Гильмуллина Л.Ф., Маннапова Г.С. Фенотипическая оценка содержания пентозанов в ржаном шроте методом определения вязкости водного экстракта. *Достижения науки и техники АПК*. 2015;29(11):32-35).

Shakirzyanov A.H., Leshchenko N.I., Nikonorova I.M., Agafonova V.A. Promising samples of winter rye for breeding for forage purposes under conditions of the south-western Cis-Urals. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2019;33(8):38-42. [in Russian] (Шакирзянов А.Х., Лещенко Н.И., Никонорова И.М., Агафонова В.А. Перспективные образцы озимой ржи для селекции кормовой ржи в условиях юго-западного Предуралья. *Достижения науки и техники АПК*. 2019;33(8):38-42). DOI: 10.24411/0235-2451-2019-10808

Информация об авторах

Надежда Николаевна Нуждина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, schirschowa@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-4706-961X

Даниил Александрович Жиганов, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, zhigdnk@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-8724-7043

Татьяна Яковлевна Ермолаева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, yaresko.tanya@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7016-6530

Татьяна Борисовна Кулеватова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, tanjakulevatova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9564-7127

Людмила Николаевна Злобина, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, L9172193438@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-3866-8060

Любовь Владимировна Андреева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, l.v.andreeva_75@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3631-1084

Валентина Николаевна Куликова, научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, Vkulikova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7192-0208

Нина Алексеевна Салманова, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, Nina-As55@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-0079-1954

Вадим Николаевич Нечаев, лаборант-исследователь, Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока, 410010 Россия, Саратов, ул. Тулайкова, 7, vadimkasteam@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7568-6972

Information about the authors

Nadezhda N. Nuzhdina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, schirschowa@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-4706-961X

Daniil A. Zhiganov, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, zhigdnk@bk.ru, https://orcid.org/0000-0002-8724-7043

Tatyana Y. Ermolaeva, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, yaresko.tanya@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-7016-6530

Tatyana B. Kulevatova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, tanjakulevatova@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-9564-7127

Liudmila N. Zlobina, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, L9172193438@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-3866-8060

Liubov V. Andreeva, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, l.v.andreeva_75@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3631-1084

Valentina N. Kulikova, Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, Vkulikova@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-7192-0208

Nina A. Salmanova, Associate Researcher, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, Nina-As55@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0004-0079-1954

Vadim N. Nechaev, Laboratory Research Assistant, Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region, 7 Tulaikova St., Saratov 410010, Russia, vadimkasteam@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-7568-6972

Вклад авторов: Нуждина Н.Н. – 15%; Жиганов Д.А. – 14%; Ермолаева Т.Я. – 14%; Кулеватова Т.Б. – 14%; Злобина Л.Н. – 14%; Андреева Л.В. – 14%; Куликова В.Н. – 5%; Салманова Н.А. – 5%; Нечаев В.Н. – 5%.
Contribution of the authors: Nuzhdina N.N. – 15%; Zhiganov D.A. – 14%; Ermolaeva T.Ya. – 14%; Kulevatova T.B. – 14%; Zlobina L.N. – 14%; Andreeva L.V. –14%; Kulikova V.N. – 5%; Salmanova N.A. – 5%; Nechaev V.N. – 5%.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.06.2023; одобрена после рецензирования 31.08.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 15.06.2023; approved after reviewing on 31.08.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 57.063.3
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-163-173

CC BY

Типификация внутривидовых таксонов *Solanum andigenum* Juz. et Buk.

Н. А. Оськина, Т. А. Гавриленко, И. Г. Чухина

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

Автор, ответственный за переписку: Ирена Георгиевна Чухина, i.chukhina@vir.nw.ru

Таксономические исследования проведены в коллекции культурных видов картофеля, хранящейся в Гербарии культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR), что позволило продолжить типификацию названий внутривидовых таксонов *Solanum andigenum* Juz. et Buk., относящихся к трем географическим группам – колумбийской, южноперуанской и боливийской. В фондах гербария представлено описанное отечественными систематиками таксономическое разнообразие культурного картофеля на основе изучения материала, собранного в Южной Америке экспедициями, организованными Н. И. Вавиловым в конце 1920-х – начале 1930-х годов. В результате проведенной верификации протологов и гербарных образцов были обнаружены гербарные листы, которые являются синтипами шести разновидностей и одиннадцати форм, а также были выбраны лектотипы для трех форм: *S. andigenum* f. *huaman-uma* Buk. et Lech., *S. andigenum* f. *lecke-umo* Buk. et Lech., *S. andigenum* f. *pacus* Lech.

Ключевые слова: таксономия, номенклатурные типы, гербарий ВИР, WIR, секция *Petota*, род *Solanum*, *Solanum andigenum* Juz. et Buk.

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации государственных заданий 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».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Оськина Н.А., Гавриленко Т.А., Чухина И.Г. Типификация внутривидовых таксонов *Solanum andigenum* Juz. et Buk. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):163-173. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-163-173

© Оськина Н.А., Гавриленко Т.А., Чухина И.Г., 2023

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-163-173

Typification of intraspecific taxa in *Solanum andigenum* Juz. et Buk.

Natalia A. Oskina, Tatjana A. Gavrilenko, Irena G. Chukhina

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

Corresponding author: Irena G. Chukhina, i.chukhina@vir.nw.ru

Taxonomic studies were carried out in the collection of cultivated potato species kept in the Herbarium of Cultivated Plants of the World, Their Wild Relatives, and Weeds (WIR). It allowed us to proceed with typifying the names of intraspecific taxa within *Solanum andigenum* Juz. et Buk., belonging to three geographical groups: Colombian, South Peruvian, and Bolivian. The WIR herbarium collections comprise the taxonomic diversity of cultivated potatoes described by Russian taxonomists and based on the study of plant materials collected in South America during the expeditions organized by N. I. Vavilov in the late 1920s – early 1930s. Verification of protologs and herbarium specimens resulted in locating herbarium sheets that appeared to be syntypes of six varieties and eleven forms. Lectotypes were also designated for the following three forms: *S. andigenum* f. *huaman-uma* Buk. et Lech., *S. andigenum* f. *lecke-umo* Buk. et Lech., *S. andigenum* f. *pacus* Lech.

Keywords: taxonomy, nomenclatural types, WIR, VIR herbarium, section *Petota*, genus *Solanum*, *Solanum andigenum* Juz. et Buk.

Acknowledgements: the research was carried out within the framework of the state tasks assigned to the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (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 genetic diversity”.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Oskina N.A., Gavrilenko T.A., Chukhina I.G. Typification of intraspecific taxa in *Solanum andigenum* Juz. et Buk. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):163-173. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-163-173

Введение

Обширная коллекция образцов культурного картофеля и его диких родичей была собрана в ВИР (в настоящее время – Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова) благодаря экспедиционным обследованиям стран Южной и Центральной Америки, проведенным в разное время отечественными учеными: С. В. Юзепчуком (1925–1928 гг.) (Juzepczuk, 1928; Juzepczuk, Bukasov, 1929); С. М. Букасовым (1925–1926 гг.) (Bukasov, 1930, 1933); Н. И. Вавиловым (1930, 1932–1933 гг.) (Vavilov, 1931, 1939; Sizonenko, 1987); П. М. Жуковским (1955, 1958 г.) (Gorbatenko, 2006); А. Г. Зыкиным (1967, 1971, 1980 г.) (Zykin, 1971, 1973; Gorbatenko, 2006); Л. Е. Горбатенко (1973–1976, 1983, 1987–1990 гг.) (Gorbatenko, 2006).

В результате гербаризации растений, выращенных из семян и клубней, собранных во время экспедиций, а также их последующей репродукции была сформирована коллекция гербарных образцов видов секции *Petota* Dumort. рода *Solanum* L., большая часть которой хранится в Гербарии культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR); часть этой коллекции сохраняется также в Гербарии Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (БИН РАН, LE).

Наиболее ценную часть этой коллекции составляют образцы, собранные в Южной Америке в конце 1920-х – начале 1930-х годов, на основе которых были описаны новые таксоны и впервые предложена система группы культурных видов картофеля, включающая 12 андийских и один чилийский культурный вид – *S. tuberosum* s. str. (Juzepczuk, Bukasov, 1929), а также впервые были сформулированы гипотезы об их происхождении (Juzepczuk, Bukasov, 1929; Juzepczuk, 1937; Bukasov, 1939). Позднее С. М. Букасов расширил таксономический состав этой группы до 17 культурных видов (Bukasov, 1978).

Из всех культурных видов картофеля, *Solanum andigenum* Juz. et Buk. (syn. *Solanum tuberosum* ssp. *andigena* (Juz. et Bukasov) Hawkes) занимает наибольший ареал – возделывается местным населением от Центральной Америки до северной Аргентины (Lekhnovich, 1971, 1978; Spooner et al., 2010). В результате экспедиционных сборов, проведенных отечественными учеными в Мексике, Гватемале, Эквадоре, Колумбии, Перу, Боливии и Аргентине, в ВИР было доставлено более 1000 образцов *S. andigenum* (Bukasov, 1930, 1933; Lekhnovich, 1971, 1978).

Всестороннее изучение собранных образцов в ВИР, преимущественно на полях Павловской опытной станции «Красный пахарь» в окрестностях Ленинграда, позволило С. М. Букасову описать большое количество внутривидовых таксонов *S. andigenum* Juz. et Buk. (Bukasov, 1930, 1933).

Всего С. М. Букасовым были законно обнародованы: 1 подвид (еще два были намечены), 21 разновидность и 43 формы *S. andigenum* (Bukasov, 1930, 1933). При обнародовании первоописаний новых таксонов С. М. Букасов чаще всего ссылался на несколько изученных образцов, цитируя их экспедиционные номера, указывая места их возделывания и варианты туземных названий, но не указывал типовой образец.

В 1971 г. В. С. Лехнович предпринял попытку пересмотреть внутривидовую систему культурных видов картофеля С. М. Букасова (Bukasov, 1930, 1933), описав сотни внутривидовых таксонов различного ранга (Lekhnovich, 1971). К сожалению, большинство наименований таксонов, принимаемых В. С. Лехновичем, являются невалидными, так как выбраны с нарушением правил Международного кодекса ботанической номенклатуры (в настоящее время – Международный кодекс номенклатуры грибов, водорослей и растений). Позднее В. С. Лехновичем были валидизированы 6 подвидов и 15 разновидностей *S. andigenum* (Lekhnovich, 1983).

В гербарных фондах Гербария культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR) осуществляется номенклатурно-таксономическая инвентаризация аутентичных образцов, на основе которых были описаны новые таксоны, и ведется работа по лектотипификации названий таксонов, если их авторами не были назначены голотипы. В результате изучения гербарных коллекций культурного картофеля и его диких родичей были выбраны и опубликованы типовые образцы для таксонов различного ранга (Korovina, 1985; Chernomorskaya, 1991; Ovchinnikova et al., 2011, 2012; Chukhina et al., 2016a, 2016b, 2017).

В коллекции аутентичных гербарных образцов С. В. Юзепчука, С. М. Букасова, В. С. Лехновича, хранящейся в гербарии, наибольшее число гербарных листов относится к *S. andigenum*. Из этой коллекции были выделены и помещены в типовой фонд 17 голотипов, 2 изотипа, 42 лектотипа, 7 изолектотипов, 1 синтип, 1 изосинтип. Однако эта обширная коллекция еще до конца не изучена, работы по номенклатурно-таксономической инвентаризации и лектотипификации продолжаются и в настоящее время.

В последнее время аутентичные образцы культурных видов картофеля, включая типовые, активно вовлекаются в молекулярно-генетические исследования (Ames, Spooner, 2008; Gutaker et al., 2019; Gavrilenko et al., 2023). Углубление исследований генетического разнообразия андийской группы культурного картофеля потребовало расширения экспериментальной выборки и проведения дополнительной ревизии аутентичных образцов *S. andigenum*, хранящихся в гербарии.

Вновь выявленные номенклатурные типы внутривидовых таксонов *S. andigenum*, публикуемые в настоящей статье, распределены по трем географическим группам – колумбийской, южноперуанской, боливийской – в соответствии с системой С. М. Букасова (Bukasov, 1933). Внутри групп разновидности и формы расположены в алфавитном порядке. Тексты этикеток типовых образцов и протологов приводятся в подлинном написании, но с учетом современной орфографии. Информация, указанная на гербарной этикетке, перечисляется в следующем порядке: экспедиционный номер «N…»; туземное название в двойных кавычках; сведения о географии, включая место репродукции; полевой номер посева «№…», дата в унифицированном виде; коллектор(ы); гербарный номер образца «WIR-…». Уточняющая информация (опечатки в географических названиях и в наименованиях туземных картофелей) и/или важная информация, отсутствующая в текстах этикеток, приведена в квадратных скобках.

Мы считаем возможным также привести указанные на гербарных листах определения внутривидовых таксонов, данные В. С. Лехновичем, в соответствии с предложенной им внутривидовой системой 1971 года (Lekhnovich, 1971), принимая во внимание полувековой опыт изучения им коллекции *S. andigenum* ВИР. При этом отметим, что внутривидовые таксоны *S. andigenum*, принимаемые В. С. Лехновичем (Lekhnovich, 1971), являются невалидными, поскольку были опубликованы без диагнозов на латинском языке (Art. 39.1), без указаний типов (Art. 40.1), а при изменении ранга таксонов, ранее описанных

С. М. Букасовым, не дана полная и прямая ссылка на его автора и место действительной публикации со страницей (Art. 41.5) (Turland et al., 2018). На авторских гербарных листах С. М. Букасова 1928–1931 гг., цитируемых в настоящей статье, указаны невалидные названия внутривидовых таксонов.

Solanum andigenum Juz. et Buk. ssp. *australiperuvianum* convar. *adpressipilosum* var. *ckehuillo* Lechn. 1971, Flora of cultivated plants. IX:194. Без латинского описания (Art.39.1), без указания типа (Art. 40.1).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *curtibaccatum* var. *uncuna* (Buk. et Lechn.) Lechn. 1971, ibidem:165. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *uncuna* Buk. et Lechn. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *longiacuminatum* var. *alcay huarmi* (Buk. et Lechn.) Lechn. 1971, ibidem:179. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *alccai-huarmi* Buk. et Lechn. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *longiacuminatum* var. *sunchchu* (Buk. et Lechn.) Lechn. 1971, ibidem:180. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *sunchchu* Buk. et Lechn. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *longiacuminatum* var. *poroyense* Lechn. 1971, ibidem:178. Без латинского описания (Art. 39.1), без указания типа (Art. 40.1).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *microstigmstum* var. *llutuc runtun* (Buk. et Lechn.) Lechn. 1971, ibidem:175. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *llutuc-runtun* Buk. et Lechn. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *microstigmstum* var. *huairuru* (Buk. et Lechn.) Lechn. 1971, ibidem:176. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *huairuru* Buk. et Lechn. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *ortotrichon* var. *ccoec compadre* Lechn. 1971, ibidem:155. Без латинского описания (Art.39.1), без указания типа (Art. 40.1).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *ortotrichon* var. *cuzcoense* f. *viride* Lechn. 1971, ibidem:152. Без латинского описания (Art.39.1), без указания типа (Art. 40.1).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *ortotrichon* var. *ppaqui* (Buk. et Lechn.) Lechn. 1971, ibidem:157. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *ppaqui* Buk. et Lechn. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *titicacense* var. *chiar-imilla* f. *imilla* Lechn. 1971, ibidem:186. Без латинского описания (Art.39.1), без указания типа (Art. 40.1).

S. andigenum ssp. *australiperuvianum* convar. *titicacense* var. *huaman-uma* (Buk. et Lechn.) Lechn. 1971, ibidem:184. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *huaman-uma* Buk. et Lechn. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *columbianum* var. *caiceda* f. *viridulm* Lechn. 1971, ibidem:88. Без латинского описания (Art.39.1), без указания типа (Art. 40.1).

S. andigenum ssp. *columbianum* var. *funzanum* (Buk.) Lechn. 1971, ibidem:89. Без латинского описания (Art.39.1), без указания типа (Art. 40.1).

S. andigenum ssp. *columbianum* var. *lilacinoflorum* (Buk.) Lechn. 1971, ibidem:94. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *lilacinoflorum* Buk. (Bukasov, 1933) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *columbianum* var. *lizaraza* (Buk.) Lechn. 1971, ibidem:88. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *lisarassa* Buk. (Bukasov, 1930) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

S. andigenum ssp. *columbianum* var. *tocanum* (Buk.) Lechn. 1971, ibidem:92. Не дана полная и прямая ссылка на автора базионима f. *tocanum* Buk. (Bukasov, 1930) и место его действительной публикации со страницей (Art. 41.5).

Результаты

В результате проведенной нами верификации протологов и гербарных образцов были обнаружены гербарные листы, которые являются синтипами шести разновидностей и одиннадцати форм, а также были выбраны лектотипы для трех форм: *S. andigenum* f. *huaman-uma* Buk. et Lech., *S. andigenum* f. *lecke-umo* Buk. et Lech., *S. andigenum* f. *pacus* Lech.

Номенклатурные типы внутривидовых таксонов *S. andigenum* Juz. et Buk. колумбийской группы

***Solanum andigenum* Juz. et Buk. f. *caiceda* Buk.** 1930, Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant-Breeding, Suppl. 47:208.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2012): «Colombia, Cundinamarca, Chipaque; репродукция близ Ленинграда 1929, S. Bukasov, N 49в, полевой № 4039, WIR-38498».

Syntypus: «N 24, Colombia, [Boyaca,] Cienada [Cienaga]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4031-24, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38450и».

Syntypus: «N 25, Colombia, [Boyaca,] Cienada [Cienaga]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4032-25, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38497б».

Syntypus: «N 26a, Colombia, [Boyaca,] Cienada [Cienaga]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4033, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38500в».

Syntypus: «N 34, Colombia, [Boyaca,] Viracacha. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4155, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38346».

Syntypus: «N 36d, Colombia, Bogota. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4036, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38356».

Syntypus: «N 60, "Paramuna", Colombia, [Bogota,] Facatativa. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4133, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38408».

Syntypus: «N 70a, "Tuquer[r]ena", Colombia, [Bogota,] Fagua. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4045/70aI, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38351».

Syntypus: «N 71, "Tuquer[r]ena", Colombia, [Bogota,] Fagua. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4135, 1928, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38410г».

Syntypus: «N 72a, Colombia, [Bogota,] Fagua. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4048, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38347».

Syntypus: «N 78a, "Caiceda", Colombia, [Antioquia,] Abejorral. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4164, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38336».

Syntypus: «N 80, Colombia, [Antioquia,] Medellin. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4056, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38348т».

Syntypus: «N 81a, Colombia, [Antioquia,] Medellin. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4057/81a, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38349».

Syntypus: «N 86, Colombia, [Caldas,] Termales. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4059/86, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38662».

Syntypus: «N 93, "Tuquer[r]ena", Colombia, [Tolima], Ibague. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4068, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38236г».

Syntypus: «N 100, Colombia, [Cauca,] Popayan. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4073-100, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38446к».

Syntypus: «N 101, Colombia, [Cauca,] Popayan. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4074-101, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38442е».

Syntypus: «N 108, Colombia, [Cauca,] Popayan. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4078/108, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38229».

По протологу: «Деп. Boyaca: Cienaga близ Tunja; деп. Cundinamarca, в окрестностях Боготы: Fontibon, Fagua, Chipaque, Facatativa, Dintel; деп. Tolima: Ibague; деп. Caldas: Termales; деп. Antioquia: Medellin, Santa Helena; деп. Cauca: Popayan. Образцы №№ 22, 24, 25, 26a, 28a, 34, 36д, 38a, 41авс, 49в, 54д, 45д, 58, 60, 70a, 71, 72a, 78a, 79, 80, 81a, 82, 85в, 86, 91, 92, 93, 95, 96, 100, 101, 102, 103, 104, 108, 109. Название Caiceda… Tuquerrena… Paramuna… Argentina…».

Примечание: На гербарных листах WIR-38229, WIR-38236г, WIR-38336, WIR-38346, WIR-38347, WIR-38348т, WIR-38349, WIR-38351, WIR-38356, WIR-38442е, WIR-38446к, WIR-38450и, WIR-38497б, WIR-38500в, WIR-38662, есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *columbianum* var. *caiceda* f. *viridulm* Lechn. На гербарных листах WIR-38408 и WIR-38410г определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *columbianum* var. *funzanum* (Buk.) Lechn.

***S. andigenum* f. *lilacinoflorum* Buk.** 1933, Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant-Breeding, Suppl. 58:38.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Colombia, Chipaque; репродукция близ Ленинграда, 1929, S. Bukasov, N 57a, полевой № 4106, WIR-38390».

Syntypus: «N 50c, Colombia, [Bogota,] Chipaque. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4105, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38389д».

Syntypus: «N 74a, "Pana", Colombia, [Bogota,] Fontibon. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4107, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38396».

По протологу: «Bogota (№ 42), Chipaque (№ 48, 50c, 57a) и Fontibon (№ 74a)».

Примечание: На гербарных листах WIR-38389д и WIR-38396 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *columbianum* var. *lilacinoflorum* (Buk.) Lechn.

***S. andigenum* f. *lisarassa* Buk.** 1930, Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant-Breeding, Suppl. 47:209.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Colombia, Bogota, под названием "Lisarasa"; репродукция близ Ленинграда, 1929, S. Bukasov, S. Juzepczuk, N 35, полевой № 4083, WIR-1449».

Syntypus: «N 36, "Lisarasa", Colombia, Bogota. [полевой] № 8265, 1928, Собр.: С. Букасов, Опр.: С. Юзепчук, С. Букасов, WIR-38404г».

Syntypus: «№ 53, Colombia, [Bogota,] Chipaque. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4089(8268), 1929, собр.: С. Букасов, опр.: С. Юзепчук, С. Букасов, WIR-38405».

Syntypus: «N 54, Colombia, [Bogota,] Chipaque. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4090(8269), 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38424».

По протологу: «Возделывается в Колумбии в окрестностях Боготы, в частности в Chipaque. Образцы №№ 35, 36, 37, 51, 53, 54, 56».

Примечание: На гербарном листе WIR-38404г, WIR-38405, WIR-38424 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *columbianum* var. *lizaraza* (Buk.) Lechn.

***S. andigenum* f. *tocanum* Buk.** 1930, ibidem: 205.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011) et isolectotypus: «Colombia, Cundinamarca, Bogota; репродукция близ Ленинграда, 1930, S. Bukasov, N 44, WIR-38416».

Syntypus: «N 42a, "Tocana", Colombia, Bogota. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4102, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38397».

Syntypus: «N 49a, Colombia, [Bogota,] Chipaque. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4097, 1928, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38385в».

Syntypus: «N 106, Colombia, [Cauca,] Papayan [Popayon]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4100/106abc, 1929, leg.: S. Bukasov, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38388р».

По протологу: «Возделывается в Колумбии, преимущественно на боготианском плоскогорье, деп. Cundinamaraca в окрестностях Bogota: Chipaque, Fontibon и др. (№№ 38, 41a, 42a, 44, 49a, 57, 76), единично в Popayan (№ 106). Название Tocana… De la seja…».

Примечание: На гербарном листе WIR-38397 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *columbianum* var. *lilacinoflorum* (Buk.) Lechn. На гербарных листах WIR-38385в и WIR-38388р есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *columbianum* var. *tocanum* (Buk.) Lechn.

Номенклатурные типы внутривидовых таксонов *S. andigenum* Juz. et Buk. южноперуанской группы

***S. andigenum* var. *ckello-huaccoto* Buk. et Lech.** 1933, Bulletin of Applied Botany, Genetics and Plant-Breeding, Suppl. 58:53.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011) et isolectotypus: «Peru, Cusco, Yuncai-pampa, под названием "Ckello Huaccotto"; репродукция близ Ленинграда, 1929, S. Juzpeczuk, S. Bukasov, N 1228, полевой № 4894/3324, WIR-39571».

Syntypus: «N1071, "Yurac-ccompis", Peru, [Urubamba,] Obontaytambo [Ollantaytambo]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4575/3434, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-0097745».

Syntypus: «N 996(8463), "Huaccotto", Peru, Cusco, Ppisacc. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4458/3413, 1928, собр.: S. Juzepczuk, опр.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38148».

Syntypus: «N 1050, "Huaccotto", Peru, Urubamba, Rayancancha. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4558/3287, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-39558».

Syntypus: «N 1072в, "Yurac nahui ccompis", Peru, [Urubamba,] Obontaytambo [Ollantaytambo]. Репродукция близ

Ленинграда, [полевой] № 4576/3435, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38212».

Syntypus: «N 1142(8461), "Ckello-huaccotto", Peru, Cusco, Paucartambo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4367/3303, 1928, собр.: S. Juzepczuk, опр.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38138».

Syntypus: «N 1266(8462), "Ckello-huaccotto", Peru, Cusco, Puquiura. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4378/3317, 1928, собр.: S. Juzepczuk, опр.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38144».

Syntypus: «N 1304(8465), "Ckello huaccotto", Peru, Cusco, Tampu machai. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4517/3510, 1928, собр.: S. Juzepczuk, опр.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38167».

Syntypus: «N 1304a, "Ckello huaccotto", Peru, Cusco, Tampu machai. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4519/3512, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-39577».

Syntypus: «N 1336(8464), "Ckello-huaccotto", Peru, Cusco, Pata-pata. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4477/3956, 1928, собр.: S. Juzepczuk, опр.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38156».

По протологу: «Возделывается в деп. Cuzco: Yuncaipampa (Юзепчук № 1228), Tampu-machai (Юзепчук № 1304 и 1304a), Paucartambo (Юз. № 1142, 1130), Puquiura (Юз. № 1266), Ppisacc (Юз. 996), Ckeccayoc (Юз. № 1336); в районе Urubamba: Rayancancha (Юз. № 1050), Ollantaytambo (Юз. № 1071, 1072в); в районе Acomayo: Pomacanchi (Юз. № 1254). Туземные названия: ckello-huaccoto, huaccoto, yurac (белый) ccompis».

Примечание: На гербарных листах WIR-38138, WIR-38144, WIR-38148, WIR-38156, WIR-38167, WIR-39558, WIR-39577, есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *titicacense* var. *ckello huaccotto* Buk. et Lech. На гербарном листе WIR-0097745 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.*: S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *longiacuminatum* var. *alcay huarmi* (Buk. et Lechn.) Lechn.

***S. andigenum* var. *cuzcoense* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:59.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Cusco, Paucartambo, репродукция близ Ленинграда, 1929, S. Juzepczuk, N 1348, полевой № 4355/3291, WIR-37225».

Syntypus: «N 1259в, "Chicchina", Peru, Cusco, Sihua. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4372/3311, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37645».

Syntypus: «N 1276, "Ocke trompos", Peru, Cusco, Iana [Yana] machai. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4495/3486, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37684».

Syntypus: «N 1328, "Ocke-sale", Peru, Cusco, Paucartambo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4356/3291, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37633».

По протологу: «Возделывается чаще всего под названием Tumbo в деп. Cuzco: в Paucartambo (Юз. № 1328, туземное название ocke sale, 1348, назв. Miquilla de saucant), Patabamba (Юз. «1252, 1252в), Ckeccayoc (Юз. № 1334, 1361в), Yana machai (Юз. № 1276), Sihua (Юз. 1259в); Rayancancha бл. Ollantaytambo (Юз. 1053)».

Примечание: На гербарных листах WIR-37633, WIR-37645, WIR-37684 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *ortotrichon* var. *cuzcoense* f. *viride* Lechn.

***S. andigenum* var. *herrerae* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:60.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Cusco, Yana Machay; репродукция близ Ленинграда, 1928, S. Juzepczuk, N 1283, WIR-37793».

Syntypus: «N 827, "Yana macctachy", Peru, Cusco, Paucartambo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4350/3289, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37780».

Syntypus: «N 1048, "Berundus", Peru, [Urubamba], Obontaytambo [Ollantaytambo]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4591/3422, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37763».

Syntypus: «N 1058, "Berundus", Peru, Urubamba, Rayancancha. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4566/3423, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37752».

Syntypus: «N 1079, Peru, [Urubamba], Obontaytambo [Ollantaytambo]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4582/3437, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37757».

Syntypus: «N 1136, "Ccusi", Peru, Cusco, Paucartambo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4358/3298, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37812».

Syntypus: «N 1235, "Ccomarancho", Peru, Cusco, Ccasa cunca. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4434/3393, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37801».

Syntypus: «N 1258, "Ocke-lomo", Peru, Cusco, Sihua. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4369/3309, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-0097771».

Syntypus: «N 1361, "Berunaus", Peru, Cusco, Pata-pata. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4474/3454, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37743».

По протологу: «Возделывается в департаменте Cuzco: Ccasa cunca (Юзепчук № 1235), Omasbamba (Юз. № 1255), Sihua (Юз. № 1258), Yana machai (Юз. № 1280, 1283), Ckeccayoc (Юз. № 1361), Cachimayo (Юз. № 1403), Patabamba (Юз. № 1406); в районе Urubamba: Ollantaytambo (Юз. № 1048, 1079), Rayancancha (Юз. № 1058), в Paucartambo (Юз. № 827, 1136). … под названием Beruntun или Berundus, реже Ocke-lomo, Ocke suittu, Yana lomo, Ccomarancho, Yana suittu, Yurac nahui, Yana macctachy, Ccusi».

Примечание: На гербарных листах WIR-37743, WIR-37752, WIR-37757, WIR-37763, WIR-37780, WIR-37801, WIR-37812, WIR-0097771 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *ortotrichon* var. *herrerae* Buk. et Lechn. На одной из рабочих этикеток у образца WIR-37752 указан другой номер (лист от другого растения), на 7 других этикетах номер верный.

***S. andigenum* var. *huairuru* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:57.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Cusco, Yuncaypampa; репродукция близ Ленинграда, 1928, S. Juzepczuk, S. Bukasov, N 1231, WIR-37376 ».

Syntypus: «N 994, "Alcca huiruru", Peru, Cusco, Ppisacc. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4457/3412, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37350».

Syntypus: «N 1305, "Huairuru", Peru, Cusco, Tampu machai. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4510/

3502, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-0097757».

Syntypus: «N 1247, "Huairuru", Peru, [Cusco], Ccorau [Ccoran]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4401/3334, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-0097755».

Syntypus: «N 1229, "Ppalca huairuru", Peru, Cusco, Huaypum. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4390/3330, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-0097754».

По протологу: «Возделывается в деп. Cuzco: Ppisacc (Юз. № 994), Yuncai-pampa (Юз. № 1231), Ccoran (Юз. № 12471) [вероятно опечатка, действительный № 1247], Tampu-machai (Юз. №№ 1298, 1305), Huaypun (Юз. 1229, 1045). Туземные названия: alcca huiruru, huairuru, ppalca-huairuru, ppalta papa».

Примечание: На гербарных листах WIR-37350, WIR-0097754, WIR-0097755, WIR-0097757 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *microstigmstum* var. *huairuru* (Buk. et Lechn.) Lechn.

***S. andigenum* var. *sihuanum* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:58.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011) et isolectotypi (2): «Peru, Cusco, Omasbamba; репродукция близ Ленинграда, 30 VII 1929, S. Juzepczuk, N 1256, WIR-37027».

Syntypus: «N 1241, "Huacacc-caillon", Peru, Cusco, Ccumara. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4433, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37023».

Syntypus: «N 1261, "Ppispinco", Peru, Cusco, Sihua. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4374/3313, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37042».

Syntypus: «N 1468, Перу, Cuzco, Paucartambo. Репродукция близ Ленинграда, 1928, собр.: С. Юзепчук, опр.: В. Лехнович (1971), WIR-37052».

По протологу: «Возделывается в деп. Cuzco: Ccumara (Юзепчук № 1241), Sihua (Юз. №№ 1260, 1261), Omasbamba (Юз. № 1256), Chinchero (Юз. № 1418), Paucartambo (Юз. №№ 1468, 1261). Туземные названия: huacacc-caillon, ppispinco, huamara…».

Примечание: На гербарных листах WIR-37023, WIR-37042, WIR-37052 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *adpressipilosum* var. *sihuanum* Buk. et Lechn.

***S. andigenum* f. *allccai-huarmi* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:54.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Cusco, Ccorau; репродукция близ Ленинграда, 25 IX 1928, S. Juzepczuk, N 1390, WIR-37218».

Syntypus: «N 1347, "Alccai-huarmi", Peru, Cusco, Paucartambo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4365/3305I, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37228».

По протологу: «Возделываются в деп. Cuzco: Paucartambo (Юзепчук № 1135, 1347, 1348), Ccoran (Юз. 1390). Туземные названия преимущественно alccai-huarmi ("пестрая")…».

Примечание: На гербарном листе WIR-37228 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *longiacuminatum* var. *alcay huarmi* (Buk. et Lechn.) Lechn.

***S. andigenum* f. *chimaco* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:58.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Cusco, Urubamba, Ollantaytambo; репродукция близ Ленинграда, 9 IX 1931, S. Juzepczuk, N 1064, WIR-70171 (37468)».

Syntypus: «N 1186(8700), Перу, Cusco, Acomayo, Pomacanchi. Репродукция близ Ленинграда, 1929, собр.: С. Юзепчук, опр.: В. Лехнович (1971), WIR-37071».

По протологу: «Возделывается в районе Urubamba: Ollantaytambo (Юзепчук № 1064) и в районе Acomayo: Pomacanchi (Юз. № 1186). Туземные названия: chimaco, ckehuillo».

Примечание: На гербарном листе WIR-37071 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *adpressipilosum* var. *ckehuillo* Lechn.

***S. andigenum* f. *huaman-uma* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:54.

Lectotypus (hic designates): «N 1399, "Huaman uma", Peru, Cusco, Cachmayo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4442/3400, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38177».

По протологу: «1136 туземное название "Chechecchepfuru" (серое перо), 1399 Huaman-uma (голова сокола)».

Примечание: На гербарном листе WIR-38177 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *titicacense* var. *huaman uma* (Buk. et Lechn.) Lechn.

***S. andigenum* f. *lecke-umo* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:61.

Lectotypus (hic designates): «N 1307, "Lecke-uma", Peru, Cusco, Paucartambo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4366/3306, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37594».

Syntypus: «N 1415, "Yana-ama", Peru, [Cusco], Ccorau [Coran]. Репродукция близ Ленинграда, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37602».

По протологу: «Возделывается в деп. Cuzco, Ccoran (Юз. № 1415), Paucartambo (Юз. № 1307). Туземные названия: Yana-ama, Lecke-uma».

Примечание: На гербарных листах WIR-37594 и WIR-37602 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *ortotrichon* var. *ccoec compadre* Lechn.

***S. andigenum* f. *llutuc-runtun* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:60.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Cusco, Acomayo, Pomacanchi; репродукция близ Ленинграда, 1931, S. Juzepczuk, S. Bukasov, N 1249, WIR-37401».

Syntypus: «N 1185, "Llutuc runtun", Peru, Acomayo, Pomacanchi. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4553/3380, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37384».

Syntypus: «N 1358, 'Llutuc-runtun", Peru, Acomayo, Pomacanchi. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4557/3441, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-0070292».

Syntypus: «N 1173, "Перу, Cuzco, Acomayo, Pomacanchi. Репродукция близ Ленинграда, 1928, Собр.: С. Юзепчук, С. Букасов, Опр.: В. Лехнович, 1971 г., WIR-37394».

По протологу: «Юзеп. №№ 1173, 1185, 1249, 1358 из Cuzco, Ccoran п. назв. Llutuc-runtun, Jackotalega».

Примечание: На гербарных листах WIR-37384, WIR-37394, WIR-0070292 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *microstigmstum* var. *llutuc runtun* (Buk. et Lechn.) Lechn.

***S. andigenum* f. *pacus* Lech.** 1933, ibidem:57.

Lectotypus (hic designates): «N 1177 (8535), Перу, Cusco, Acomayo, Pomacanchi. Репродукция близ Ленинграда,

1928, собр.: С. Юзепчук, опр.: С. Букасов, В. Лехнович (1971), WIR-37445».

По протологу: «Возделывается в Южном Перу, в районе Acomayo: Pomacanchi Юз. № 1174, 1177) и в других местах».

Примечание: На гербарном листе WIR-37445 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *curtibaccatum* var. *quechuanum* f. *pacus* Lechn.

***S. andigenum* f. *ppaqui* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:60.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Cusco, Poroy; репродукция близ Ленинграда, 1931, S. Juzepczuk, N 1402, WIR-37822».

Syntypus: «N 1237, "Chuchillo-ppaqui", Peru, [Cusco], Ccorau [Ccoran]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4409/3388, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37829».

Syntypus: «N 988, "Chuchillo ppaqui", Peru, Cusco, Ppisacc. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4452/3408, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37836».

По протологу: «Возделывается в деп. Cuzco: Ccoran, Poroy и Ppisac. Туземн. назв.: Cuchillo-ppaqui ("ломающий нож"), Cuculi-cintura. Юз. № 988, 993, 1237, 1402».

Примечание: На гербарных листах WIR-37829, WIR-37836 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *ortotrichon* var. *ppaqui* (Buk. et Lechn.) Lechn.

***S. andigenum* f. *sunchchu* Buk. et Lechn.** 1933, ibidem: 55.

Lectotypus (Чухина и др., 2016): «Peru, Cusco, Poroy, репродукция близ Ленинграда, 19 IX 1928, S. Juzepczuk, N 1397a, WIR-97746 (37270)».

Syntypus: «N 1337, "Paspa sunchchu", Peru, Cusco, Patapata. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4472/3449, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37300».

Syntypus: «N 1242, "Ccaspa sunchchu", Peru, Cusco, Puquiru [Puquiura]. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4377/3316, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-15622».

Syntypus: «N 1401, "Puca-sunchchu", Peru, Cusco, Poroy. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4427/3356, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-0097748».

По протологу: «Возделывается в деп. Cuzco: Puquiura (Юзепчук № 1242), Ckeccayoc (Юз. 1337), Poroy (Юз. № 1397a, 1401)… Туземные названия у белоклубневых: ccaspa sunchcu, paspa (трещиноватый) sunchchu, puca sunchchu, yurac (белый) sunchchu, ocke (серый) sunchchu. У красноклубневых – puca ("красный") sunchchu».

Примечание: На гербарных листах WIR-15622, WIR-37300 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *longiacuminatum* var. *sunchchu* (Buk. et Lechn.) Lechn. На гербарном листе WIR-0097748 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *longiacuminatum* var. *poroyense* Lechn.

***S. andigenum* f. *uncuna* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:63.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Acomayo, Pomacanchi, репродукция близ Ленинграда, 10 IX 1928, S. Juzepczuk, N 1175, WIR-97766 (37427)».

Syntypus: «N 1162(8650), Перу, Cusco, Acomayo, Pomacanchi. Репродукция близ Ленинграда, 1928, собр.: С. Юзепчук, опр.: В. Лехнович (1971), WIR-37416».

По протологу: «1162 и 1175... Туз. назв.: Llama ruru, color uncuna».

Примечание: На гербарном листе WIR-37416 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *curtibaccatum* var. *uncuna* (Buk. et Lechn.) Lechn. Образец смонтирован на двух гербарных листах.

Номенклатурные типы внутривидовых таксонов *S. andigenum* Juz. et Buk. боливийской группы

***S. andigenum* f. *ccompis* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:67.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Peru, Cusco, Tampumachai; репродукция близ Ленинграда, 1928, S. Juzepczuk, N 1289, № 4508/3500, WIR-38030».

Syntypus: «N 989в, "Ccompis", Peru, Cusco, Ppisacc. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4447/3407, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38004».

Syntypus: «N 1230, "Ccompis", Peru, Cusco, Yuncai-pampa. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4382/3325, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38022».

Syntypus: «N 1233, "Ccompis", Peru, Cusco, Ccaca cuyo. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4438/3394, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37997».

Syntypus: «N 1271, "Puca ccompis", Peru, Cusco, Puquiru [Puquiura]. Репродукция близ Ленинграда, 1928, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37974».

Syntypus: «N 1285, "Ccompis", Peru, Cusco, Iana [Yana] machai. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4505/3497, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38016».

Syntypus: «N 1286, "Ccompis", Peru, Cusco, Iana [Yana] machai. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4506/3498, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-38029».

Syntypus: «N 1663, "Jancko imilla", Bolivia, La Paz. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4624в/3549, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37928».

Syntypus: «N 1807a, Bolivia, La Paz. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4632/3570, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37944».

По протологу: «Возделывается в Южном Перу, деп. Cuzco: Ppisacc (Юз. 989в), Yancai-pampa (Юз. № 1230), Ccaca-cuyo (Юз. № 1233), Puquiura (Юз. № 1271), Tampumachai (Юз. № 1289), Yana machai (Юз. №№ 1285, 1286 и др.), Ckeccayoc (Юз. № 1133), Huaccotto (Юз. № 1355в); в районе Urubamba: Ollantaytambo (Юз. № 1044). Туземные названия в Перу: Ccompis и другие. В Боливии возделывается в районе La Paz (Юз. №№ 1666, 1663, 1807a)».

Примечание: На гербарных листах WIR-37928, WIR-37944, WIR-37974, WIR-37997, WIR-38004, WIR-38016, WIR-38022, WIR-38029 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *titicacense* var. *chiar imilla* f. *ccompis* Lechn. Образец WIR-38004 смонтирован на двух гербарных листах.

***S. andigenum* f. *chiar-imilla* Buk. et Lech.** 1933, ibidem:66.

Lectotypus (Ovchinnikova et al., 2011): «Bolivia, La Paz; репродукция близ Ленинграда, 7 IX 1931, S. Juzepczuk, N 1582, WIR-37880».

Syntypus: «N 1660a, "Chiar imilla", Bolivia, La Paz. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4626/3554, 1929,

leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37912».

Syntypus: «N 1660c(8713), "Chiar imilla", Bolivia, La Paz. Репродукция близ Ленинграда, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37894».

Syntypus: «N 1680, "Chiar imilla", Bolivia, La Paz. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4628/3555, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37890».

Syntypus: «N 1683, "Chiar imilla", Bolivia, La Paz. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4629/3556, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37902».

Syntypus: «N 1714, "Chiar imilla", Bolivia, La Paz. Репродукция близ Ленинграда, [полевой] № 4630/3557, 1929, leg.: S. Juzepczuk, det.: S. Juzepczuk, S. Bukasov, WIR-37920».

По протологу: «Возделывается в Боливии: район La Paz. Юз. № 1582, 1660, 1660a, 1660c, 1680, 1683, 1714 и многие другие. Туземное название: chiar imilla».

Примечание: На гербарных листах WIR-37890, WIR-37894, WIR-37902, WIR-37912, WIR-37920 есть определение В. С. Лехновича 1971 г.: *S. andigenum* ssp. *australiperuvianum* convar. *titicacense* var. *chiar imilla* f. *imilla* Lechn.

References / Литература

Ames M., Spooner D.M. DNA from herbarium specimens settles a controversy about origins of the European potato. *American Journal of Botany*. 2008;95(2):252-257. DOI: 10.3732/ajb.95.2.252

Bukasov S.M. Principles of the systematics of potatoes. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 1978;62(1):3-35. [in Russian] (Букасов С.М. Принципы систематики картофеля. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции.* 1978;62(1):3-35).

Bukasov S.M. The cultivated plants of Mexico, Guatemala and Colombia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1930; Suppl. 47:307. [in Russian] (Букасов С.М. Возделываемые растения Мексики, Гватемалы и Колумбии. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1930; Приложение 47:307).

Bukasov S.M. The origin of potato species. *Physis.* 1939;18:41-46.

Bukasov S.M. The potatoes of South America and their breeding possibilities. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1933; Suppl. 58:153. [in Russian] (Букасов С.М. Картофели Южной Америки и их селекционное использование. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1933; Приложение 58:53).

Chernomorskaya N.M. S.M. Bukasov and V.S. Lekhnovich authentic samples stored in the VIR herbarium. *Scientific and Technical Bulletin of the N.I. Vavilov All-Union Research Institute of Plant Industry*. 1991;214:45-48. [in Russian] (Черноморская Н.М. Аутентичные образцы С.М. Букасова и В.С. Лехновича. *Научно-технический бюллетень Всесоюзного НИИ растениеводства им. Н.И. Вавилова*. 1991;214:45-48).

Chukhina I.G., Dorofeyev V.I., Gavrilenko T.A., Krylova E.A., Ovchinnikova A.B. Type specimens of *Solanum* section *Petota* Dumort. (Solanaceae) taxa in the N. I. Vavilov Institute of Plant Genetic Resources (WIR) and the V. L. Komarov Botanical Institute (LE): new findings and updates. *Turczaninowia.* 2017;20(2):97-105. [in Russian] (Чухина И.Г., Дорофеев В.И., Гавриленко Т.А., Крылова Е.А., Овчинникова А.Б. Типовые материалы таксонов секции *Petota* Dumort. рода *Solanum* (Solanaceae) Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР, WIR) и Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН (БИН РАН, LE): новые находки и уточнения. *Turczaninowia*. 2017;20(2):97-105). DOI: 10.14258/turczaninowia.20.2.8

Chukhina I.G., Gavrilenko T.A., Smekalova T.N. Catalogue of the VIR global collection. Issue 833. Nomenclatural types stored in the VIR herbarium: genus *Solanum* L. (family Solanaceae Juss.) St. Petersburg: VIR; 2016a. [in Russian] (Чухина И.Г., Гавриленко Т.А., Смекалова Т.Н. Каталог Мировой Коллекции ВИР. Выпуск 833. Номенклатурные типы, хранящиеся в гербарии ВИР: род *Solanum* L. (сем. Solanaceae Juss.). Санкт-Петербург: ВИР; 2016a).

Chukhina I.G., Krylova E.A., Ovchinnikova A.B., Gavrilenko T.A. Herbarium specimens of wild Chilean potato species belonging to the section *Petota* Dumort. Genus *Solanum* L. in the VIR herbarium. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2016b;177(1):110-121. [in Russian] (Чухина И.Г. Крылова Е.А., Овчинникова А.Б., Гавриленко Т.А. Гербарные образцы диких чилийских видов картофеля секции *Petota* Dumort. рода *Solanum* L. в Гербарии ВИР. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2016b;177(1):110-121). DOI: 10.30901/2227-8834-2016-1-110-121

Gavrilenko T., Chukhina I., Antonova O., Krylova E., Shipilina L., Oskina N. et al. Comparative analysis of the genetic diversity of Chilean cultivated potato based on a molecular study of authentic herbarium specimens and present-day gene bank accessions. *Plants*. 2023;12(1):174. DOI: 10.3390/plants12010174

Gorbatenko L.E. Potato species of South America (Ecology, geography, introduction, systematics, breeding value) (Vidy kartofelya Yuzhnoy Ameriki [Ekologiya, geografiya, introduktsiya, sistematika, selektsionnaya znachimost]). St. Petersburg: VIR; 2006. [in Russian] (Горбатенко Л.Е. Виды картофеля Южной Америки (Экология, география, интродукция, систематика, селекционная значимость). Санкт-Петербург: ВИР; 2006).

Gutaker R.M., Weiß C.L., Ellis D., Anglin N.L., Knapp S., Fernández-Alonso J.L. et al. The origins and adaptation of European potatoes reconstructed from historical genomes. *Nature Ecology and Evolution*. 2019;3(7):1093-1101. DOI: 10.1038/s41559-019-0921-3

Juzepczuk S.V. About the South American expedition of the All-Union Institute of Applied Botany and New Crops. *Annals of the State Institute of Experimental Agronomy*. 1928;6(5-6):176-177. [in Russian] (Юзепчук С.В. О южноамериканской экспедиции Всесоюзного института прикладной ботаники и новых культур. *Известия государственного института опытной агрономии*. 1928:6(5-6):176-177).

Juzepczuk S.W. New species of *Solanum* L. genus from the group *Tuberarium* Dun. (Novye vidy roda *Solanum* iz gruppy *Tuberarium* Dun.). *Izvestiya AN SSSR, seriya biologiya = Bulletin of the USSR Academy of Sciences, Biology Series*. 1937;2:295-331. [in Russian] (Юзепчук С.В. Новые виды рода *Solanum* из группы *Tuberarium* Dun. *Известия АН СССР, серия биология*. 1937;2:295-331).

Juzepczuk S.W., Bukasov S.M. A contribution to the question of the origin of the potato. In: *Proceedings of the USSR Congress of Genetics, Plant- and Animal-Breeding; Leningrad; January 10–16, 1929*. *Vol. 3.* Leningrad; 1929. p.593-611. [in Russian] (Юзепчук С.В., Букасов С.М. К вопросу о происхождении картофеля. В кн.: *Труды Всесоюзного съезда по генетике, селекции, семеноводству и племенному животноводству; Ленинград; 10–16 января 1929 г. Т. 3.* Ленинград; 1929. С.593-611).

Korovina O.N., Belozor N.I., Chernomorskaya N.M. (comp.). Catalogue of the VIR global collection. Issue 327, Part 2. Cata-

logue of the types of plant taxa preserved at the VIR Herbarium (Catalogus typorum taxerum plantarum in Herbario WIR conservatorum). O.N. Korovina (ed.). Leningrad: VIR; 1985. [in Russian] (Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 327, ч. 2. Каталог типов таксонов растений, хранящихся в гербарии ВИР / сост. О.Н. Коровина, Н.И. Белозор, Н.М. Черноморская; под ред. О.Н. Коровиной. Ленинград: ВИР; 1985).

Lekhnovich V.S. Cultivated potato species (Kulturnye vidy kartofelya). In: P.M. Zhukovsky, S.M. Bukasov (eds). *Flora of Cultivated Plants. Vol. 9. Potato.* Leningrad; 1971. p.41-304. [in Russian] (Лехнович В.С. Культурные виды картофеля. В кн.: *Культурная флора СССР. Т. 9. Картофель* / под ред. В.С. Жуковского, С.М. Букасова. Ленинград; 1971. С.41-304).

Lekhnovich V.S. New taxons within the species *Solanum andigenum* Juz. et Buk. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding.* 1983;79:45-49. [in Russian] (Лехнович В.С. Новые таксоны внутри вида *Solanum andigenum* Juz. et Buk. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1983;79:45-49).

Lekhnovich V.S. New wild potato species from Pacific off-chore islands of South America. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1978;62(1):36-54. [in Russian] (Лехнович В.С. Новые дикие виды картофеля с тихоокеанских прибрежных островов Южной Америки. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1978;62(1):36-54).

Ovchinnikova A., Krylova E., Gavrilenko T., Smekalova T., Zhuk M., Knapp S. et al. Taxonomy of cultivated potatoes (*Solanum* section *Petota*: Solanaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society.* 2011;165(2):107-155. DOI: 10.1111/j.1095-8339.2010.01107.x

Ovchinnikova A.B., Chukhina I.G., Gavrilenko T.A. Type specimens of cultivated species of potato section *Petota* Dumort. genus *Solanum* L., kept in the herbaria of N.I. Vavilov All-Russian Research Iinstitute of Plant Industry. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;169:300-304. [in Russian] (Овчинникова А.Б., Чухина И.Г., Гавриленко Т.А. Типовые образцы культурных видов картофеля секции *Petota* Dumort. рода *Solanum* L., сохраняемые в Гербарии Всероссийского научно-исследовательского института растениеводства им. Н. И. Вавилова (WIR). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;169:300-304).

Sizonenko A.I. Academician N. I. Vavilov and Latin America (Akademik N. I. Vavilov i Latinskaya Amerika). In: Sizonenko A.I. *Latin America in the works and creative heritage of Academician N. I. Vavilov* (*Latinskaya Amerika v trudakh i tvorcheskom nasledii akademika N. I. Vavilova*). Moscow; 1987. p.4-20. [in Russian] (Сизоненко А.И. Академик Н. И. Вавилов и Латинская Америка. В кн.: Сизоненко А.И. Латинская Америка в трудах и творческом наследии академика Н. И. Вавилова. Москва; 1987. С. 4-20).

Spooner D.M., Gavrilenko T., Jansky S.H., Ovchinnikova A., Krylova E., Knapp S. et al. Ecogeography of ploidy variation in cultivated potato (*Solanum* sect. *Petota*). *American Journal of Botany*. 2010;97(12):2049-2060. DOI: 10.3732/ajb.1000277

Turland N.J., Wiersema J.H., Barrie F.R., Greuter W., Hawksworth D.L., Herendeen P.S., Knapp S., Kusber W.H., Li D.Z., Marhold K., May T.W., McNeill J., Monro A.M., Prado J., Price M.J., Smith G.F. (eds). International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code) adopted by the Nineteenth International Botanical Congress Shenzhen, China, July 2017. Regnum Vegetabile 159. Glashütten: Koeltz Botanical Books; 2018. DOI: 10.12705/Code.2018

Vavilov N.I. Les grandes civilisations agricoles de l'Amérique d'avant Christophe Colomb et leurs rapports mutuels. *Izvestiya Gosudarstvennogo geograficheskogo obshchestva = Bulletin of the State Geographical Society.* 1939;71(10):1487-1515. [in Russian] (Вавилов Н.И. Великие земледельческие культуры доколумбовой Америки и их взаимоотношения. *Известия Государственного географического общества*. 1939;71(10):1487-1515).

Vavilov N.I. Mexico and Central America as the principal centre of origin of cultivated plants of the New World. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1931;26(3):135-199. [in Russian] (Вавилов Н.И. Мексика и Центральная Америка как основной центр происхождения культурных растений Нового Света. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1931;26(3):135-199).

Zykin A.G. About Chilean wild relatives of potatoes (O dikorastushchikh sorodichakh chiliyskogo kartofelya). *Rastitelnye resursy = Plant Resources*. 1971;7(2):242-251. [in Russian] (Зыкин А.Г. О дикорастущих сородичах чилийского картофеля. *Растительные ресурсы*. 1971;7(2):242 251).

Zykin A.G. Chilian cultivated potato and its wild relatives. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 1973;50(3):216-243. [in Russian] (Зыкин А.Г. Чилийский культурный картофель и его дикие сородичи. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 1973;50(3):216-243).

Информация об авторах

Наталья Алексеевна Оськина, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, n.fomina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-4401-4995

Татьяна Андреевна Гавриленко, 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, tatjana9972@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-2605-6569

Ирена Георгиевна Чухина, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, i.chukhina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3587-6064

Information about the authors

Natalia A. Oskina, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000 Russia, n.fomina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-4401-4995

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

Irena G. Chukhina, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg, 190000 Russia, i.chukhina@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0003-3587-6064

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 12.10.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 12.10.2023; approved after reviewing on 23.11.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

СИСТЕМАТИКА, ФИЛОГЕНИЯ И ГЕОГРАФИЯ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 634.1:631.52
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-174-189

CC BY

Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия

Е. В. Ульяновская[1], И. И. Супрун[1], Т. В. Богданович[1], Е. А. Чернуцкая[1], С. В. Токмаков[1], Г. В. Таловина[2]

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

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

Автор, ответственный за переписку: Елена Владимировна Ульяновская, ulyanovskaya_e@mail.ru

Актуальность. Разработка генетических паспортов и номенклатурных стандартов новых районированных сортов яблони (*Malus domestica* Borkh.) обеспечивает сохранение оригинальной и подлинной генетической и морфологической информации по перспективным для юга России отечественным сортам. Цель исследования – создание генетических паспортов и номенклатурных стандартов для семи сортов яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ), пять из которых выведены совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур (ВНИИСПК).
Материалы и методы. Объекты исследования – иммунные и устойчивые к парше (*Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter) сорта яблони коллекционного фонда СКФНЦСВВ. Использованы общепринятые методы гербаризации и ДНК-маркирования. Для паспортизации использованы: усовершенствованная методика отбора проб ДНК и 12 микросателлитных маркеров.
Результаты. Получены уникальные ДНК-паспорта и номенклатурные стандарты семи сортов яблони: ‘Василиса’, ‘Кармен’, ‘Красный Янтарь’, ‘Союз’, ‘Рассвет’ (с геном *Rvi6*) селекции СКФНЦСВВ и ВНИИСПК, а также ‘Золотое Летнее’, ‘Фея’ селекции СКФНЦСВВ. Гербарные образцы яблони переданы во Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) для бессрочного хранения в Гербарии культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR).
Заключение. Полученные результаты перспективны для идентификации и подтверждения подлинности при размножении и культивировании новых сортов яблони отечественной селекции.

Ключевые слова: *Malus domestica* Borkh., Гербарий культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR), ДНК-маркирование, паспортизация, ген, маркер

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России «Национальная сетевая коллекция генетических ресурсов растений для эффективного научно-технологического развития РФ в сфере генетических технологий» по соглашению № 075-15-2021-1050 от 28.09.2021 г.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Ульяновская Е.В., Супрун И.И., Богданович Т.В., Чернуцкая Е.А., Токмаков С.В., Таловина Г.В. Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4): 174-189. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-174-189

© Ульяновская Е.В., Супрун И.И., Богданович Т.В., Чернуцкая Е.А., Токмаков С.В., Таловина Г.В., 2023

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

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-174-189

Nomenclatural standards and genetic certificates for apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making

Elena V. Ulyanovskaya[1], Ivan I. Suprun[1], Tatyana V. Bogdanovich[1], Evgenia A. Chernutskaya[1], Sergey V. Tokmakov[1], Galina V. Talovina[2]

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

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

Corresponding author: Elena V. Ulyanovskaya, ulyanovskaya_e@mail.ru

Background. The development of genetic certificates and nomenclatural standards for newly released cultivars of *Malus domestica* Borkh. (apple tree) ensures an opportunity to preserve the original and authentic genetic and morphological information on domestic cultivars promising for the south of Russia. The purpose of this study was to develop genetic certificates and nomenclatural standards for 7 apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making (NCFSCHVW), five of which were released jointly with the All-Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (VNIISPK).
Materials and methods. The materials included apple-tree cultivars resistant or immune to scab (*Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter) from the NCFSCHVW collection stock. Conventional herbarization and DNA fingerprinting methods were used. For cultivar certification, an improved technique of DNA sampling and 12 microsatellite markers were applied.
Results. Unique DNA profile certificates and nomenclatural standards were produced for 7 apple-tree cultivars: 'Vasilisa', 'Karmen', 'Krasny Yantar', 'Soyuz' and 'Rassvet' (with the *Rvi6* gene) released jointly by the NCFSCHVW and VNIISPK, plus 'Zolotoye Letneye' and 'Feya' developed at the NCFSCHVW. The apple-tree herbarium specimens were placed for perpetual storage in the WIR Herbarium of the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR).
Conclusion. The results obtained are promising for identification and authenticity verification of new domestic apple-tree cultivars during their reproduction and cultivation.

Keywords: *Malus domestica* Borkh., Herbarium of Cultivated Plants of the World, Their Wild Relatives, and Weeds (WIR), DNA fingerprinting, certification, gene, marker

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2021-1050 dated Sept. 28, 2021.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Ulyanovskaya E.V., Suprun I.I., Bogdanovich T.V., Chernutskaya E.A., Tokmakov S.V., Talovina G.V. Nomenclatural standards and genetic certificates for apple-tree cultivars developed at the North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):174-189. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-174-189

Введение

Северо-Кавказский регион садоводства – один из важнейших и крупнейших в России по производству плодовой продукции яблони (*Malus domestica* Borkh.), наличию плодоносящих промышленных насаждений этой ведущей семечковой культуры. Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ) – крупнейшее научное учреждение в России и на Северном Кавказе, в котором – еще с первых лет организации в 1931 г. в качестве Северо-Кавказской зональной опытной станции – начались научные исследования по селекционному совершенствованию сортимента плодовых культур, в частности по селекции яблони – основной плодовой культуре региона. В настоящее время на основе имеющегося биологического разнообразия коллекционного фонда и комплекса молекулярно-генетических, цитологических, физиолого-биохимических и других методов ведется ускоренное создание сортов ведущей плодовой культуры региона.

В современных условиях постоянного усиления санкций возрастает роль отечественной сортовой политики, направленной на создание, сохранение, документирование, изучение, популяризацию и внедрение в промышленное производство отечественных сортов основных плодовых растений. Особая роль в условиях необходимости решения проблем импортозамещения и развития отечественного промышленного садоводства и питомниководства принадлежит иммунным и высокоустойчивым к парше сортам яблони. Культивирование сортов с иммунитетом и устойчивостью к парше перспективно в различных регионах России; способствует решению проблем охраны окружающей среды; позволяет производителям значительно оптимизировать затраты на средства химзащиты, повысить рентабельность отрасли, снизить себестоимость получаемой продукции и улучшить ее качество без дополнительных вложений; потребителям – получить плоды с более высокими показателями экологической безопасности и пищевой ценности (Savelyev et al., 2009; Ulyanovskaya et al., 2016; Savelieva et al., 2017; Shlyavas et al., 2021).

Селекция с использованием носителей гена *Rvi6* (*Vf*), наиболее распространенного в мире, в России была начата во Всероссийском научно-исследовательском институте селекции плодовых культур (ВНИИСПК) в 1976 г. под руководством академика РАН Е. Н. Седова (Sedov, Zhdanov, 1983), а в регионе Северного Кавказа – в 1985 г. в СКФНЦСВВ по совместной творческой программе с ВНИИСПК. В настоящее время по данной программе создан конвейер отечественных иммунных и устойчивых к парше сортов, семь из которых, в том числе пять совместной селекции, вошли в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию по Северо-Кавказскому региону России (Sedov, 2020; State Register…, 2022). Значительному ускорению процесса селекции способствует использование на различных его этапах методов ДНК-анализа для оценки исходных родительских форм и нового селекционного материала на наличие целевых признаков.

Методы ДНК-маркирования необходимы не только для идентификации хозяйственно значимых признаков, но и для создания генетических паспортов новых сортов яблони. Актуальность развития данного направления обусловлена необходимостью решения задачи на будущее, направленной на обязательное оформление генетических паспортов на каждый новый сорт яблони, включаемый в Госреестр согласно новой редакции ФЗ «О семеноводстве» (№ 454 от 30.12.2021), которая вступает в силу 01.09.2023, за исключением нескольких статей, вступающих в силу 01.09.2024 (Federal Law …, 2021).

Цель исследования – разработка генетических паспортов и номенклатурных стандартов для семи сортов яблони селекции Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия (СКФНЦСВВ), пять из которых – совместной селекции с Всероссийским научно-исследовательским институтом селекции плодовых культур (ВНИИСПК), для бессрочного хранения оригинальной и подлинной генетической и морфологической информации во Всероссийском институте генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР).

Материалы и методы

Объекты исследования – иммунные и устойчивые к парше (*Venturia inaequalis* (Cooke) G. Winter) сорта яблони коллекционного фонда СКФНЦСВВ. Среди них пять иммунных к парше носителей гена *Rvi6* совместной селекции СКФНЦСВВ и ВНИИСПК: ‘Василиса’, ‘Кармен’, ‘Красный Янтарь’, ‘Союз’, ‘Рассвет’, а также два сорта с полигенным типом устойчивости к парше: ‘Золотое Летнее’, ‘Фея’, созданные в СКФНЦСВВ.

Исследования выполнены в СКФНЦСВВ в коллекционных насаждениях яблони, расположенных в АО ОПХ «Центральное» (г. Краснодар), 2002 года посадки на подвое М9. В работе использованы полевые и лабораторные методы исследования. Гербаризацию образцов яблони проводили под руководством и при участии одного из авторов вышеперечисленных сортов, селекционера Е. В. Ульяновской. Гербаризация сортов выполнена в период цветения и плодоношения растений яблони. Использованы: методика ВИР (Belozor, 1989); Международный классификатор СЭВ (International COMECON list…, 1989); Международный кодекс номенклатуры культурных растений (ICNCP) (Brickell et al., 2016). Фотографии всех сортов выполнены Е. В. Ульяновской, за исключением фото цветков ‘Красный Янтарь’, ‘Золотое Летнее’, сделанных Т. В. Богданович. Гербарная этикетка включает следующие данные о сорте: гербарный номер образца (в Гербарии ВИР); вид (латинское название); сорт (название); происхождение (название организации, где сорт создан); место репродукции (где выращен сорт – гербаризируемое растение); дата сбора. Подписью автора сорта (Е. В. Ульяновская), подтверждающей его подлинность, заверен каждый образец гербария.

Для ДНК-анализа материал отбирали в период активного роста с растений яблони, использованных для гербаризации. Экстракцию ДНК выполняли методом ЦТАБ (Murray, Thompson, 1980; Suprun, 2017). Для паспортизации из литературных источников были отобраны полиморфные перспективные SSR-маркеры, проявившие высокий уровень полиморфизма. Маркеры были мечены различными флуоресцентными метками (TAMRA, ROX, R6G и FAM) и в соответствии с ожидаемыми размерами амплифицируемых продуктов разбиты на мультиплексы.

Результаты и обсуждение

Научные исследования по данному направлению начались сравнительно недавно – с 2018 г. в ВИР развернуты исследования по разработке сортовых номенклатурных стандартов по культуре яблони; гербарные образцы

хранятся в фонде Гербария культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений (WIR) бессрочно и при необходимости позволяют подтверждать подлинность размножаемых вегетативно сортов (Bagmet et al., 2021; Bagmet, Shlyavas, 2021).

В рамках выполнения совместных исследований с ВИР по проекту Минобрнауки России «Национальная сетевая коллекция генетических ресурсов растений для эффективного научно-технологического развития РФ в сфере генетических технологий» (соглашение № 075-15-2021-1050 от 28.09.2021) в СКФНЦСВВ с 2022 г. начаты исследования по разработке номенклатурных стандартов новых перспективных сортов яблони селекции научного учреждения. Результатом совместных исследований коллектива ученых СКФНЦСВВ и ВИР по проекту стали разработанные номенклатурные стандарты семи сортов яблони, переданные в типовой фонд Гербария культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений ВИР (WIR):

1. *Malus domestica* Borkh., сорт **‘Союз’**, авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Ульяновская Е.В., Жданов В.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Серова З.М., Махно Л.В., Причко Т.Г. – **‘Soyuz’**, authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Ulyanovskaia E.V., Zhdanov V.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Serova Z.M., Makhno L.V., Prichko T.G.

Nomenclatural standard: Происхождение: ‘Редфри’ × ‘Папировка’ тетраплоидная. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» совместно с Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур». Место сбора: Краснодарский край, г. Краснодар, поселок отделения № 2 СКЗНИИСВ, Акционерное общество опытно-производственное хозяйство «Центральное». 19 IV 2022 (цветок), 5 VII 2022 (плод), 6 IX 2022 (однолетний побег, лист). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В., определила Ульяновская Е.В. – Origin: ‘Redfree’ × ‘Papirovka’ tetraploid. Federal State Budget Scientific Institution “North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making”, Federal State Budget Scientific Institution “Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding”, reproduction: Krasnodar Territory, Krasnodar, village branch No. 2 NCFSCHVW, Joint-Stock Company Experimental Production Farm “Tsentralnoye”. 19 IV 2022 (flower), 5 VII 2022 (fruit), 6 IX 2022 (annotinous shoot, leaf). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V., identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104540**.

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах (рис. 1).

2. *Malus domestica* Borkh. сорт **‘Василиса’**, авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Жданов В.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Ульяновская Е.В., Махно Л.В., Причко Т.Г. – **‘Vasilisa’**, authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Zhdanov V.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Ulyanovskaia E.V., Makhno L.V., Prichko T.G.
Nomenclatural standard: Происхождение: ‘Прима’ × ‘Уэлси’ тетраплоидный. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» совместно с Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур». Место сбора: Краснодарский край, г. Краснодар, поселок отделения № 2 СКЗНИИСВ, Акционерное общество опытно-производственное хозяйство «Центральное». 19 IV 2022 (цветок), 5 VII 2022 (плод), 6 IX 2022 (однолетний побег, лист). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В., определила Ульяновская Е.В. – Origin: ‘Prima’ × ‘Welsey’ tetraploid. Federal State Budget Scientific Institution “North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making”, Federal State Budget Scientific Institution “Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding”, reproduction: Krasnodar Territory, Krasnodar, village branch No. 2 NCFSCHVW, Joint-Stock Company Experimental Production Farm “Tsentralnoye”. 19 IV 2022 (flower), 5 VII 2022 (fruit), 6 IX 2022 (annotinous shoot, leaf). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V., identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104535**.

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах (рис. 2).

3. *Malus domestica* Borkh. сорт **‘Фея’**, авторы: Дутова Л.И., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Махно Л.В., Причко Т.Г. – **‘Feya’**, authors: Dutova L.I., Ulyanovskaia E.V., Ragulina T.V., Makhno L.V., Prichko T.G.

Nomenclatural standard: Происхождение: ‘Мантет’ × ‘Папировка’ тетраплоидная. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия». Место сбора: Краснодарский край, г. Краснодар, поселок отделения № 2 СКЗНИИСВ, Акционерное общество опытно-производственное хозяйство «Центральное». 19 IV 2022 (цветок), 5 VII 2022 (плод), 6 IX 2022 (однолетний побег, лист). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В., определила Ульяновская Е.В. – Origin: ‘Mantet’ × ‘Papirovka’ tetraploid. Federal State Budget Scientific Institution «North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making», reproduction: Krasnodar Territory, Krasnodar, village branch No. 2 NCFSCHVW, Joint-Stock Company Experimental Production Farm “Tsentralnoye”. 19 IV 2022 (flower), 5 VII 2022 (fruit), 6 IX 2022 (annotinous shoot, leaf). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V., identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104541**.

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах (рис. 3).

4. *Malus domestica* Borkh. сорт **‘Рассвет’**, авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Ульяновская Е.В., Жданов В.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Серова З.М., Махно Л.В., Причко Т.Г. – **‘Rassvet’**, authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Ulyanovskaia E.V., Zhdanov V.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Serova Z.M., Makhno L.V., Prichko T.G.

Nomenclatural standard: Происхождение: ‘Редфри’ × ‘Папировка’ тетраплоидная. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» совместно с Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур». Место сбора: Краснодарский край, г. Краснодар, поселок отделения № 2 СКЗНИИСВ, Акционерное общество опытно-производственное хозяйство «Центральное». 19 IV 2022 (цветок), 5 VII 2022 (плод), 6 IX 2022 (однолетний побег, лист). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В., определила Ульяновская Е.В. – Origin: ‘Redfree’ × ‘Papirovka’ tetraploid. Federal State Budget Scientific Institution “North Caucasian

Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making", Federal State Budget Scientific Institution "Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding", reproduction: Krasnodar Territory, Krasnodar, village branch No. 2 NCFSCHVW, Joint-Stock Company Experimental Production Farm "Tsentralnoye". 19 IV 2022 (flower). 5 VII 2022 (fruit). 6 IX 2022 (annotinous shoot, leaf). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V., identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104539**.

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах (рис. 4).

5. *Malus domestica* Borkh. сорт **'Кармен'**, авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Жданов В.В., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Махно Л.В., Причко Т.Г. – **'Karmen'**, authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Zhdanov V.V., Ulyanovskaia E.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Makhno L.V., Prichko T.G.

Nomenclatural standard: Происхождение: 'Прима' × 'Уэлси' тетраплоидный. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» совместно с Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур». Место сбора: Краснодарский край, г. Краснодар, поселок отделения № 2 СКЗНИИСВ, Акционерное общество опытно-производственное хозяйство «Центральное». 19 IV 2022 (цветок), 5 VII 2022 (плод), 6 IX 2022 (однолетний побег, лист). Собрали:Ульяновская Е.В.,Чернуцкая Е.А.,Богданович Т.В., определила Ульяновская Е.В. – Origin: 'Prima' × 'Welsey' tetraploid. Federal State Budget Scientific Institution "North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making", Federal State Budget Scientific Institution "Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding", reproduction: Krasnodar Territory, Krasnodar, village branch No. 2 NCFSCHVW, Joint-Stock Company Experimental Production Farm "Tsentralnoye". 19 IV 2022 (flower), 5 VII 2022 (fruit), 6 IX 2022 (annotinous shoot, leaf). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V., identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104537**.

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах (рис. 5).

6. *Malus domestica* Borkh. сорт **'Красный Янтарь'**, авторы: Дутова Л.И., Седов Е.Н., Жданов В.В., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Махно Л.В., Причко Т.Г. – **'Krasny Yantar'**, authors: Dutova L.I., Sedov E.N., Zhdanov V.V., Ulyanovskaia E.V., Ragulina T.V., Sedysheva G.A., Makhno L.V., Prichko T.G.

Nomenclatural standard: Происхождение: 'Редфри' × 'Папировка' тетраплоидная. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия» совместно с Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур». Место сбора: Краснодарский край, г. Краснодар, поселок отделения № 2 СКЗНИИСВ, Акционерное общество опытно-производственное хозяйство «Центральное». 5 VII 2022 (плод), 6 IX 2022 (однолетний побег, лист), 17 IV 2023 (цветок). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В., определила Ульяновская Е.В. – Origin: 'Redfree' × 'Papirovka' tetraploid. Federal State Budget Scientific Institution "North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making", Federal State Budget Scientific Institution "Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding", reproduction: Krasnodar Territory, Krasnodar, village branch No. 2 NCFSCHVW, Joint-Stock Company Experimental Production Farm "Tsentralnoye". 5 VII 2022 (fruit), 6 IX 2022 (annotinous shoot, leaf), 17 IV 2023 (flower). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V., identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104538**.

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах (рис. 6).

7. *Malus domestica* Borkh. сорт **'Золотое Летнее'**, авторы: Дутова Л.И., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Махно Л.В., Причко Т.Г. – **'Zolotoye Letneye'**, authors: Dutova L.I., Ulyanovskaia E.V., Ragulina T.V., Makhno L.V., Prichko T.G.

Nomenclatural standard: Происхождение: сеянец от свободного опыления сорта 'Голден Делишес' тетраплоидный. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия». Место сбора: Краснодарский край, г. Краснодар, поселок отделения № 2 СКЗНИИСВ, Акционерное общество опытно-производственное хозяйство «Центральное». 5 VII 2022 (плод), 6 IX 2022 (однолетний побег, лист), 17 IV 2023 (цветок). Собрали: Ульяновская Е.В., Чернуцкая Е.А., Богданович Т.В., определила Ульяновская Е.В. – Origin: seedling from free pollination of cv. 'Golden Delicious', tetraploid. Federal State Budget Scientific Institution "North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making", reproduction: Krasnodar Territory, Krasnodar, village branch No. 2 NCFSCHVW, Joint-Stock Company Experimental Production Farm "Tsentralnoye". 5 VII 2022 (fruit), 6 IX 2022 (annotinous shoot, leaf), 17 IV 2023 (flower). Collected by: Ulyanovskaya E.V., Chernutskaya E.A., Bogdanovich T.V., identified by: Ulyanovskaya E.V. **WIR-104536**.

Примечание: гербарный образец представлен на двух листах (рис. 7).

Для сортов 'Красный Янтарь', 'Союз', 'Фея', 'Кармен', Золотое Летнее', 'Василиса' и 'Рассвет' были получены ДНК-паспорта по 12 микросателлитным локусам – CH03d07, CH05e03, CH03a04, CN581493, CH01f03b, CH04e03, CN445290, CH01h01, CH01f03b, CH02c06, NZ05g08 и CH05f06 (табл. 1, 2). Все полученные ДНК-профили уникальны и позволяют достоверно различать сорта.

Заключение

По результатам выполненных совместных исследований для семи сортов яблони оформлены номенклатурные стандарты на основе положений Международного кодекса номенклатуры культурных растений (ICNCP) и получены генетические паспорта семи сортов яблони, в том числе совместной селекции СКФНЦСВВ и ВНИИСПК: 'Василиса' (WIR-104535), 'Кармен' (WIR-104537), 'Красный Янтарь' (WIR-104538), 'Союз' (WIR-104540), 'Рассвет' (WIR-104539), а также созданных в СКФНЦСВВ: 'Золотое Летнее' (WIR-104536), 'Фея' (WIR-104541). Разработанные на сорта яблони номенклатурные стандарты переданы в ВИР для бессрочного сохранения в коллекции Гербария культурных растений мира, их диких родичей и сорных растений ВИР (WIR). Полученные ДНК-паспорта сортов и их номенклатурные стандарты содержат оригинальную и подлинную генетическую и морфологическую информацию.

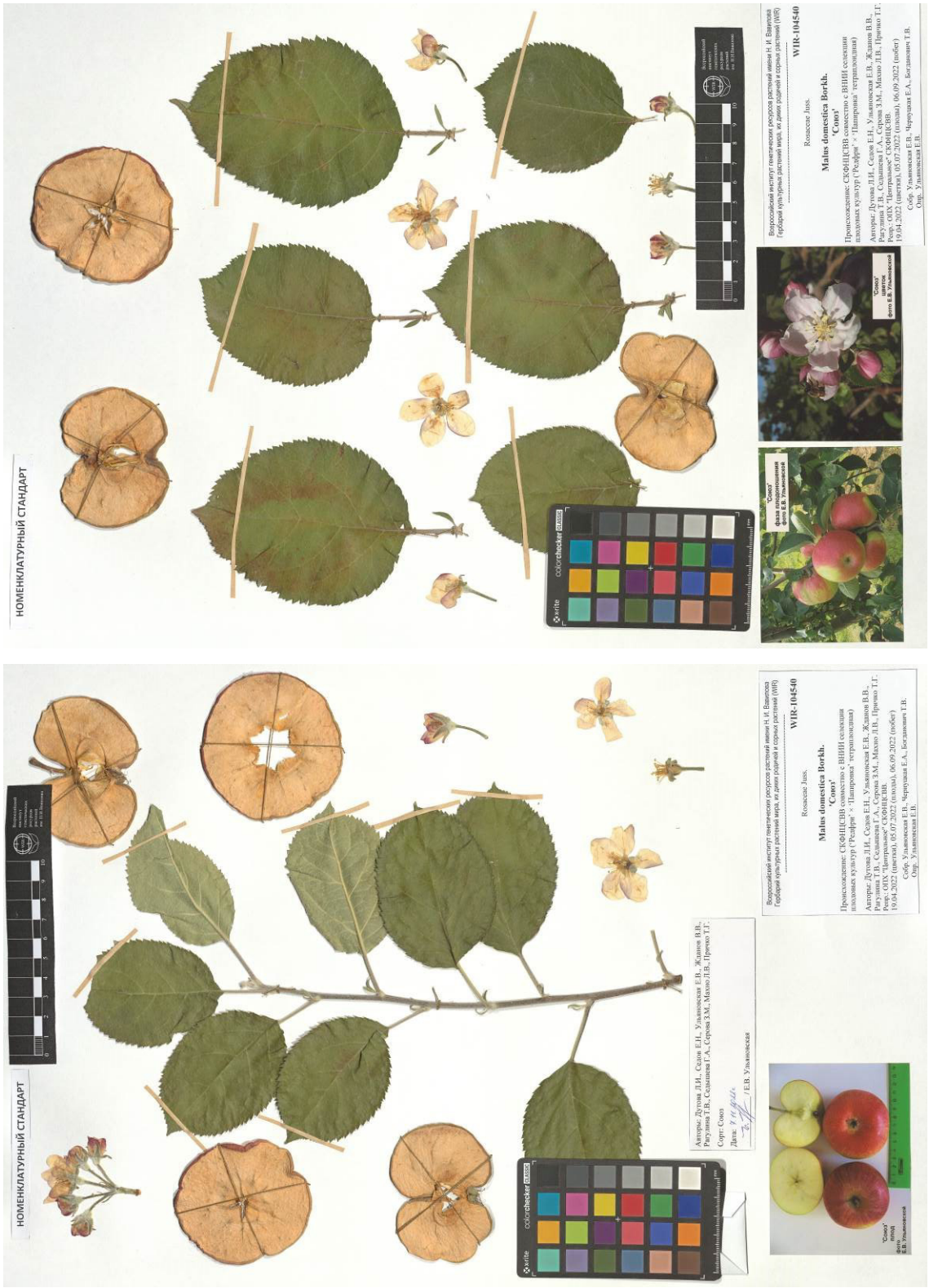


Рис. 1. Номенклатурный стандарт сорта 'Союз' (WIR-104540)

Fig. 1. Nomenclatural standard of cv. 'Soyuz' (WIR-104540)



Рис. 2. Номенклатурный стандарт сорта 'Василиса' (WIR-104535)

Fig. 2. Nomenclatural standard of cv. 'Vasilisa' (WIR-104535)



Рис. 3. Номенклатурный стандарт сорта 'Фея' (WIR-104541)

Fig. 3. Nomenclatural standard of cv. 'Feya' (WIR-104541)



Рис. 4. Номенклатурный стандарт сорта 'Рассвет' (WIR-104539)

Fig. 4. Nomenclatural standard of cv. 'Rassvet' (WIR-104539)

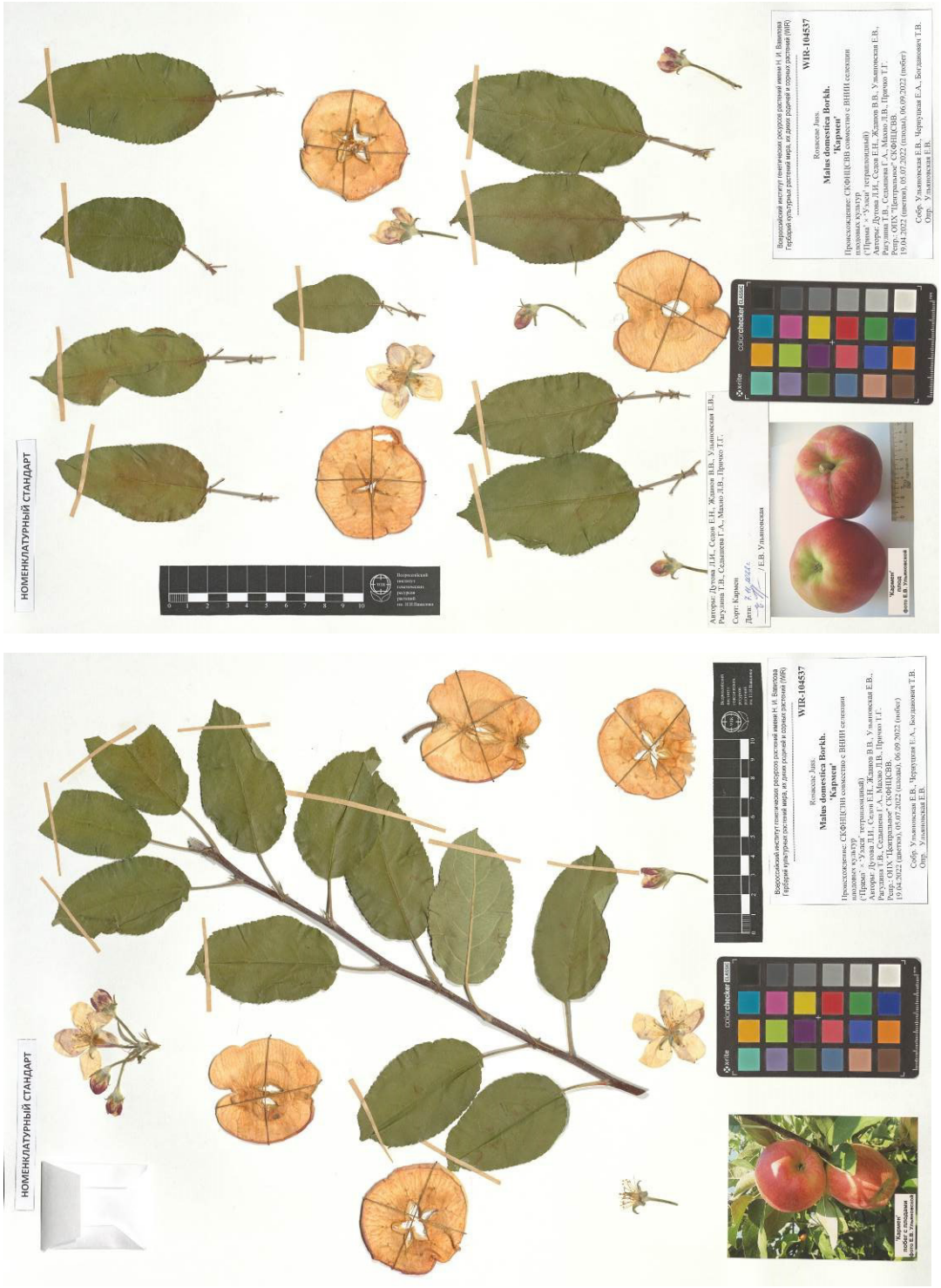


Рис. 5. Номенклатурный стандарт сорта 'Кармен' (WIR-104537)

Fig. 5. Nomenclatural standard of cv. 'Karmen' (WIR-104537)



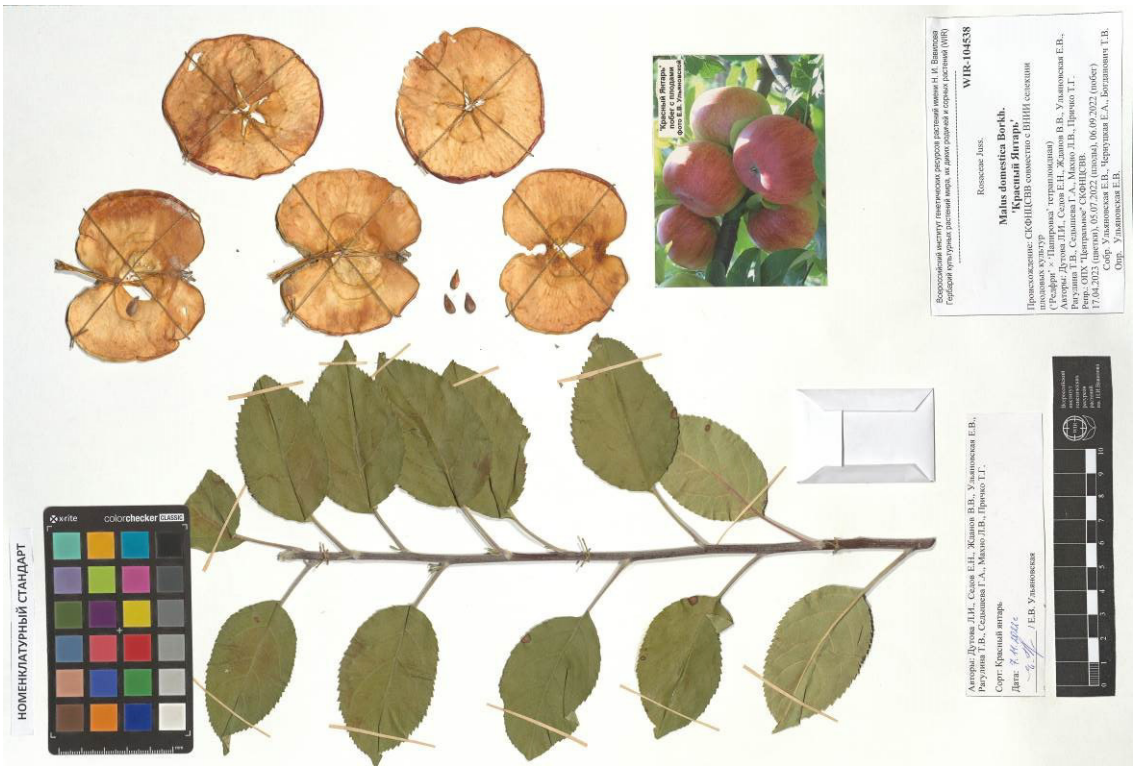


Рис. 6. Номенклатурный стандарт сорта ‘Красный Янтарь’ (WIR-104538)
Fig. 6. Nomenclatural standard of cv. ‘Krasny Yantar’ (WIR-104538)

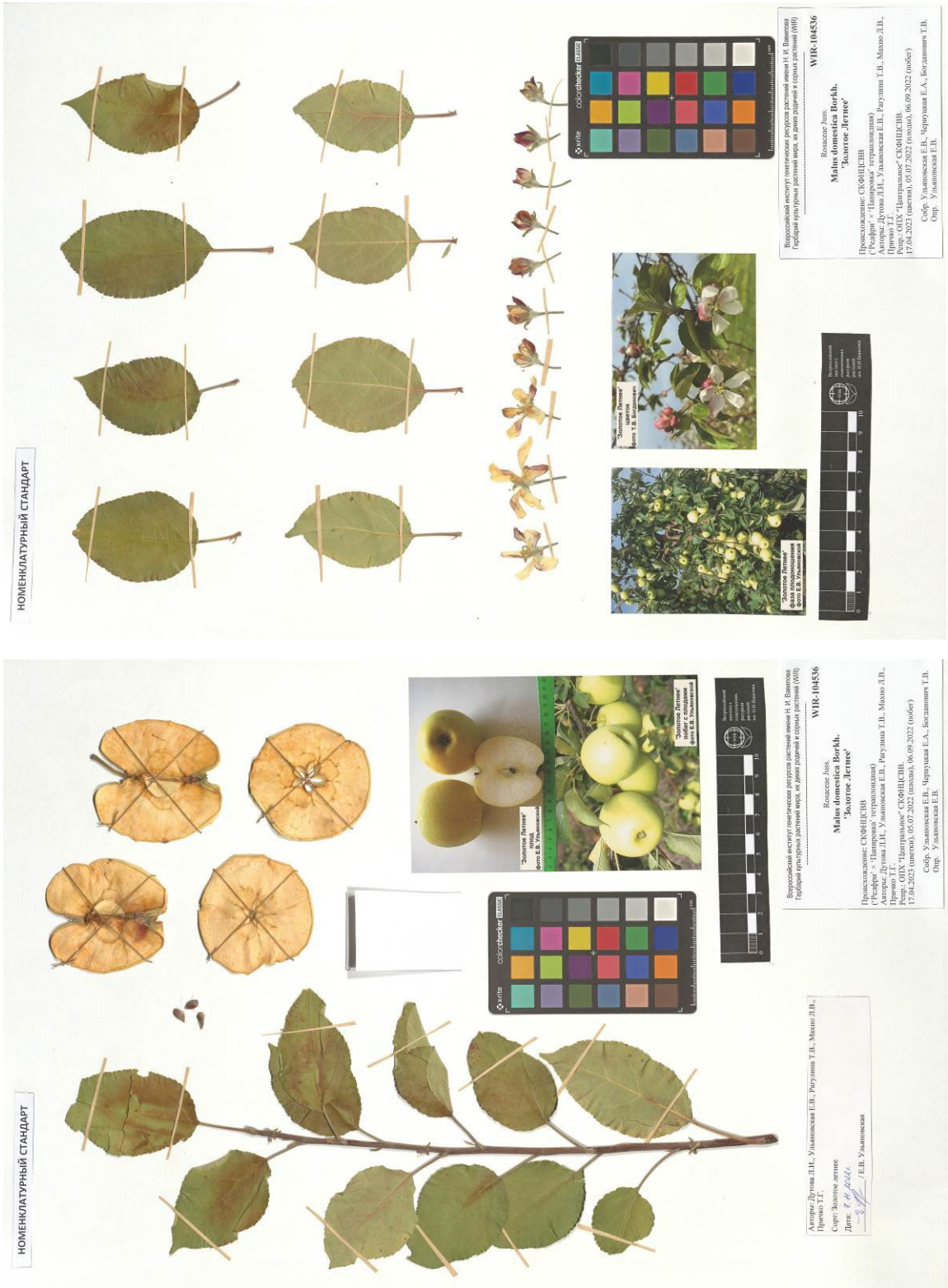


Рис. 7. Номенклатурный стандарт сорта 'Золотое Летнее' (WIR-104536)

Fig. 7. Nomenclatural standard of cv. 'Zolotoye Letneye' (WIR-104536)

Таблица 1. **Генетические паспорта сортов яблони: 'Василиса', 'Золотое Летнее', 'Кармен'**
Table 1. **Genetic certificates of the apple-tree cultivars 'Vasilisa', 'Zolotoye Letneye' and 'Karmen'**

Название сорта / Cultivar name	**'Василиса' / 'Vasilisa'**	**'Золотое Летнее' / 'Zolotoye Letneye'**	**'Кармен' / 'Karmen'**
Авторы / Authors	Дутова Л.И., Седов Е.Н., Жданов В.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Ульяновская Е.В., Махно Л.В., Причко Т.Г.	Дутова Л.И., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Махно Л.В., Причко Т.Г.	Дутова Л.И., Седов Е.Н., Жданов В.В., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Махно Л.В., Причко Т.Г.
Происхождение / Origin	'Прима' × 'Уэлси' тетраплоидный	сеянец от свободного опыления сорта 'Голден Делишес' тетраплоидный	'Прима' × 'Уэлси' тетраплоидный
Год внесения в Госреестр / Year when listed in the State Register	2013	2011	2014
Код в Госреестре / State Register code	9609633	9906703	9610501
Регион допуска / Region where admitted for usage	6	6	6
Срок созревания / Maturation period	по	ле	ос
Номенклатурный стандарт / Nomenclatural standard	WIR-104535	WIR-104536	WIR-104537
SSR-локусы / SSR loci	размер аллелей (пн)	размер аллелей (пн)	размер аллелей (пн)
CH03d07	209:209	191:191	209:209
CH05e03	189:189	167:183	183:189
CH03a04	96:102	102:118	102:118
CN581493	202:230	192:202	202:218
CH01f03b	162:162	144:174	162:162
CH04e03	190:208	190:204	190:204
CN445290	232:232	232:244	232:232
CH01h01	120:122	120:124	122:124
CH01f03b	162:162	144:174	162:162
CH02c06	236:236	240:252	236:240
NZ05g08	103:127	133:139	127:149
CH05f06	187:191	181:183	183:191

Примечание: * – данные по году, коду в Госреестре, региону допуска, сроку созревания приведены по Госреестру (State Register..., 2022)

Note: * – data on the year, the State Register code, region where admitted for usage, and maturation period are presented according to the State Register (State Register..., 2022)

Таблица 2. Генетические паспорта сортов яблони: 'Красный Янтарь', 'Союз', 'Рассвет', 'Фея'
Table 2. Genetic certificates of the apple-tree cultivars 'Krasny Yantar', 'Soyuz', 'Rassvet' and 'Feya'

Название сорта / Cultivar name	'Красный Янтарь' / 'Krasny Yantar'	'Союз' / 'Soyuz'	'Рассвет' / 'Rassvet'	'Фея' / 'Feya'
Авторы / Authors	Дутова Л.И., Седов Е.Н., Жданов В.В., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Седышева Г.А., Махно Л.В., Причко Т.Г.	Дутова Л.И., Седов Е.Н., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Жданов В.В., Седышева Г.А., Серова З.М., Махно Л.В., Причко Т.Г.	Дутова Л.И., Седов Е.Н., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Жданов В.В., Седышева Г.А., Серова З.М., Махно Л.В., Причко Т.Г.	Дутова Л.И., Ульяновская Е.В., Рагулина Т.В., Махно Л.В., Причко Т.Г.
Происхождение / Origin	'Редфри' × 'Папировка' тетраплоидная	'Редфри' × 'Папировка' тетраплоидная	'Редфри' × 'Папировка' тетраплоидная	'Мантет' × 'Папировка' тетраплоидная
Год внесения в Госреестр / Year when listed in the State Register	2006**	2019	2008**	2019
Код в Госреестре / State Register code	9358837	9154601	9154603	9252633
Регион допуска / Region where admitted for usage	6	6	6	6
Срок созревания / Maturation period	рл	ле	рл	рл
Номенклатурный стандарт / Nomenclatural standard	WIR-104538	WIR-104540	WIR-104539	WIR-104541
SSR-локусы / SSR loci	размер аллелей (пн)	размер аллелей (пн)	размер аллелей (пн)	размер аллелей (пн)
CH03d07	191:229	209:221:229	221:229	191:229
CH05e03	169:189	169:179:189	169:177	169:177
CH03a04	102:118	102:118	116:116	96:102
CN581493	202:218	192:202	192:202	192:192
CH01f03b	174:184	174:184	174:174	144:150
CH04e03	204:204	184:204	184:204	200:212
CN445290	232:232	232:252	238:252	232:248
CH01h01	118:124	118:122:124	118:120	118:120
CH01f03b	174:184	174:184	174:174	144:150
CH02c06	230:236	202:230:236	202:202	218:254
NZ05g08	149:167	135:149:167	139:167	103:135
CH05f06	173:183	173:183:191	187:191	179:185

Примечание: * – данные по году, коду в Госреестре, региону допуска, сроку созревания приведены по Госреестру (State Register..., 2022); ** – данные по Госреестру охраняемых селекционных достижений

Note: * – data on the year, the State Register code, region where admitted for usage, and maturation period are presented according to the State Register (State Register..., 2022); ** – data according to the State Register of Protected Breeding Achievements

References / Литература

Bagmet L.V., Chepinoga I.S., Trifonova A.A., Boris K.V., Shlyavas A.V. Nomenclature standards and DNA barcoding of apple varieties originated by VIR Crimean Experimental Breeding Station. *Horticulture and Viticulture*. 2021;(6):5-16. [in Russian] (Багмет Л.В., Чепинога И.С., Трифонова А.А., Борис К.В., Шлявас А.В. Номенклатурные стандарты и генетические паспорта сортов яблони селекции Крымской опытно-селекционной станции ВИР. *Садоводство и виноградарство*. 2021;(6):5-16). DOI: 10.31676/0235-2591-2021-6-5-16

Bagmet L.V., Shlyavas A.V. Nomenclatural standards of apple cultivars bred at the Pavlovsk experiment station of VIR. *Vavilovia*. 2021;4(1):3-24. [in Russian] (Багмет Л.В., Шлявас А.В. Номенклатурные стандарты сортов яблони селекции Павловской опытной станции ВИР. *Vavilovia*. 2021;4(1):3-24). DOI: 10.30901/2658-3860-2021-1-3-24

Belozor N.I. Herbarization of cultivated plants (Guidelines) (Gerbarizatsiya kulturnykh rasteniy [Metodicheskiye ukazaniya]). Leningrad: VIR; 1989. [in Russian] (Белозор Н.И. Гербаризация культурных растении (Методические указания). Ленинград: ВИР; 1989).

Brickell C.D., Alexander C., Cubey J.J., David J.C., Hoffman M.H.A., Leslie A.C., Malécot V., Jin X. (eds). International Code of Nomenclature for Cultivated Plants. 9th ed. *Scripta Horticulturae*. 2016;18:1-190.

Federal Law of December 30, 2021, No. 454-FZ "On Seed Production" (Federalny zakon ot 30.12.2021 g. № 454-FZ "O semenovodstve"). Moscow; 2021. [in Russian] (Федеральный закон от 30.12.2021 г. № 454-ФЗ «О семеноводстве». Москва; 2021). URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/47481/page/1 [дата обращения: 02.06.2023].

International COMECON list of descriptors for the subfamily Maloideae (genera *Malus* Mill., *Pyrus* L., *Cydonia* Mill.). Leningrad; 1989. [in Russian] (Широкий унифицированный классификатор СЭВ подсемейства Maloideae родов *Malus* Mill., *Pyrus* L., *Cydonia* Mill. Ленинград; 1989).

Murray M.G., Thompson W.F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA. *Nucleic Acids Research.* 1980;8(19):4321-4325. DOI: 10.1093/nar/8.19.4321

Savelieva N.N., Yushkov A.N., Akimov M.Yu., Zemisov A.S. Economical efficiency of cultivation of new apple varieties bred in I.V. Michurin Federal Scientific Centre. *Contemporary Horticulture*. 2017;3(23):56-59. [in Russian] (Савельева Н.Н., Юшков А.Н., Акимов М.Ю., Земисов А.С. Экономическая эффективность выращивания новых сортов яблони селекции «ФНЦ им. И.В. Мичурина». *Современное садоводство*. 2017;3(23):56-59). DOI: 10.24411/2218-5275-2017-00016

Savelyev N.I., Savelyeva N.N., Yushkov A.N. Promising apple varieties immune to scab (Perspektivnye immunnye k parshe sorta yabloni). Michurinsk; 2009. [in Russian] (Савельев Н.И., Савельева Н.Н., Юшков А.Н. Перспективные иммунные к парше сорта яблони. Мичуринск; 2009).

Sedov E.N. (ed.). Pomology: In 5 volumes. Vol. 1. Apple tree (Pomologiya: V 5-ti tomakh. T. 1. Yablonya). Moscow: Russian Academy of Sciences; 2020. [in Russian] (Помология: В 5-ти томах, Т. I. Яблоня / под. ред. Е.Н. Седова. Москва: РАН; 2020).

Sedov E.N., Zhdanov V.V. Scab resistance of apple trees (cultivars and breeding) (Ustoychivost yabloni k parshe [sorta i selektsiya]). Orel: Priokskoye Book Publishers; 1983. [in Russian] (Седов Е.Н., Жданов В.В. Устойчивость яблони к парше (сорта и селекция). Орел: Приокское книжное издательство; 1983).

Shlyavas A.V., Telezhinskiy D.D., Bagmet L.V. Nomenclatural standards of apple cultivars developed at Sverdlovsk Horticultural Breeding Station. Part I. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):102-107. [in Russian] (Шлявас А.В., Тележинский Д.Д., Багмет Л.В. Номенклатурные стандарты сортов яблони селекции Свердловской селекционной станции садоводства. Часть 1. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):102-107). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-102-107

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: 02.06.2023].

Suprun I.I. Optimized methodology for microsatellite genotyping of apple and pear (Optimizirovannaya metodika mikrosatellitnogo genotipirovaniya yabloni i grushi). In: *Modern methodology and tools for assessing and selecting breeding material for horticultural crops and grapes: monograph* (Sovremennye metodologiya, instrumentariy otsenki i otbora selektsionnogo materiala sadovykh kultur i vinograda: monografiya). Krasnodar; 2017. p.188-196. [in Russian] (Супрун И.И. Оптимизированная методика микросателлитного генотипирования яблони и груши. В кн.: *Современные методология, инструментарий оценки и отбора селекционного материала садовых культур и винограда: монография.* Краснодар; 2017. С.188-196).

Ulyanovskaya E.V., Shadrina Zh.A., Kochyan G.A., Dzitsoyeva R.M., Atabiyev K.M. Complex assessment of agric and biological signs and economic efficiency of new appletree varieties, steady against scab, under the conditions of Northern Ossetia-Alania. *Fruit Growing and Viticulture of South Russia*. 2016;39(3):1-11. [in Russian] (Ульяновская Е.В., Шадрина Ж.А., Кочьян Г.А., Дзицоева Р.М., Атабиев К.М. Комплексная оценка агробиологических признаков и экономической эффективности новых устойчивых к парше сортов яблони в условиях Северной Осетии-Алании. *Плодоводство и виноградарство Юга России*. 2016;39(3):1-11).

Информация об авторах

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

Иван Иванович Супрун, кандидат биологических наук, заведующий научным центром, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, supruni@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0355-8395

Татьяна Валерьевна Богданович, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, tatyanka-bogdanovich@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-9677-9891

Евгения Анатольевна Чернуцкая, младший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ev.belenko95@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5140-9891

Сергей Вячеславович Токмаков, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Северо-Кавказский федеральный научный центр садоводства, виноградарства, виноделия, 350901 Россия, Краснодар, ул. 40 лет Победы, 39, ad-a-m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2092-7757

Галина Владимировна Таловина, 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, gtalovina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6167-1455

Information about the authors

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

Ivan I. Suprun, Cand. Sci. (Biology), Head of a Research Center, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, supruni@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0355-8395

Tatyana V. Bogdanovich, Cand. Sci. (Agriculture), Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, tatyanka-bogdanovich@mail.ru, https://orcid.org/0009-0009-9677-9891

Evgenia A. Chernutskaya, Associate Researcher, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, ev.belenko95@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5140-9891

Sergey V. Tokmakov, Cand. Sci. (Biology), Head of a Laboratory, North Caucasian Federal Scientific Center of Horticulture, Viticulture, Wine-making, 39 40 let Pobedy St., Krasnodar 350901, Russia, ad-a-m@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-2092-7757

Galina V. Talovina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, gtalovina@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6167-1455

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.07.2023; одобрена после рецензирования 15.09.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 27.07.2023; approved after reviewing on 15.09.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 577.21:633.11:632.937
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-190-204

CC BY

Разнообразие дагестанской популяции возбудителя желтой ржавчины пшеницы по вирулентности

Е. И. Гультяева[1], Е. Л. Шайдаюк[1], Р. Е. Смирнова[1], К. М. Абдуллаев[2], К. У. Куркиев[2]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, Дербент, Россия*

Автор, ответственный за переписку: Елена Ивановна Гультяева, eigultyaeva@gmail.com

Актуальность. В последние годы в Дагестане на образцах *Triticum* L. наблюдается высокое развитие желтой ржавчины, что позволяет отобрать высокоустойчивые генотипы. Информация об эффективности *Yr*-генов, вирулентности и расовом составе патогена необходима для корректной интерпретации результатов полевых оценок. Цель работы – охарактеризовать вирулентность дагестанской популяции *Puccinia striiformis* West. в фазе проростков; оценить устойчивость линий и сортов-дифференциаторов к желтой ржавчине в полевых условиях; провести идентификацию инвазивных рас *PstS1* и *PstS2*.

Материалы и методы. Листья с урединиопустулами собраны с образцов мягкой пшеницы на Дагестанской опытной станции ВИР в 2020–2022 гг. Анализ вирулентности проводили в лабораторных условиях с использованием 14 Av*Yr*-линий (Avocet NIL) и 15 сортов-дифференциаторов. Возрастную устойчивость тестеров вирулентности оценили в полевых условиях на высоком естественном инфекционном фоне. Набор SCAR-маркеров (SCP19M24a1, SCP19M24a2, SCP19M26a1, SCP19M26a2) применили для идентификации инвазивных рас.

Результаты и обсуждение. Устойчивость ко всем изолятам показали линии Av: *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24*, *Yr26* и сорт 'Moro' (*Yr10*, *YrMor*). Вирулентностью к *Yr17* обладали изоляты с сортов 'Граф' и 'Сварог', несущих этот ген, и с сорта 'Siete Cerros'. Дагестанская коллекция изолятов *P. striiformis* характеризовалась высоким генетическим разнообразием. Общие фенотипы отмечены на сорте 'Граф' в 2021 и 2020 г. Линии с генами *Yr5*, *Yr8*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24* и сорта 'Moro', 'Compair', 'Carstens', 'Spaldings Prolific' характеризовались резистентностью к желтой ржавчине в полевых условиях во все годы исследований. Сорта 'Reichersberg 42', 'Heines Peko Vilmorin 23' были устойчивы в 2020 и 2022 г. и умеренно поражены (до 10%) в 2021 г. При молекулярном анализе выделено три изолята, относящихся к инвазивной группе *PstS2*. В 2021 г. эти изоляты обнаружены на сорте 'Siete Cerros' и линии Л 650, в 2022 г. – на сорте 'Васса'.

Ключевые слова: *Triticum aestivum*, *Puccinia striiformis*, *Yr*-гены, популяция, устойчивость

Благодарности: все фитопатологические и молекулярно-генетические исследования патогена выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-26-00042. Урединиообразцы *P. striiformis* были собраны с образцов пшеницы, изучаемых в Дербенте 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: Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Смирнова Р.Е., Абдуллаев К.М., Куркиев К.У. Разнообразие дагестанской популяции возбудителя желтой ржавчины пшеницы по вирулентности. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):190-204. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-190-204

© Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Смирнова Р.Е., Абдуллаев К.М., Куркиев К.У., 2023

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-190-204

Virulence diversity of the yellow rust pathogen population in Dagestan

Elena I. Gultyaeva[1], Ekaterina L. Shaydayuk[1], Regina E. Smirnova[1], Kadyr M. Abdullaev[2], Kishtili U. Kurkiev[2]

[1] *All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia*

[2] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Dagestan Experimental Station of VIR, Derbent, Russia*

Corresponding author: Elena I. Gultyaeva, eigultyaeva@gmail.com

Background. Yellow rust incidence on *Triticum* L. has been observed to surge up in Dagestan in recent years, facilitating selection of highly resistant genotypes. Information on the effectiveness of *Yr* genes and the pathogen's virulence and racial composition is needed to interpret field assessment data correctly. The objective of this study was to describe the virulence of the Dagestan population of *Puccinia striiformis* West. at the seedling stage, evaluate the resistance of differentiators to yellow rust in the field, and identify invasive *PstS1* and *PstS2* races.

Materials and methods. Leaves with urediniopustules were collected from bread wheat accessions at Dagestan Experiment Station of VIR (DES VIR) in 2020–2022. Virulence was analyzed in the laboratory using 14 Av*Yr* lines (Avocet NIL) and 15 differential wheat cultivars. Age-specific resistance of virulence testers under high natural infection pressure was studied in the field of DES VIR. A set of SCAR markers (SCP19M24a1, SCP19M24a2, SCP19M26a1, and SCP19M26a2) were used to identify invasive races.

Results and discussion. Avocet lines with *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24*, and *Yr26,* and cv. 'Moro' (*Yr10*, *YrMor*) manifested resistance to all isolates. Virulence to *Yr17* was detected only in the isolates from cvs. 'Graf' and 'Svarog' carrying this gene, and 'Siete Ceros'. The Dagestan collection demonstrated high genetic diversity. Common phenotypes were identified on cv. 'Graf' in 2021 and 2020. There was no temporal differentiation between pathogen collections in the years of testing. High field resistance to yellow rust was recorded in lines with *Yr5*, *Yr8*, *Yr10*, *Yr15* and *Yr24*, and in cvs. 'Moro', 'Compair', 'Carstens' and 'Spaldings Prolific'. Cvs. 'Reichersberg 42' and 'Heines Peko Vilmorin 23' were resistant in 2020 and 2022, and moderately affected (up to 10%) in 2021. Molecular analysis identified all three isolates belonging to the invasive *PstS2* group on cv. 'Siete Cerros' and L 650 in 2021, and cv. 'Vassa' in 2022.

Keywords*: Triticum aestivum*, *Puccinia striiformis*, *Yr* genes, population, resistance

Acknowledgements: all phytopathological and molecular genetics studies of the pathogen were supported by the Russian Science Foundation, Project No. 23-26-00042. Samples of *P. striiformis* urediniospores were collected from wheat accessions studied in Derbent within the framework of the state task assigned to 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: Gultyaeva E.I., Shaydayuk E.L., Smirnova R.E., Abdullaev K.M., Kurkiev K.U. Virulence diversity of the yellow rust pathogen population in Dagestan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):190-204. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-190-204

Введение

Дагестанская опытная станция – филиал ВИР (ДОС ВИР) создана в 1935 г. Расположена она на берегу Каспийского моря, недалеко от г. Дербент. Природно-климатические условия местности благоприятны для возделывания многих сельскохозяйственных культур, включая зерновые. На станции ежегодно проводится размножение и изучение образцов мировой коллекции рода *Tricitum* L. по хозяйственно ценным признакам и устойчивости к болезням. Климатические условия зоны (относительно теплые зимы, влажный приморский воздух в весенне-летний период) способствуют успешному развитию не только зерновых, но и их патогенов, среди которых доминирует ржавчина.

Бурая ржавчина (возбудитель – *Puccinia triticina* Erikss.) являлась наиболее распространенной и вредоносной болезнью для образцов *Triticum* и *Aegilops* L. в условиях Дагестана до недавнего времени (Mikhailova et al., 1997; Gultyaeva et al., 2018). Желтая (*P. striiformis* West.) и стеблевая (*P. graminis* Pers.) ржавчины отмечались спорадически в благоприятные для развития этих болезней годы. В последнее время фитосанитарная ситуация в регионе изменилась: вредоносность желтой ржавчины нарастает, а бурой снижается. Сходная ситуация отмечается в других регионах РФ, например в Северо-Западном (Shaydayuk et al., 2021), в приграничном Азербайджане (Hasanova, Rustamov, 2019) и ряде стран мира (Wellings, 2007; Milus et al., 2009; Chen et al., 2021; Bouvet et al., 2022). Частично это обусловлено тем, что желтая ржавчина проявляется раньше бурой и характеризуется более высокой вредоносностью (Chen, 2005; Milus et al., 2009; Sinha, Chen, 2021). Быстрое распространение *P. striiformis* обуславливает преждевременное усыхание листьев пшеницы, что ограничивает развитие других видов *Puccinia*.

Возбудитель желтой ржавчины поражает пшеницу, рожь, ячмень, злаковые травы и сорняки. Гриб сохраняется в форме урединиомицелия на озимых культурах (при поражении их с осени), на многолетних злаковых травах и может заноситься с воздушными потоками из других регионов. Промежуточные хозяева *P. striiformis* – барбарис (*Berberis* spp.) и магония (*Mahonia aquifolium* (Pursh) Nutt.) (Zhao et al., 2013; Wang, Chen, 2013). Показано более высокое разнообразие популяций патогена по вирулентности в регионах произрастания промежуточных растений-хозяев (Hovmøller et al., 2016).

Биологические особенности *P. striiformis* отличаются от *P. triticina* и *P. graminis*. Гриб успешно развивается в диапазоне температур от 2 до 15°С и при высокой влажности воздуха. В 1980-х годах в Северной Африке появились новая группа рас – *PstS1* и *PstS2*, способная развиваться при высоких температурах и характеризующаяся высокой агрессивностью (Walter et al., 2016). Высокая миграционная способность способствовала успешному распространению этих рас воздушными потоками по странам и континентам. Изоляты расы *PstS1* широко представлены в Восточной Африке. В годы эпифитотий они доминируют в США и Австралии. Группа *PstS2* – сестринская линия *PstS1*. Ареал ее значительно шире. В 1990-е годы она была отмечена на Ближнем Востоке и в Северной Африке, в 2002 г. – в Западной Европе, в 2003 г. – в Западной и Центральной Азии (Walter et al., 2016). В 2015–2016 гг. изоляты расы *PstS2* зафиксированы в Азербайджане (https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/wheatrust). В 2020 г. они впервые обнаружены на северо-западе России (Ленинградская обл.) (Shaydayuk et al., 2021).

Высокое развитие желтой ржавчины в естественных условиях ДОС ВИР позволяет провести оценку устойчивости коллекций *Triticum* и *Aegilops* spp. и отобрать устойчивые генотипы. Анализ эффективности *Yr*-генов необходим для корректной интерпретации результатов полевых оценок. Характеристика расового состава *P. striiformis* на районированных и перспективных образцах пшеницы позволяет оценить их влияние на естественный отбор патогена и спрогнозировать фитосанитарную ситуацию с желтой ржавчиной в регионах широкого возделывания этих сортов.

Цель данных исследований – охарактеризовать вирулентность дагестанской популяции *P. striiformis* в фазе проростков; оценить устойчивость линий и сортов-дифференциаторов к желтой ржавчине в полевых условиях; провести идентификацию инвазивных рас *PstS1* и *PstS2* с использованием молекулярных маркеров.

Материалы и методы

Материал исследований включал листья с урединиопустулами *P. striiformis*, собранные на образцах мягкой пшеницы на ДОС ВИР в 2020–2022 гг. (с 30 образцов и более ежегодно). Акцент при сборе материала делали на российские районированные и перспективные сорта мягкой пшеницы с разной степени поражения болезнью (рис. 1). Работа с возбудителем желтой ржавчины в лабораторных условиях осложнена быстрой потерей жизнеспособности спор в гербарном материале (на сухих листьях). Это лимитирует проведение популяционных исследований *P. striiformis* во всем мире (El Amil et al., 2020; https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/wheatrust). В 2020 г. нам удалось размножить урединиоматериал только с трех образцов пшеницы, в 2021 – с 19, в 2022 – с 13 (табл. 1).

Размножение инфекционного материала, выделение монопустульных изолятов и изучение вирулентности проводили по ранее описанной методике (Gultyaeva, Shaydayuk, 2020). Для возобновления спороношения патогена подсушенные листья пшеницы с урединиоустулами разрезали на отрезки и раскладывали в чашки Петри. С одной стороны отрезки прикрывали ватным валиком, смоченном в растворе 0,004-процентного бензимидазола (Mikhailova et al., 1998). На 2–4 дня чашки помещали в холодильник (3–5°С). В жизнеспособном материале в течение 2-3 дней наблюдали появление свежего спороношения гриба.

Для размножения инфекционного материала использовали микрокамеры. Отрезки листьев с урединиопустулами прикладывали к 10–14 дневным растениям восприимчивого сорта ‘Michigan Amber’ и закрепляли с помощью пищевой пленки. Сосуды с растениями помещали в темную камеру с температурой 10°С и влажностью 100%. Спустя сутки пленку убирали, а растения переносили в климатическую камеру Versatile Environmental Test Chamber MLR-352H со следующими параметрами: 16 часов – день (освещение 15000–20000 лк), температура 16°С; 8 часов – ночь, температура 10°С. Первые симптомы отмечали через 12–14 дней после заражения. Споры собирали на 17–20-й день с помощью вакуумного насоса со специальной насадкой. Листья с отдельными урединиопустулами использовали для получения монопустульных изолятов.



Рис. 1. Пораженность сортов мягкой пшеницы возбудителем желтой ржавчины в Дагестане в 2022 г.: а) 'Влади', б) 'Граф', в) 'Гречанка', г) 'Тимирязевская Юбилейная'

Fig. 1. Bread wheat cultivars affected by the yellow rust pathogen in Dagestan in 2022: а) 'Vladi'; б) 'Graf'; в) 'Grechanka'; г) 'Timiryazevskaya Yubileynaya'

Вирулентность анализировали с помощью сборного инокулюма и монопустульных изолятов. В 2020 г. от каждого инфекционного образца было получено по пять монопустульных изолятов, в 2021–2022 гг. – по два. Суспензирование спор проводили в малотоксичной для растений жидкости NOVEC 7100 (концентрация – 10^6 спор/мл) и опрыскивали 10–12-дневные растения дифференциаторов. Дальнейшее инкубирование зараженных наборов проводили в тех же условиях, что и при размножении инфекционного материала.

Анализ вирулентности выполнен на почти изогенных линиях сорта 'Avocet' (Av NIL): *Yr1*, *Yr5*, *Yr6*, *Yr7*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr18*, *Yr24*, *Yr26*, *YrSp*, *Yr27* и сортах-дифференциаторах из международного [Chinese 166 (*Yr1*), Lee (*Yr7*, *Yr+*), Heines Kolben (*Yr6*, *Yr+*), Vilmorin 23 (*Yr3*), Moro (*Yr10*, *YrMor*), Strubes Dickkopf (*YrSD*, *Yr25*, *Yr+*), Suwon 92/Omar (*YrSu*, *Yr+*)] и европейского [Hybrid 46 (*Yr4*, *Yr+*), Reichersberg 42 (*Yr7*, *Yr+*), Heines Peko (*Yr2*, *Yr6*, *Yr25*, *Yr+*), Nord Desprez (*Yr3*, *YrND*, *Yr+*), Compair (*Yr8*, *Yr19*), Carstens V (*Yr32*, *Yr25*, *Yr+*), Spaldings Prolific (*YrSP*, *Yr+*), Heines VII (*Yr2*, *Yr25*, *Yr+*)] наборов. Тип реакции определяли по шкале G. Gassner и W. Straib (1926). Растения с баллами 0–2 относили к устойчивым, а 3, 4 и X – к восприимчивым.

Всего охарактеризовано 79 изолятов, в том числе 15 – в 2020, 38 – в 2021, 26 – в 2022 г.

Фенотипы изолятов *P. striiformis* определяли на 29 тестерах вирулентности (14 – Av NIL, 15 – сорта-дифференциаторы) с использованием пакета программ GenAlEx (опция Multilocus, Matches). Применяли международную номенклатуру обозначения рас на 15 сортах-дифференциаторах. При этом устойчивый тип реакции (R) обозна-

Таблица 1. **Характеристика инфекционного материала *Puccinia striiformis* West., собранного в Дагестане в 2000–2022 гг.**

Table 1. **Description of the *Puccinia striiformis* West. infection material collected in Dagestan in 2000–2022**

Год сбора	Образцы пшеницы – источники инфекционного материала *P striiformis*			
	Образец	**Происхождение**	**Пораженность (%)***	***Yr*-гены**
2020	к-56547	Узбекистан	40–60	
	Van	Армения	40–60	
	Berecet	Турция	40–60	
2021	Веха	Россия	1–55	*Yr9*
	Вид	Россия	1–5	*Yr9, Yr18*
	Велена	Россия	1–5	*Yr9*
	Вольница	Россия	30–40	*Yr18*
	Вольный Дон	Россия	15–20	*Yr18*
	Граф	Россия	1–5	*Yr17*
	Жива	Россия	1–5	*Yr9, Yr18*
	Караван	Россия	10–20	*Yr9*
	Сварог	Россия	1–5	*Yr17*
	Степь	Россия	1–5	*Yr9*
	Лютесценс Л 242-97-2-45	Россия	1–5	
	Лютесценс Л 363-96-4	Россия	80–90	
	Лютесценс Л-199	Россия	10–20	
	Лютесценс Л-300	Россия	1–5	
	Лютесценс Л-600-10	Россия	80-90	
	Эритроспермум Л 22912	Россия	10–20	
	Эритроспермум Л 313-01-1	Россия	100	
	Грекум Л 650	Россия	10–20	
	Cieto Cerros	CIMMYT	60–80	
2022	Безостая 100	Россия	1–5	*Yr9, Yr18*
	Богема	Россия	1–5	
	Васса	Россия	1–5	*Yr9*
	Влади	Россия	20-40	
	Волшебница	Россия	1–5	
	Вольный Дон	Россия	1–5	*Yr18*
	Граф	Россия	5–30	*Yr17*
	Жаворонок	Россия	1–5	*Yr18*
	Степь	Россия	1–5	*Yr9*
	Тимирязевская Юбилейная	Россия	50–70	
	Гречанка	Россия	60–100	
	Michigan Amber	США	70–90	
	Jupateco	Мексика	100	

Примечание: * – пораженность образцов пшеницы в полевых условиях

Note: * – disease severity on wheat accessions in the field

чается как 0, восприимчивый (S) – 1; используется десятичная система обозначения каждого сорта (первый дифференциатор – 2^0, второй – 2^1, третий – 2^2 и т. д.). Суммарное значение является номером расы (если восприимчив только первый дифференциатор (2^0) – раса 1, если первый и второй (2^0+2^1), то раса 3, и т. д.). В аббревиатуре расы сначала указывается номер по международному набору, затем номер по европейскому набору с приставкой Е (например, 1Е3) (Gultyaeva, Shaydayuk, 2020).

Оценку генетических дистанций между изолятами патогена с разных образцов пшеницы проводили в программе GenAlEx (опция Distance, Genetic).

В 2020–2022 гг. в полевых условиях изучили возрастную устойчивость дифференциаторов к возбудителю желтой ржавчины. Для оценки использовали модифицированную шкалу Кобба (McIntosh et al.,1995). Во все годы отмечено высокое развитие бурой ржавчины в естественных условиях. Пораженность восприимчивого контроля достигала 60–100%.

Набор SCAR-маркеров (SCP19M24a1, SCP19M24a2, SCP19M26a1, SCP19M26a2) использовали для идентификации инвазивных рас. Результаты интерпретировали по следующему принципу: изоляты, относящиеся к группе *PstS1*, имеют ампликоны со всеми использованными маркерами: SCP19M24a1 (485 пн), SCP19M24 a2 (385 пн), SCP19M26a1 (491 пн), SCP19M26a2 (262 пн), изоляты группы *PstS2* – с маркерами SCP19M24a1, SCP19M24a2 и SCP19M26a2. Экстракция ДНК из монопустульных изолятов выполнена по методике A. F. Justesen et al. (2002). Параметры, предложенные S. Walter et al. (2016), применяли для постановки ПЦР

Результаты и обсуждение

Тип реакции изолятов *P. striiformis*, выделенных с разных сортов пшеницы, на линиях и сортах-дифференциаторах представлен в таблице 2.

Устойчивость ко всем изолятам показали линии Av: *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24*, *Yr26* и сорт 'Moro' (*Yr10*, *YrMor*). Вирулентность к *Yr17* выявлена у изолятов с сортов 'Граф' и 'Сварог', несущих этот ген, и с сорта 'Siete Cerros'. Линии с генами *Yr6*, *Yr8*, *Yr6* и сорт 'Heines Kolben' (*Yr6*, *Yr2*) восприимчивы ко всем изученным изолятам (100%). Авирулентность к линии Av*Yr9* наблюдали у изолятов, полученных с универсально восприимчивых сортов 'Jupateco' и 'Michigan Amber'. Высокое варьирование по вирулентности отмечено на других сортах-дифференциаторах и *Yr*-линиях.

Различия по типу инфекции при заражении дифференциаторов сборным инокулюмом с одного сорта и полученными с него монопустульными изолятами не выявлены. Это указывает на то, что в мелкоделяночных опытах на одном сорте отбираются сходные по вирулентности изоляты. Данная информация согласуется с представленной в мировой литературе для бурой ржавчины (Fontyn et al., 2022). C. Fontyn et al. (2022) показали, что расовый состав *P. triticina* на сортах пшеницы, первично изучаемых на селекционных станциях во Франции, существенно не отличался от формирующегося в посевах при дальнейшем их коммерческом возделывании. Таким образом, информация о вирулентности возбудителя желтой ржавчины на изученных сортах в условиях ДОС ВИР позволяет оценить фитосанитарную ситуацию в производственных посевах при дальнейшем их возделывании.

Инокулюм *P. striiformis* с сортов 'Вольный Дон', 'Степь' и 'Граф' изучали дважды: в 2021 и 2022 г. Различия в расовом составе патогена на сорте 'Граф' не выявлены. Изоляты с сорта 'Вольный Дон' различались по вирулентности к сортам-дифференциаторам 'Strubes Dickkopf' и 'Nord Desprez' (2021 г. – восприимчивость, 2022 г. – устойчивость). Изоляты с сорта 'Степь' были вирулентны к линии Av*YrSP* и сорту 'Heines VII' в 2021 г. и авирулентны в 2022 г.

Динамика вирулентности дагестанской популяции *P. striiformis* в 2020–2022 гг. показана в таблице 3. Варьирование частот вирулентности от 50 до 100% наблюдали на линиях Av: *Yr8*, *Yr18*, *Yr27*, *YrSp* и сортах 'Lee', Suwon 92/ Omar, 'Hybrid 46', 'Reichersberg 42', 'Heines Peko', 'Compair' 'Heines VII'. Вирулентность к линии Av*Yr1* и сортам 'Chinese 166', 'Strubes Dickkopf' была на сходном уровне в 2020 и 2021 г. и незначительно снизилась в 2022 г. Частота изолятов, вирулентных к линии Av*Yr7* и сортам 'Spaldings Prolific', 'Vilmorin 23', была выше в 2020 г., чем в последующий период.

Дагестанская коллекция *P. striiformis* характеризовалась высоким генетическим разнообразием во все годы исследований. Тридцать фенотипов вирулентности выявлено среди 79 изолятов при использовании 29 тестеров вирулентности (табл. 4). Число аллелей вирулентности варьировало от 11 до 20. Общие фенотипы в 2021 г. отмечены на сортах 'Веха' и 'Велена', 'Вольница' и 'Вольный Дон', 'Граф' и 'Сварог'; в 2022 г. – на сортах 'Волшебница' и 'Жаворонок', а в 2021 и 2022 г. – на сорте 'Граф'.

При использовании меньшего числа тестеров вирулентности (международного и европейского набора сортов-дифференциаторов) число общих рас было выше. Раса 102Е183 отмечена на сорте 'Граф' в 2021 и 2022 г. и на сортах 'Сварог' и 'Безостая 100' в 2022 г. В 2021 г. общая раса 111Е247 определена на сортах 'Вольница', 'Вольный Дон', линии Л 650; раса 39 Е183 – на сортах 'Веха', 'Велена'; раса 70Е151 – на линиях Л 199, Л 600-10. В 2022 г. раса 70Е20 была общей для сортов 'Волшебница' и 'Жаворонок'.

Генетическое сходство между изолятами *P. striiformis* на разных образцах пшеницы показано на многомерной диаграмме (рис. 2). Большинство изолятов на ней обединились в единую группу. Умеренно отличались от основной группы изоляты с сортов 'Жаворонок' (5_22), 'Волшебница' (9_22) и 'Michigan Amber' (13_22), которые характеризовались меньшим числом аллелей вирулентности. Временная дифференциация образцов патогена в 2020–2022 гг. не выявлена.

Пораженность дифференциаторов в полевых условиях на естественном инфекционном фоне показана в таблице 5. Развитие болезни на восприимчивом контроле было стабильно высоким во все годы исследований. Резистентность к желтой ржавчине отмечена у линий Av: *Yr5*, *Yr8*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr24* и сортов 'Moro', 'Compair' 'Carstens' и 'Spaldings Prolific'. Сорта 'Reichersberg 42', 'Heines Peko Vilmorin 23' показали устойчивость к болезни в 2020 и 2022 г. и умеренную пораженность (менее 10%) в 2021 г.

Молекулярный анализ дагестанских изолятов *P. striiformis* не выявил представителей инвазивной группы *PstS1*. При этом обнаружено три изолята, относящихся к группе *PstS2*. В 2021 г. они отмечены на сорте 'Siete Cerros' и линии Л 650, в 2022 г. – на сорте 'Васса'. У этих изолятов амплифицировались маркеры SCP19M24a1, SCP19M24a2 и SCP19M26a2. У остальных изолятов наблюдали фрагменты трех маркеров (SCP19M24a2, SCP19M26a2 и SCP19M24a1) либо двух (SCP19M24a2 и SCP19M26a2), что указывает на отличие их от инвазивных рас *PstS1* и *PstS2* (Walter et al., 2016).

Таблица 2. **Тип реакции линий и сортов-дифференциаторов при инокуляции изолятами *Puccinia striiformis* West. в фазе проростков**

Table 2. **Reaction type of differential lines and cultivars inoculated with *Puccinia striiformis* West. isolates at the seedling stage**

Образец мягкой пшеницы – источник инфекционного материала *P. striiformis*	Тип реакции (балл)																											
	Avocet *Yr1*	Avocet *Yr5*	Avocet *Yr6*	Avocet *Yr7*	Avocet *Yr8*	Avocet *Yr9*	Avocet *Yr10*	Avocet *Yr15*	Avocet *Yr17*	Avocet *Yr18*	Avocet *Yr24*	Avocet *Yr26*	Avocet *YrSP*	Avocet *Yr27*	Chinese 166	Lee	Heines Kolben	Vilmorin	Moro	Strubes Dickkopf	Suwon 92/Omar	Hybrid 46	Reishesberg 42	Heines Peko	Nord Desprez	Compair	Carstens V	Spaldings Prolific	Heines VII
2020 г.																												
Berecet	3	0	3	3	3	3	0	0	2;	3	0	0	3	3	3	3	3	3	0;	3	3	3	3	3	0	3	2;	3	3
Van	0	0	3	3	3	3	0	0	0	3	2;	2;	3	3	2;	3	3	3	0	2;	3	2;	3	3	3	3	2;	3	3
к-56547	3	0	3	0	3	3	0	0	0;	2;	0;	2;	3	3	3	0	3	3	0;	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3
2021 г.																												
Веха	3	0	3	2;	3	3	0;	0	0;	3	0-1;	0-1;	0	3	3	3	3-4	2;	0;	3-4	2;	3	3	3	2;	3	3-4	2;	3-4
Вид	3	0	3	2-3;	3-4	3-4	0	0	0-1;	3	0-1;	0-1;	3	3	3	3-4	3-4	4	0;	3	3	3	3-4	3-4	0;	3	3	2;	3-4
Велена	3	0	3	2;	3	3	0;	0	0;	3	0-1;	0-1;	0	3	3	3	3-4	2;	0;	3-4	2;	3	3	3	2;	3	3-4	2;	3-4
Вольница	3-4	0	3-4	2;	3	3-4	0	0	0;	3-4	1-2;	1-2;	3	3	3-4	3-4	3	3-4	0;	3	3	3-4	3-4	3	0;	3	3-4	3-4	3
Вольный Дон	3	0	3-4	2;	3-4	3-4	0	0	2	3	0-1;	0-1;	3	3	3	3	3	3-4	0;	3	3	3	3-4	3-4	0;	3	3-4	3-4	3-4
Граф	0;	0	3	1-2	3-4	3-4	0;	0	3	3	0-1;	0-1;	3	3	0;	3	3-4	2;	0;	3	3	3-4	3-4	3	0;	3	3	2;	3-4
Жива	3	0	3	2;	3	3-4	0;	0	0;	0	0-1	0-1	0	3	3	3	3	3-4	0;	2;	3	3	3	3-4	2;	3	2;	2;	3-4
Караван	0	0	3	2;	3	3	0;	0	2;	3-4	0-1;	0-1;	3	3	0	3	3-4	2-3;	0;	2;	3	3	3	3	1-2;	3	3	0;	0-1;
Сварог	0;	0	3	1-2	3-4	3-4	0;	0	3	3	0-1;	0-1;	3	3	0;	3	3-4	2;	0;	3	3	3-4	3-4	3	0;	3	3	2;	3-4
Степь	3-4	0	3	2;	3-4	3-4	0	0	0-2;	3	0-1;	0-1;	3	3-4	3	3	3-4	3-4	0	3	3-4	3-4	3-4	3	0	0	3	3	3-4
Л 242-97-2-45	3	0	3	2;	3-4	3-4	0;	0	0-1;	3-4	0;	0	3	2-3	3-4	3	3-4	3-4	0;	3	3	3-4	3	3-4	2;	3-4	3-4	2;	3-4
Л 363-96-4	3	0	3-4	2+	3-4	3-4	0	0	0-1;	3	0;	0;	0;	3	3	3	3	0-1;	0;	0-1;	3-4	3	3-4	3	0	3	0-1;	0-1;	3
Л 199	0	0	3	2	3	3	0	0	0	3	0-1;	0-1;	0	3	0	3-4	3-4	2	0	0	3-4	3-4	3	3-4	0-1;	3-4	0;	2	3
Л 300	0	0	3	2	3-4	3-4	0	0	0-1;	2	0-1;	0-1;	0	3-4	0	3	3	2-3	0	0	3-4	3	3-4	3-4	2;	3	2-3	0	3-4
Л 600-10	0	0	3	2;	4	3	0	0	2;	2	2;	2;	0	3	0	3	3	0;	0;	0	3-4	3	3	3-4	2;	3	0-1;	0-1;	3
Л 22912	3	0	3	1-2;	3-4	3	0	0	0-1;	3	0	0	0	3	3	3	3	2;	0	3	3-4	3	3	3-4	2;	3	0-1;	2;	3

Таблица 2. Окончание

Table 2. The end

Образец мягкой пшеницы – источник инфекционного материала *P. striiformis*	Тип реакции (балл)																											
	Avocet *Yr1*	Avocet *Yr5*	Avocet *Yr6*	Avocet *Yr7*	Avocet *Yr8*	Avocet *Yr9*	Avocet *Yr10*	Avocet *Yr15*	Avocet *Yr17*	Avocet *Yr18*	Avocet *Yr24*	Avocet *Yr26*	Avocet *YrSP*	Avocet *Yr27*	Chinese 166	Lee	Heines Kolben	Vilmorin	Moro	Strubes Dickkopf	Suwon 92/Omar	Hybrid 46	Reishesberg 42	Heines Peko	Nord Desprez	Compair	Carstens V	Spaldings Prolific	Heines VII
2021 г.																													
Л 313-01-1	3	0	3	3	3	3-4	0	0	0-1;	2;	0-1;	0-1;	3	3	3	3	3-4	3-4	0;	3-4	4	4	3-4	3-4	2;	2;	3-4	2;	3-4
Л 650	3	0	3-4	0	3	3	0	0	0	3	0;	0	3	0	3	3	3	2-3;	0	3	3	3	3	3	0	2-3	3	3	3
Siete Cerros	0	0	3	3-4	3	3	0	0	3	3	0-1;	0-1;	0	3-4	0	3-4	3-4	2	0;	3-4	3	3-4	3	3	0;	3	3	3	3-4
2022 г.																													
Безостая 100	0	0	3	2-3	3	3	0;	0	0	3	0	0;	2⁺-3	2⁺-3	0	3	3	2;	0;	2-3	3	3	3-4	3	1-2;	3	2-3	0-2;	3
Богема	3	0	3	2-2⁺	3	3	0;	0	0;-1	3	0;	0-1;	3	3	3	3	3-4	2;	0;	2-2⁺	3	3	2⁺-3	2⁺-3	0;	2-2⁺	2-2⁺	2⁺-3	3
Васса	0	0	3-4	2⁺-3	3	3	0;	0	0-1;	3	0;	0;	3	2⁺-3	0	3	2⁺-3	2;	0	2-3	3	3	3	3	0;	3	2-2⁺	2-2⁺	2⁺-3
Влади	0	0	3	2;	3	3	0	0	2;	3	0	0	1-2;	3	0	3	3	2;	0;	2;	3	2⁺-3	2-3	2-3	0;	3	2-3	2-2⁺	2-2⁺
Волшебница	0	0	3	2;	3-4	3	0;	0	1-2;	3	0	0-1;	3	3	0	3-4	3	2;	0	2;	3	2;	2;	3	0-1;	2-3	2;	0-1;	2;
Вольный Дон	3	0	3	2;	3	3	0;	0	2;	3	0-1;	0-1;	3	3	3	3	3	3	0;	2;	3	3	3	3	0-1;	0-1;	3	3	3
Граф	0;	0	3	2	3	3	0;	0	3	3	0;	0;	3	3	0	3	3	2;	0;	3	3	3	3	3-4	1-2;	2-3	3	1-2;	3
Гречанка	0;	0	3	2-3	2-3	3	0;	0	0	3	0;	1-2;	3	3	0	3	3	2;	0;	3	3	3	3	3	0;	2	3	0-1;	3
Жаворонок	0	0	3	2;	3-4	2⁺-3	0;	0	1-2;	2⁺-3	0;	0;	3	3-4	0	3-4	3	2;	0	2;	3	2;	2;	3	0-1;	2-3	2;	0-1;	2;
Степь	3	0	3	2;	3	3	0	0	2;	3	0;	0;	2;	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	2	0;	3	3	0-1;
Тимирязевская Юбилейная	3	0	3	2;	3	3	0;	0	0;	3	0-1;	0-1;	3	3	3	3	3-4	2;	0;	3	2;	3	3	3	2;	3	3	2	3
Jupateco	3	0	3	1-2;	3	0-1;	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3-4	3-4	2⁺-3	0	2	3	3	2⁺-3	2;	0	0-2;	2⁺-3	0-1;	2⁺-3
Michigan Amber	3	0	3	2;	2⁺-3	0-1;	1-2;	0	1-2;	3	0-1;	0-1;	3	3	0	3	3	1-2;	1-2;	2;	2⁺-3	2;	2-2⁺	1-2;	0;	3	2-3	0-2;	2-2⁺

Примечание: 0 – отсутствие симптомов, 0; – гиперчувствительные пятна; 1 – мелкие пустулы с некрозом, 2, 2; – мелкие, средние пустулы, окруженные некрозом или хлорозом, 3 – среднего размера пустулы без хлороза, 4 – крупные пустулы без хлороза; «–» и «+» – промежуточные типы реакции

Note: 0 – no symptoms, 0; – hypersensitive spots; 1 – small pustules with necrosis, 2, 2; – small or medium-sized pustules surrounded by necrosis or chlorosis, 3 – medium-sized pustules without chlorosis, 4 – large pustules without chlorosis; "–" and "+" – intermediate reaction types

Таблица 3. **Динамика вирулентности *Puccinia striiformis* West. в Дагестане в 2020–2022 гг.**
Table 3. **Virulence dynamics of *Puccinia striiformis* West. in Dagestan in 2020–2022**

Yr-гены	Линия, сорт пшеницы	Частота вирулентных изолятов *P. striiformis* (%)			
		2020	2021	2022	Всего
Yr1	*Yr1*/6*Avocet S	66	63	46	58
Yr5	*Yr5*/6*Avocet S	0	0	0	0
Yr6	*Yr6*/6*Avocet S	100	100	100	100
Yr7	*Yr7*/6*Avocet S	66	16	31	30
Yr8	*Yr8*/6*Avocet S	100	100	100	100
Yr9	*Yr9*/6*Avocet S	100	100	85	95
Yr10	*Yr10*/6*Avocet S	0	0	0	0
Yr15	*Yr15*/6*Avocet S	0	0	0	0
Yr17	*Yr17*/6*Avocet S	0	16	15	13
Yr18	*Yr18*/6*Avocet S	66	79	100	83
Yr24	*Yr24*/6*Avocet S	0	0	0	0
Yr26	*Yr26*/6*Avocet S	0	0	0	0
YrSp	*YrSP*/6*Avocet S	100	53	85	72
Yr27	*Yr27*/6*Avocet S	100	95	100	97
Yr1	Chinese 166	66	63	46	58
Yr7, Yr+	Lee	66	100	100	94
Yr6, Yr2	Heines Kolben	100	100	100	100
Yr3, Yr+	Vilmorin 23	100	53	23	52
Yr10, YrMor	Moro	0	0	0	0
YrSD, Yr25, Yr+	Strubes Dickkopf	67	68	46	61
YrSu, Yr+	Suwon 92/Omar	100	89	92	92
Yr4, Yr+	Hybrid 46	66	100	77	86
Yr7, Yr+	Reichersberg 42	66	100	77	86
Yr2, Yr6, Yr25, Yr+	Heines Peko	100	100	85	95
Yr3, YrND, Yr+	Nord Desprez	66	0	0	13
Yr8, Yr19	Compair	100	89	69	85
Yr32, Yr25, Yr+	Carstens V	33	74	69	65
YrSP, Yr+	Spaldings Prolific	100	26	23	40
Yr2, Yr25, Yr+	Heines VII	100	95	61	85
Восприимчивый контроль	Jupateco S, Avocet S	100	100	100	100
Изучено изолятов патогена		**15**	**38**	**26**	**79**

Таблица 4. **Фенотипический состав *Puccinia striiformis* West. в Дагестане в 2020–2022 гг.**
Table 4. **Phenotypic composition of *Puccinia striiformis* West. in Dagestan in 2020–2022**

Образец	Год изучения	Фенотип*	Раса**	Число аллелей вирулентности***
Berecet	2020	1	111E215	20
Van	2020	2	78E222	17
к-56547	2020	3	109E253	18
Веха	2021	4	39E183	16
Вид	2021	5	111E183	20
Велена	2021	4	39E183	16
Вольница	2021	6	111E247	20
Вольный Дон	2021	6	111E247	20
Граф	2021	7	102E183	17
Жива	2021	8	79E151	15
Караван	2021	9	78E55	15
Сварог	2021	7	102E183	17
Степь	2021	10	111E231	19
Л 242-97-2-45	2021	11	111E183	15
Л 363-96-4	2021	12	71E151	15
Л 199	2021	13	70E151	13
Л 300	2021	14	78E183	14
Л 600-10	2021	15	70E151	12
Л 22912	2021	16	103E151	16
Л 313-01-1	2021	17	111E167	18
Л 650	2021	18	111E247	19
Siete Cerros	2021	10	102E247	18
Безостая 100	2022	18	102E183	17
Богема	2022	19	71E215	18
Васса	2022	20	102E151	16
Влади	2022	21	70E55	13
Волшебница	2022	22	70E20	11
Вольный Дон	2022	23	79E231	18
Граф	2022	B7	102E183	17
Гречанка	2022	24	101E167	16
Жаворонок	2022	22	70E20	11
Степь	2022	25	111E231	17
Тимирязевская Юбилейная	2022	26	39E183	17
Jupateco	2022	27	79E163	16
Michigan Amber	2022	28	71E48	12

Примечание: * – фенотип патогена на 29 тестерах вирулентности (14 *Yr*-линий и 15 сортов-дифференциатов); ** – раса, определенная по международной номенклатуре на 15 сортах-дифференциаторах; *** – при тестировании на 29 тестерах вирулентности

Note: * – phenotype of the pathogen on 29 virulence testers (14 *Yr* lines and 15 differential cultivars); ** – race according to the international nomenclature on 15 differential cultivars; *** – during testing on 29 virulence testers

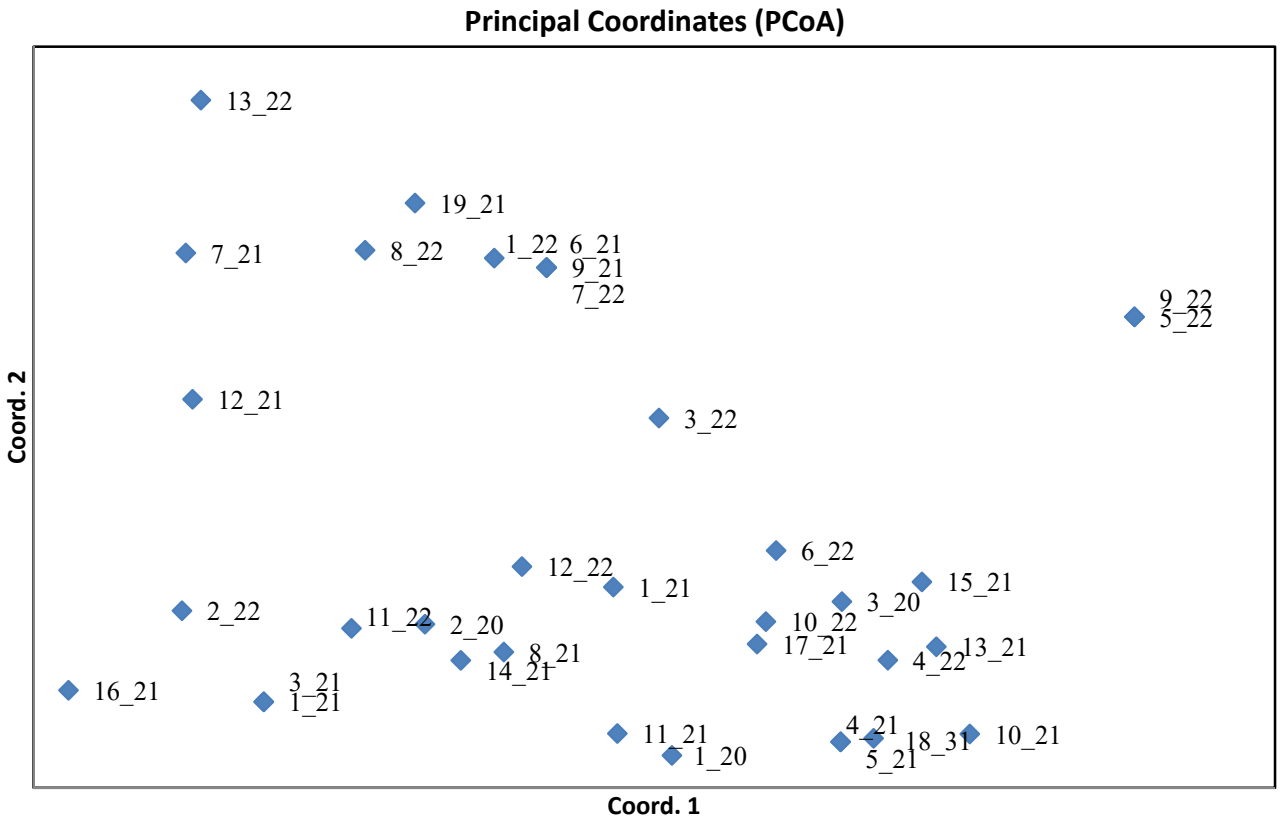


Рис. 2. Генетические расстояния между изолятами *Puccinia striiformis* West. на образцах мягкой пшеницы в Дагестане в 2020–2022 гг.:
1_20 – 'Berecet'; 2_20 – 'Van'; 3_20 – к-56547; 1_22 – 'Веха'; 2_21 – 'Вид'; 3_21 – 'Велена'; 4_21 – 'Вольница'; 5_21 – 'Вольный Дон'; 6_21 – 'Граф'; 7_21 – 'Жива'; 8_21 – 'Караван'; 9_21 – 'Сварог'; 10_21 – 'Степь'; 11_21 – Л 242-97-2-45; 12_21 – Л 363-96-4; 13_21 – Л 199; 14_21 – Л 300; 15_21 – Л 600-10; 16_21 – Л 22912; 17_21 – Л 313-01-1; 18_21 – Л 650; 19_21 – 'Siete Cerros'; 1_22 – 'Безостая 100'; 2_22 – 'Богема'; 3_22 – 'Васса'; 4_22 – 'Влади'; 5_22 – 'Волшебница'; 6_22 – 'Вольный Дон'; 7_22 – 'Граф'; 8_22 – 'Гречанка'; 9_22 – 'Жаворонок'; 10_22 – 'Степь'; 11_22 – 'Тимирязевская Юбилейная'; 12_22 – 'Jupateco'; 13_22 – 'Michigan Amber'

Fig. 2. Genetic distances among *Puccinia striiformis* West. isolates on bread wheat accessions in Dagestan in 2020–2022:
1_20 – 'Berecet'; 2_20 – 'Van'; 3_20 – k-56547; 1_22 – 'Vekha'; 2_21 – 'Vid'; 3_21 – 'Velena'; 4_21 – 'Volnitsa'; 5_21 – 'Volny Don'; 6_21 – 'Graf'; 7_21 – 'Zhiva'; 8_21 – 'Karavan'; 9_21 – 'Svarog'; 10_21 – 'Step'; 11_21 – L 242-97-2-45; 12_21 – L 363-96-4; 13_21 – L 199; 14_21 – L 300; 15_21 – L 600-10; 16_21 – L 22912; 17_21 – L 313-01-1; 18_21 – L 650; 19_21 – 'Siete Cerros'; 1_22 – 'Bezostaya 100'; 2_22 – 'Bogema'; 3_22 – 'Vassa'; 4_22 – 'Vladi'; 5_22 – 'Volshebnitsa'; 6_22 – 'Volny Don'; 7_22 – 'Graf'; 8_22 – 'Grechanka'; 9_22 – 'Zhavoronok'; 10_22 – 'Step'; 11_22 – 'Timiryazevskaya Yubileynaya'; 12_22 – 'Jupateco'; 13_22 – 'Michigan Amber'

Таблица 5. Пораженность линий и сортов-дифференциаторов пшеницы возбудителем желтой ржавчины в Дагестане (2000–2022 гг.)

Table 5. Yellow rust severity on wheat differential lines and cultivars in the field in Dagestan (2020–2022)

Yr-ген(ы)	Линия (сорт) с геном *Yr*	Пораженность, %		
		2020	2021	2022
Yr1	*Yr1*/6*Avocet S	60–80	0	1–15
Yr5	*Yr5*/6*Avocet S,	0	0	0
Yr6	*Yr6*/6*Avocet S	60–80	70	100
Yr7	*Yr7*/6*Avocet S,	0	1	1–20
Yr8	*Yr8*/6*Avocet S	0	0	0
Yr9	*Yr9*/6*Avocet S	60–80	10	100

Таблица 5. Окончание
Table 5. The end

Yr-ген(ы)	Линия (сорт) с геном *Yr*	Пораженность, %		
		2020	2021	2022
Yr10	*Yr10*/6*Avocet S	0	0	0
Yr15	*Yr15*/6*Avocet S	0	0	0
Yr17	*Yr17*/6*Avocet S	25–30	0	20
Yr18	*Yr18*/6*Avocet S	25–30	1	1–5
Yr24	*Yr24*/6*Avocet S	0	0	0
YrSp	*YrSP*/6*Avocet S	25–30	0	15–30
Yr27	*Yr27*/6*Avocet S,	25–30	0	0-1
Yr18	Jupateco 73R	1–5	1–5	40–60
YrAR	*YrR*/6*Avocet S,	0	5	10–30
Yr1	Chinese 166	25–30	0	1–5
Yr7, Yr+	Lee	30–50	50	70
Yr6, Yr2	Heines Kolben	5–10	1–5	30–70
Yr3, Yr+	Vilmorin 23	0	10	0
Yr10, YrMor	Moro	0	0	0
YrSD, Yr25, Yr+	Strubes Dickkopf	0–5	5	0
YrSu, Yr+	Suwon 92/Omar	50–70	1–5	25–30
Yr4, Yr+	Hybrid 46	5–10	5	1–5
Yr7, Yr+	Reichersberg 42	0	1	0
Yr2, Yr6, Yr25, Yr+	Heines Peko	0	1–5	0
Yr3, YrND, Yr+	Nord Desprez	0	5	0
Yr8, Yr19	Compair	0	0	0
Yr32, Yr25, Yr+	Carstens V	0	0	0
YrSP, Yr+	Spaldings Prolific	0	0	0
Yr2, Yr25, Yr+	Heines VII	0	5	0–1
Yr18	Jupateco R	1–5	1-5	5–10
Yr18	Avocet R	1–5	1-5	5–20
Восприимчивый контроль	Jupateco S	60–80	70	90–100

Изолят инвазивной группы *PstS2* на сорте 'Siete Cerros' характеризовался авирулентностью к линиям Av*Yr*: 1, 5, 10, 15, 24, 26, Sp, сортам 'Chinese 166', 'Vilmorin 23', 'Moro', 'Nord Desprez' и вирулентностью ко всем другим дифференциаторам. Изолят с линии Л 650 отличался от упомянутого вирулентностью к *Yr1*, *YrSp*, 'Chinese 166', 'Vilmorin 23' и авирулентностью к Av*Yr7*, Av*Yr17*, Av*Yr27*, а изолят с сорта 'Васса' – вирулентностью к *YrSp*, 'Spaldings Prolific' и авирулентностью к *Yr18*.

Глобальное изучение популяций *P. striiformis* проводится в Дании, в Global Rust Reference Center (https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/wheatrust). При этом анализируют дифференциаторы с генами *Yr1*, *Yr2*, *Yr3*, *Yr4*, *Yr5*, *Yr6*, *Yr7*, *Yr8*, *Yr9*, *Yr10*, *Yr15*, *Yr17*, *Yr24*, *Yr25*, *Yr27*, *Yr32* и *YrSp*. Все эти тестеры вирулентности, за исключением линии с геном *Yr25*, применяли в данной работе. Особый интерес представляло сравнение дагестанских изолятов с азербайджанскими, поскольку данные регионы входят в единую эпидемиологическую зону. Вирулентность азербайджанских изолятов в 2012–2017 гг. по результатам изучения в Global Rust Reference Center представлена в таблице 6. Фенотипы этих изолятов отличаются от дагестанских, что может быть обусловлено их малым количеством (1 – 2012 г., 6 – 2015 г.,

Таблица 6. Характеристика вирулентности азербайджанских изолятов *Puccinia striiformis* West. в 2012–2017 гг. (https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/wheatrust)

Table 6. Virulence characteristics of the Azerbaijan isolates of *Puccinia striiformis* West. in 2012–2017 (https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/wheatrust)

Изолят	Год	*Yr1*	*Yr2*	*Yr3*	*Yr4*	*Yr5*	*Yr6*	*Yr7*	*Yr8*	*Yr9*	*Yr10*	*Yr15*	*Yr17*	*Yr24*	*Yr27*	*Yr32*	*YrSp*
Az	2012	S	S	R	R	R	S	S	S	R	R	R	R	R	R	R	R
PstS2	2015	R	S	R	R	R	S	S	S	S	R	R	R	R	R	R	R
PstS2, v27	2015 2016	R	S	R	R	R	S	S	S	S	R	R	R	R	S	R	R
Other	2015	R	R	R	R	R	S	S	S	R	S	R	R	R	R	R	R
PstS7 Warrior	2016, 2017	S	S	S	S	R	S	S	R	S	R	R	S	R	R	S	S

Примечание: R – устойчивость; S – восприимчивость

Note: R – resistance; S – susceptibility.

7 – 2017 г.). При этом спектр вирулентности обеих популяций существенно не различался. Эффективностью в обоих регионах характеризуются гены *Yr5*, *Yr15* и *Yr24*. Варьирование по вирулентности наблюдали на линиях с генами *Yr1*, *Yr2*, *Yr3*, *Yr4*, *Yr9*, *Yr17*, *Yr27*, *Yr32* и *YrSp*. Однако в Азербайджане в 2015 г. выявлен изолят, вирулентный к *Yr10*. Этот ген относится к группе высокоэффективных во всем мире. Вирулентность к нему отмечена единично в некоторых странах (Sharma-Poudyal et al., 2013; Wan et al., 2016). Обнаружение изолятов, вирулентных к *Yr10* в Азербайджане, указывает на возможный их занос воздушными потоками в соседние регионы, в том числе и Дагестан.

Заключение

Анализ дагестанской популяции возбудителя желтой ржавчины выявил ее высокий полиморфизм по вирулентности и фенотипическому составу. Высокую эффективность в фазе проростков и взрослых растений показали гены *Yr5*, *Yr10*, *Yr15* и *Yr24*, которые могут быть рекомендованы для селекции на устойчивость к желтой ржавчине в России. Для гена *Yr10* следует учитывать, что вирулентные изоляты ранее были обнаружены в соседнем Азербайджане (https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/wheatrust). В российских сортах озимой и яровой пшеницы широкое распространение имеют гены *Yr18* и *Yr9*, умеренное – *Yr17*. Высокие частоты вирулентности выявлены для *Yr18* и *Yr9*. Линии пшеницы с этими генами имели различную степень поражения в полевых условиях: от умеренной до высокой. Вирулентность к *Yr17* отмечена реже. Данный ген до недавнего времени относился к группе эффективных во всем мире. Однако в связи с широким возделыванием сортов, защищенных *Yr17*, он стал терять эффективность. В современный период вирулентность к образцам пшеницы с этим геном устойчивости отмечается в большинстве стран мира. Для продления срока «полезной жизни» этих генов может быть рекомендовано их сочетание с высокоэффективными и частично эффективными *Yr*-генами.

Информация о вирулентности и фенотипическом составе *P. striiformis* на районированных и перспективных российских сортах пшеницы в условиях Дагестанской опытной станции ВИР позволит оценить последующую ситуацию в производственных посевах при их дальнейшем возделывании.

Впервые в Дагестане обнаружены изоляты высокоагрессивной расы *PstS2*. В соседнем Азербайджане они отмечаются уже с 2015 г. Высокий эволюционный потенциал возбудителя желтой ржавчины и его быстрые мутации под действием растения-хозяина и окружающей среды указывают на актуальность постоянного мониторинга популяций патогена. Анализ *P. striiformis* на генетически разнородных образцах *Triticum* spp. в условиях коллекционных посевов позволяет наиболее полно охарактеризовать разнообразие патогена и его динамику изменчивости.

References / Литература

Bouvet L., Holdgate S., James L., Thomas J., Mackay I.J., Cockram J. The evolving battle between yellow rust and wheat: implications for global food security. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022;135(3):741-753. DOI: 10.1007/s00122-021-03983-z

Chen X., Wang M., Wan A., Bai Q., Li M., López P.F. et al. Virulence characterization of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* collections from six countries in 2013 to 2020. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2021;43 Suppl 2:308-322. DOI: 10.1080/07060661.2021.1958259

Chen X.M. Epidemiology and control of stripe rust [*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*] on wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2005;27(3):314-337. DOI: 10.1080/07060660509507230

El Amil R., Ali S., Bahri B., Leconte M., de Vallavieille-Pope C., Nazari K. Pathotype diversification in the invasive PstS2 clonal lineage of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* causing yellow rust on durum and bread wheat in Lebanon and Syria in 2010–2011. *Plant Pathology*. 2020;69(4):618-630. DOI: 10.1111/ppa.13164

Fontyn C., Zippert A.C., Delestre G., Marcel T.C., Suffert F., Goyeau H. Is virulence phenotype evolution driven exclusively by *Lr* gene deployment in French *Puccinia triticina* populations? *Plant Pathology*. 2022;71(7):1511-1524. DOI: 10.1111/ppa.13599

Gassner G., Straib W. Untersuchungen über die Infektionsbedingungen von *Puccinia glumarum* und *Puccinia graminis*. *Arbeitsergebnissen der Biologischen Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft*. 1929;16(4):609-629. [in German]

GRRC. Global Rust Reference Center. Stem and yellow rust genotyping and race analyses: [website]. Available from: https://agro.au.dk/forskning/internationale-platforme/wheatrust [accessed Mar. 01, 2023].

Gultyaeva E.I., Shaydayuk E.L. Virulence of Russian populations of the stripe rust causal agent. *Mycology and Phytopathology*. 2020;54(4):299-304. [in Russian] (Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л. Вирулентность российских популяций возбудителя желтой ржавчины пшеницы. *Микология и фитопатология*. 2020;54(4):299-304). DOI: 10.31857/S0026364820040042

Gultyaeva E.L., Shaydayuk E.L., Abdullaev K.M. Population genetics study of the wheat leaf rust agent *Puccinia triticina* in Dagestan. *Proceedings of Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(2):140-150. [in Russian] (Гультяева Е.И., Шайдаюк Е.Л., Абдуллаев К.М. Популяционно-генетическое исследование возбудителя бурой ржавчины пшеницы *Puccinia triticina* в Дагестане. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(2):140-150). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-2-140-150

Hasanova G.M., Rustamov Kh.N. Influence of yellow rust on quality indicators of bread wheat grain (*T. aestivum* L.). *Agrarian Science*. 2019;(1):158-161. [in Russian] (Гасанова Г.М., Рустамов Х.Н. влияние желтой ржавчины на показатели качества зерна пшеницы мягкой (*T. aestivum* L.). *Аграрная наука*. 2019;(1):158-161). DOI: 10.32634/0869-8155-2019-326-1-158-161

Hovmøller M.S., Walter S., Bayles R.A., Hubbard A., Flath K., Sommerfeldt N. et al. Replacement of the European wheat yellow rust population by new races from the centre of diversity in the near-Himalayan region. *Plant Pathology*. 2016;65(3):402-411. DOI: 10.1111/ppa.12433

Justesen A.F., Ridout C.J., Hovmøller M.S. The recent history of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Denmark as revealed by disease incidence and AFLP markers. *Plant Pathology*. 2002;51(1):13-23. DOI: 10.1046/j.0032-0862.2001.00651.x

McIntosh R.A., Wellings C.R., Park R.F. (eds). Wheat rusts. An atlas of resistance genes. Dordrecht: Springer Netherlands; 1995.

Mikhailova L.A., Abdullaev K.M., Shelomova L.F. Shifts of *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici* population structure in Derbent environs (Daghestan) during 1970–1995. *Mycology and Phytopathology*. 1997;31(2):71-77. [in Russian] (Михайлова Л.А., Абдуллаев К.М., Шеломова Л.Ф. Изменение структуры популяции *Puccinia recondita* Rob. ex Desm. f. sp. *tritici* в окрестностях Дербента (Дагестан) в 1970–1995 годах. *Микология и фитопатология*. 1997;31(2):71-77).

Mikhailova L.A., Gultyaeva E.I., Mironenko N.V. Methods for studying the structure of populations of the leaf rust causative agent (Metody issledovaniy struktury populyatsii vozbuditelya buroy rzhavchiny pshenitsy). In: *Collection of Plant Protection Guidelines (Sbornik metodicheskikh rekomendatsiy po zashchite rasteniy)*. St. Petersburg: VIZR; 1998. p.105-126. [in Russian] (Михайлова Л.А, Гультяева Е.И., Мироненко Н.В. Методы исследований структуры популяции возбудителя бурой ржавчины пшеницы. В кн.: *Сборник методических рекомендаций по защите растений.* Санкт-Петербург: ВИЗР; 1998. С.105-126).

Milus E.A., Kristensen K., Hovmøller M.S. Evidence for increased aggressiveness in a recent widespread strain of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* causing stripe rust of wheat. *Phytopathology*. 2009;99(1):89-94. DOI: 10.1094/PHYTO-99-1-0089

RustTracker.org. A Global Wheat Rust Monitoring System: [website]. Available from: https://rusttracker.cimmyt.org [accessed Mar. 01, 2023].

Sharma-Poudyal D., Chen X.M., Wan A.M., Zhan G.M., Kang Z.S., Cao S.Q. et al. Virulence characterization of international collections of the wheat stripe rust pathogen, *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Plant Disease*. 2013;97(3):379-386. DOI: 10.1094/pdis-01-12-0078-re

Shaydayuk E.L., Yakovleva D.R., Abdullaev K.M., Pyukkenen V.P., Gultyaeva E.I. Population genetics studies of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Dagestan and Northwestern Russia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):174-181. [in Russian] (Шайдаюк Е.Л., Яковлева Д.Р., Абдуллаев К.М., Пюккенен В.П., Гультяева Е.И. Популяционно-генетические исследования *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* в Дагестане и на Северо-Западе России. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(3):173-181). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-174-181

Sinha P., Chen X. Potential infection risks of the wheat stripe rust and stem rust pathogens on barberry in Asia and Southeastern Europe. *Plants*. 2021;10(5):957. DOI: 10.3390/plants10050957

Walter S., Ali S., Kemen E., Nazari K., Bahri B.A., Enjalbert J. et al. Molecular markers for tracking the origin and worldwide distribution of invasive strains of *Puccinia striiformis. Ecology and Evolution*. 2016;6(9):2790-2804. DOI: 10.1002/ece3.2069

Wan A.M., Chen X.M., Yuen J. Races of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in the United States in 2011 and 2012 and comparison with races in 2010. *Plant Disease*. 2016;100(5):966-975. DOI: 10.1094/PDIS-10-15-1122-RE

Wang M.N., Chen X.M. First report of Oregon grape (*Mahonia aquifolium*) as an alternate host for the wheat stripe rust pathogen (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) under artificial inoculation. *Plant Disease*. 2013;97(6):839. DOI: 10.1094/PDIS-09-12-0864-PDN

Wellings C.R. *Puccinia striiformis* in Australia: a review of the incursion, evolution and adaptation of stripe rust in the period 1979–2006. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2007;58(6):567-575. DOI: 10.1071/AR07130

Zhao J., Wang L., Wang Z., Chen X., Zhang H., Yao J. et al. Identification of eighteen *Berberis* species as alternate hosts of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* and virulence variation in the pathogen isolates from natural infection of barberry plants in China. *Phytopathology*. 2013;103(9):927-934. DOI: 10.1094/PHYTO-09-12-0249-R

Информация об авторах

Елена Ивановна Гультяева, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, eigultyaeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7948-0307

Екатерина Львовна Шайдаюк, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, eshaydayuk@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3266-6272

Регина Евгеньевна Смирнова, бакалавр, Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, лаборант-исследователь, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, regina.smirnovaa@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-3119-3453

Кадыр Магомедгаджиевич Абдуллаев, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, 368612 Россия, Республика Дагестан, Дербентский район, село Вавилово, abdullaev.km1950@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5095-1291

Киштили Уллубиевич Куркиев, доктор сельскохозяйственных наук, директор, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Дагестанская опытная станция – филиал ВИР, 368612 Россия, Республика Дагестан, Дербентский район, село Вавилово, kkish@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8232-6183

Information about the authors

Elena I. Gultyaeva, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, eigultyaeva@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-7948-0307

Ekaterina L. Shaydayuk, Cand. Sci. (Biology), Researcher, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, eshaydayuk@bk.ru, https://orcid.org/0000-0003-3266-6272

Regina E. Smirnova, Bachelor, A.S. Pushkin Leningrad State University, Laboratory Research Assistant, All-Russian Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, regina.smirnovaa@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-3119-3453

Kadyr M. Abdullaev, Cand. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Dagestan Experiment Station of VIR, Vavilovo Village, Derbent District, Republic of Dagestan 368612, Russia, abdullaev.km1950@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-5095-1291

Kishtili U. Kurkiev, Dr. Sci. (Agriculture), Director, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Dagestan Experiment Station of VIR, Vavilovo Village, Derbent District, Republic of Dagestan 368612, Russia, kkish@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8232-6183

Вклад авторов: Гультяева Е.И. – концептуализация; методология; фитопатологические и молекулярно-генетические исследования; статистическая обработка данных; подготовка статьи; руководство проектом. Шайдаюк Е.Л. – фитопатологические и молекулярно-генетические исследования; статистическая обработка данных; сбор инфекционного материала *P. striiformis*; подготовка статьи. Смирнова Р.Е. – молекулярно-генетические исследования. Абдулаев К.М., Куркиев У.К. – изучение мировой коллекции мягкой пшеницы по устойчивости к болезням; сбор инфекционного материала *P. striiformis*; оценка устойчивости линий с *Yr*-генами в полевых условиях.
Contribution of the authors: Gultyaeva E.I. – conceptualization; methodology; phytopathological and molecular studies; statistical data processing; preparation of the article; project administration. Shaydayuk E.L. – phytopathological and molecular studies; statistical data processing; collecting of *P. striiformis* infection material; preparation of the article. Smirnova R.E. – molecular studies. Abdullaev K.M., Kurkiev K.U. – screening of the global bread wheat collection for disease resistance; collecting of *P. striiformis* infection material; assessment of the lines with *Yr* genes in the field for their resistance.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.03.2023; одобрена после рецензирования 19.04.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 27.03.2023; approved after reviewing on 19.04.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.111.1:632.4
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-205-214

CC BY

Устойчивость стародавней озимой мягкой пшеницы к желтой пятнистости

Н. В. Мироненко[1], Н. М. Коваленко[1], О. А. Баранова[1], О. П. Митрофанова[2]

[1] *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия*

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

Автор, ответственный за переписку: Нина Васильевна Мироненко, nina2601mir@mail.ru

Актуальность. Наиболее эффективный и экологически безопасный способ борьбы с болезнями пшеницы – создание устойчивых сортов к их возбудителям. Для этого часто используют генофонд стародавних сортов (landraces) как источников генетического разнообразия важных для селекции признаков. В процессе селекции пшеницы на устойчивость к возбудителю желтой пятнистости *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs. (сокращенно Ptr) проводят отбор против доминантного аллеля *Tsn1* – гена чувствительности к некроз-индуцирующему токсину Ptr ToxA, основному фактору патогенности Ptr, контролируемому геном *ToxA*. Цели исследования – охарактеризовать выборку образцов стародавней озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) из коллекции ВИР по устойчивости к различным популяциям Ptr, генотипировать образцы с использованием ДНК-маркера *Xfcp623* гена *Tsn1*, выявить источники устойчивости к желтой пятнистости.
Материалы и методы. Изучено 67 образцов стародавней озимой мягкой пшеницы. Ювенильную устойчивость образцов к двум популяциям Ptr оценивали с использованием принятой в ВИЗР пятибалльной шкалы. Аллельное состояние *Tsn1* идентифицировали методом ПЦР.
Результаты. Доминантные аллели *Tsn1* обнаружены у 55% изученных образцов. Устойчивыми или умеренно устойчивыми к двум популяциям Ptr и ранее использованному для их характеристики изоляту из Краснодарского края были 17 образцов. Из них девять – с генотипом *tsn1tsn1*, восемь – *Tsn1Tsn1*, в основном относящиеся к агроэкологическим группам, предложенным Н. И. Вавиловым: «степная мягкая озимая пшеница (банатки)», «североевропейские лесные безостые мягкие пшеницы (сандомирки)» и «озимая горная мягкая кавказская пшеница».
Заключение. Выделенные 17 образцов, устойчивых к Ptr, являются источниками устойчивости к этому патогену. На исследованной выборке образцов не выявлено достоверной связи между аллельным состоянием гена *Tsn1* у образца и его реакцией в ответ на заражение популяциями патогена, включающими изоляты с геном *ToxA*.

Ключевые слова: коллекция генетических ресурсов растений ВИР, агроэкологическая группа, образец, *Pyrenophora tritici-repentis*, популяции патогена, *Tsn1*, *ToxA*

Благодарности: работа выполнена в рамках государственных заданий по тематическим планам: ВИЗР, проект FGEU-2022-0009 «Формирование научного задела для долгосрочного обеспечения эффективной генетической защиты растений от вредных организмов, способствующей предотвращению развития эпифитотий и пандемий и отвечающей требованиям экологической безопасности»; ВИР, проект № 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: Мироненко Н.В., Коваленко Н.М., Баранова О.А., Митрофанова О.П. Устойчивость стародавней озимой мягкой пшеницы к желтой пятнистости. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):205-214. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-205-214

© Мироненко Н.В., Коваленко Н.М., Баранова О.А., Митрофанова О.П., 2023

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-205-214

Resistance of old winter bread wheat landraces to tan spot

Nina V. Mironenko[1], Nadezhda M. Kovalenko[1], Olga A. Baranova[1], Olga P. Mitrofanova[2]

[1] *All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia*

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

Corresponding author: Nina V. Mironenko, nina2601mir@mail.ru

Background. The most effective and environmentally safe way to combat wheat diseases is to produce cultivars resistant to their pathogens. For this purpose, old landraces are often used as genetically diverse sources of traits important for breeding. In the process of wheat breeding for resistance to tan spot caused by the fungus *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs. (abbr. Ptr), selection is carried out against the dominant allele of *Tsn1*, the gene of sensitivity to the toxin Ptr ToxA, which induces necrosis and represents the main pathogenicity factor of Ptr controlled by the *ToxA* gene. The aim of the study was to characterize a set of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) accessions from the VIR collection for resistance to various Ptr populations, genotype these accessions using *Xfcp623* – a DNA marker of the *Tsn1* gene, and identify sources of tan spot resistance.
Materials and methods. Sixty-seven accessions of winter bread wheat landraces were studied. Seedling resistance to two Ptr populations was assessed using a 5-point scale adopted at VIZR. The allelic state of *Tsn1* was identified by PCR.
Results. Dominant alleles of *Tsn1* were found for 55% of the studied accessions. Seventeen accessions were resistant or moderately resistant to two Ptr populations and an isolate from Krasnodar Territory previously used for their characterization. Nine of them had the *tsn1tsn1* genotype, and 8 had *Tsn1Tsn1*. The accessions mainly belonged to three agroecological groups proposed by N. I. Vavilov: "steppe winter bread wheat (Banatka wheats)", "North European forest awnless bread wheats (Sandomirka wheats)", and "Caucasian mountain winter bread wheat".
Conclusion. The identified 17 accessions resistant to Ptr are potential breeding sources of resistance. In the studied set of accessions, no significant relationship was found between the allelic state of the *Tsn1* gene in the accession and its response to the infection with pathogen populations, including isolates with the *ToxA* gene.

Keywords: VIR plant genetic resources collection, agroecological group, accession, *Pyrenophora tritici-repentis*, pathogen populations, *Tsn1*, *ToxA*

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the state tasks according to the thematic plans: VIZR, Project FGEU-2022-0009 "Formation of scientific groundwork for the long-term provision of effective genetic protection of plants from harmful organisms, contributing to the prevention of the development of epiphytotics and pandemics and meeting the requirements of environmental safety"; 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: Mironenko N.V., Kovalenko N.M., Baranova O.A., Mitrofanova O.P. Resistance of old winter bread wheat landraces to tan spot. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):205-214. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-205-214

Введение

Желтая пятнистость считается экономически важной болезнью пшеницы во всем мире. Возбудитель ее – аскомицетный гриб *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs. (далее сокращенно Ptr). Известно, что гриб продуцирует относящиеся к факторам патогенности хозяинспецифичные токсины, индуцирующие образование некрозов и/или хлорозов в тканях листьев растений восприимчивых образцов пшеницы (Ballance et al., 1989; Lamari, Bernier, 1989; Tomas et al., 1990; Tuori et al., 1995). Среди них – белковый токсин Ptr ToxA, кодируемый геном *ToxA*, который считается основным фактором патогенности (Strelkov, Lamari, 2003; Ciuffetti et al., 2010). Действие этого гена проявляется на образцах пшеницы, обладающих геном восприимчивости *Tsn1*, который детерминирует чувствительность к токсину Ptr ToxA (Faris et al., 2010). До сих пор механизм взаимодействия продуктов генов *ToxA* и *Tsn1* при заражении растения и развитии болезни окончательно не выяснен. Вредоносность данной болезни зависит от генотипа растения пшеницы, а также от агрессивности и вирулентности популяции патогена и других факторов, например почвенно-климатических условий, в которых выращивают пшеницу, а также от использования комплексов агротехнических приемов, направленных на повышение ее устойчивости к вредоносным болезням. В условиях эпифитотии потери зерна могут достигать 65% (Rees et al., 1987), при этом наблюдают и ухудшение качества зерна (Ciuffetti et al., 1997). Решение проблемы видят в создании сортов пшеницы с высокой устойчивостью к данной болезни.

При создании сортов пшеницы часто используют генофонд стародавних сортов (landraces) как источников генетического разнообразия важных для селекции признаков (Cseh et al., 2021; Tehseen et al., 2022). У стародавних сортов уровень полиморфизма по многим признакам, в том числе толерантности или устойчивости ко многим биотическим и абиотическим стрессорам, выше, чем у современных селекционных сортов. Так, генетическое разнообразие коллекции местных сортов мягкой пшеницы из Центральной и Восточной Европы было оценено с помощью 20 тыс. SNP (single nucleotide polymorphism). При этом у стародавних сортов, устойчивых к засухе, тепловому стрессу и обладающих высокой способностью к кущению, присутствовали новые редкие аллели, а полиморфные маркеры были локализованы вместе с генами, имеющими большое агрономическое значение. Авторы сравнили генетическое разнообразие современных и стародавних сортов пшеницы и выявили потерю примерно 97% разнообразия за период между 1955 и 2015 г. (Cseh et al., 2021).

Ранее нами был проведен скрининг по устойчивости к желтой пятнистости 397 образцов стародавней мягкой пшеницы коллекции ВИР, из них 105 – с озимым типом развития (Kornyukhin et al., 2013). Устойчивость оценивали к изоляту возбудителя болезни из Краснодарского края. К группе устойчивых были отнесены 46 образцов. Представляло интерес с интервалом в десять лет с помощью той же методики, но с использованием других популяций *P. tritici-repentis*, повторно исследовать репрезентативную выборку образцов озимой стародавней мягкой пшеницы для уточнения характеристик образцов по устойчивости и подтверждения статуса источника устойчивости к желтой пятнистости у ряда образцов.

Цель настоящей работы – охарактеризовать выборку образцов стародавней озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) из коллекции ВИР по устойчивости к тамбовской и ленинградской популяциям Ptr, генотипировать образцы с использованием ДНК-маркера гена *Tsn1*, определить достоверность связи доминантных аллелей этого гена с устойчивостью образцов, выявить источники устойчивости.

Материалы и методы

При подборе материала для исследования опирались на агроэкологическую классификацию, разработанную Н. И. Вавиловым для пшеницы еще в 1940 г. Эта классификация приведена в его посмертно изданных рукописях (Vavilov, 1957, 1964). Классификация охватывает мировое разнообразие стародавней пшеницы и базируется на историко-географическом делении обширных территорий ее возделывания на агроэкологические области и районы, которые характеризуются определенными почвенно-климатическими условиями и экологическим типом стародавних сортов (landraces). Все мировое внутривидовое многообразие мягкой пшеницы, возникшее в основном благодаря естественному отбору, Н. И. Вавилов распределил по 39 агроэкологическим группам (= эколого-географическим группам).

Для проведения исследования нами было взято 67 образцов стародавней озимой мягкой пшеницы из различных агроэкологических групп. При подборе образцов учитывали географическое место сбора, год включения в коллекцию, упоминание названия образца в текстах изданных рукописей Н. И. Вавилова (Vavilov, 1957, 1964). Из них 57 образцов поступили в коллекцию ВИР в период с 1908 по 1940 г. и десять – с 1947 по 1970 г. В таблице 1 приведены названия агроэкологических групп по классификации Н. И. Вавилова (Vavilov, 1964), число изученных образцов в каждой группе, а также указана страна их происхождения по паспортной базе данных коллекции ВИР.

Для оценки устойчивости образцов к Ptr на стадии проростков использовали тамбовскую популяцию 2021 года (сокращенно она обозначена как Тамб-21) и популяцию из Ленинградской области 2021 года (Лен-21). Для инокуляции проростков создавали конидиальную суспензию из смеси наиболее агрессивных изолятов каждой популяции. Изоляты гриба выращивали в течение 5–7 суток под эритемными лампами на среде V4 (Mikhailova et al., 2002). Нами сделана молекулярная диагностика генов *ToxA* и *ToxB* изолятов патогена методом ПЦР с геноспецифичными праймерами (Andrie et al., 2007). Ген *ToxB* не выявлен в изолятах исследуемых популяций, тогда как ген *ToxA* обнаружен у большинства изолятов обеих популяций (данные не приводятся).

Метод определения устойчивости к возбудителю желтой пятнистости основан на анализе размеров некротических и хлоротичных пятен, образующихся после инокуляции листьев проростков пшеницы конидиальной суспензией гриба. Оценку образцов по устойчивости к данному возбудителю проводили с помощью бензимидазольного метода на отрезках листьев (Mikhailova, Kovalenko, 2009). В таблице 2 указаны выявляемые симптомы поражения, приведены типы реакции образцов на заражение патогеном в баллах по некрозу и хлорозу (некроз/хлороз), а также расшифрованы обозначения выявляемых фенотипов (Mikhailova, Kovalenko, 2009).

Присутствие в генотипе образца доминантного аллеля *Tsn1* определяли по наличию диагностического фрагмента SSR-маркера *Xfcp623*, разработанного на внутрен-

Таблица 1. Распределение изученных образцов стародавней озимой мягкой пшеницы из коллекции ВИР по агроэкологическим группам согласно классификации Н. И. Вавилова (Vavilov, 1964)

Table 1. Distribution of the studied accessions of winter bread wheat landraces from the VIR collection into agroecological groups according to the classification by N. I. Vavilov (1964)

Агроэкологическая группа	Происхождение	Изучено образцов
Кашгарская мягкая пшеница	Китай	1
Нахичеванская мягкая пшеница	Азербайджан	2
Белуджистанская	Пакистан	1
Кашмирская	Индия	9
Северокитайская	Китай	1
Южнокитайская	Китай	4
Озимая горная мягкая кавказская пшеница	Армения, Грузия, Россия	12
Предгорная азербайджано-дагестанская группа мягких пшениц	Азербайджан	9
Степная мягкая озимая пшеница (банатки)	Белоруссия, Канада, Молдавия, Польша, Россия, Украина, Югославия до 1990 г.	14
Североевропейские лесные безостые мягкие пшеницы (сандомирки)	Польша, Россия	10
Южноевропейская крупнозерная мягкая пшеница	Италия	1
Альпийская группа местных озимых и яровых сортов мягкой горной пшеницы	Швейцария	3

Таблица 2. Шкала оценки устойчивости пшеницы к *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs. (Mikhailova, Kovalenko, 2009)

Table 2. Scale for assessing wheat resistance to *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs. (Mikhailova, Kovalenko, 2009)

Симптомы поражения / Damage symptoms	Тип реакции* / Reaction type	Фенотип пшеницы / Wheat phenotype	Обозначение фенотипа / Phenotype designation
Мелкие черные или темно-коричневые пятна до 0,5 мм, хлороз отсутствует или малозаметен / Small black or dark brown spots up to 0.5 mm, chlorosis is absent or hardly noticeable	1/0, 1/1	Устойчивый / Resistant	R
Мелкие черные или темно-коричневые пятна 0,5–1,0 мм, окруженные зоной хлороза до 2 мм / Small black or dark brown spots of 0.5–1.0 mm, surrounded by a zone of chlorosis up to 2 mm	1/2, 2/1, 2/2	Умеренно устойчивый / Moderately resistant	MR
Темно-коричневые пятна до 1,0 мм, хлороз до 2-3 мм / Dark brown spots up to 1.0 mm, chlorosis up to 2-3 mm	2/3, 2/4	Умеренно восприимчивый / Moderately susceptible	MS
Темно-коричневые пятна до 2,0 мм, хлороз до 5 мм / Dark brown spots up to 2.0 mm, chlorosis up to 5 mm	3/2, 3/3, 3/4	Восприимчивый / Susceptible	S
Коричневые, сливающиеся пятна, мацерация ткани листа / Brown, confluent spots, leaf tissue maceration	4/3, 4/4, 4/5, 5/4, 5/5	Весьма восприимчивый / Highly susceptible	HS

Примечание: * – над чертой – балл развития некроза, под чертой – хлороза

Note: * – above the line is the score for the development of necrosis, and below the line for chlorosis

нюю часть гена (Faris et al., 2010). Отсутствие фрагмента рассматривали как наличие в генотипе образца «нулевых» рецессивных аллелей *tsn1tsn1*. Негативный результат подтверждали амплификацией ITS (внутреннего транскрибируемого спейсера рДНК) с праймерами ITS1 и ITS4 (White et al., 1990; Ahmadi et al., 2022). ДНК выделяли из листьев растений с помощью CTAB (Murray, Thompson, 1980).

Проверку степени однородности полученных распределений образцов по типу реакции на популяции патогена, а также достоверность связи между наличием/отсутствием диагностического фрагмента маркера *Xfcp623* и устойчивостью образца к Ptr определяли с помощью критерия «хи-квадрат» (χ^2) (Zaitsev, 1984).

Результаты

По отношению к каждой популяции образцы стародавней озимой мягкой пшеницы распределились по трем группам: устойчивые (R), умеренно устойчивые (MR) и восприимчивые (S). В последнюю группу вошли фенотипы MS, S и HS (табл. 3). Доля устойчивых образцов к популяции Лен-21 составила 11,9%, Тамб-21 – 19,4%, умеренно устойчивых – 43,3% и 40,3% соответственно. С реакцией R одновременно к двум популяциям патогена было выявлено всего два образца – к-8518 (Московская 2411, Россия, Московская обл.) и к-25071 (Rouge de la Venoge, Швейцария). Проверка степени однородности полученных распределений образцов по типу реакции на заражение популяциями Лен-21 и Тамб-21 с использованием критерия χ^2 показала, что распределения однородны ($\chi^2 = 1,42$, $df = 2$; $\chi_{кр}^2 = 5,99$ при уровне значимости 0,05).

Все взятые в анализ 67 образцов стародавней озимой мягкой пшеницы были протестированы на наличие диагностического фрагмента маркера *Xfcp623* доминантного аллеля *Tsn1*. Маркер расположен в длинном плече хромосомы 5B, интроне 5 гена *Tsn1* (Faris et al., 2010). Согласно полученным данным генотипы *Tsn1Tsn1* были представлены примерно в равных долях с генотипами *tsn1tsn1*, у которых диагностический фрагмент не был обнаружен: 37 *Tsn1Tsn1* и 30 *tsn1tsn1*. Пример идентификации диагностического фрагмента маркера *Xfcp623* гена *Tsn1* у образцов приведен на рисунке.

Образцы с доминантными и рецессивными аллелями гена *Tsn1* были выявлены в разных агроэкологических группах стародавней пшеницы (табл. 4). В кашмирской и предгорной азербайджано-дагестанской группе мягких пшениц преобладали образцы с генотипом *Tsn1Tsn1*, в группе «североевропейские лесные безостые мягкие

Таблица 3. Процент встречаемости (число) образцов с разным типом реакции при инокуляции проростков различными популяциями *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs.

Table 3. Percentage of occurrence (number) of accessions with different reaction types when seedlings were inoculated with different populations of *Pyrenophora tritici-repentis* (Died.) Drechs.

Тип реакции образца / Accession's reaction type	Популяция/изолят / Population/isolate		χ^2
	Лен-21	Тамб-21	
R (устойчивый)	11,9 (8)	19,4 (13)	1,42
MR (умеренно устойчивый)	43,3 (29)	40,3 (27)	
S (восприимчивый)	44,8 (30)	40,3 (27)	
Всего / Total	**67**	**67**	

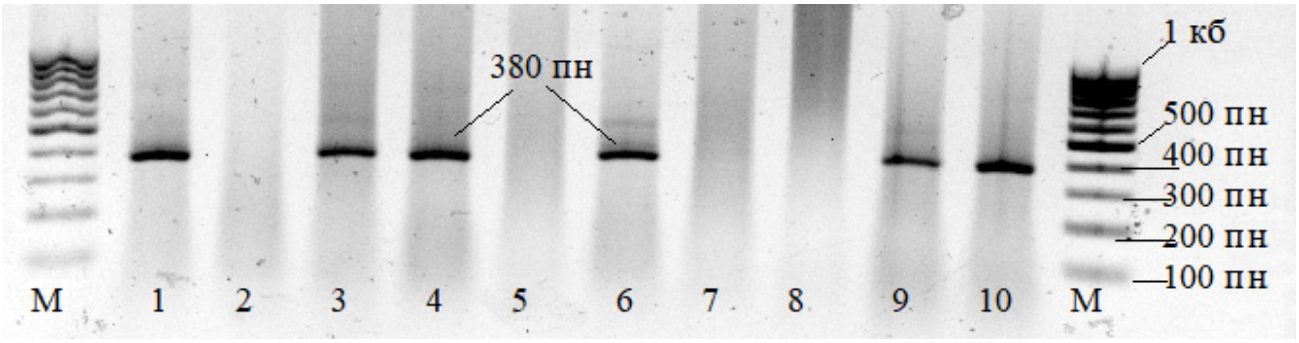


Рисунок. Идентификация диагностического фрагмента 380 пн маркера *Xfcp623* гена *Tsn1* у образцов стародавней мягкой пшеницы. Образцы из агроэкологической группы «степные мягкие озимые пшеницы (банатки)»: **1** – к-26550, **2** – к-26582, **3** – к-31919, **4** – к-33922, **5** – к-39008, **6** – к-8518, **7** – к-457, **8** – к-2167, **9** – к-2606, **10** – к-3902; **M** – маркер молекулярного веса 100 пн (GeneRuler DNA Ladder, Fermentas)

Figure. Identification of the 380 bp diagnostic fragment of the *Xfcp623* marker of the *Tsn1* gene in wheat landraces. Accessions from the agroecological group of "steppe winter bread wheat (Banatka wheats)": **1** – k-26550, **2** – k-26582, **3** – k-31919, **4** – k-33922, **5** – k-39008, **6** – k-8518, **7** – k-457, **8** – k-2167, **9** – k-2606, **10** – k-3902; **M** – 100 bp molecular weight marker (GeneRuler DNA Ladder, Fermentas)

Таблица 4. Встречаемость доминантных и рецессивных аллелей гена *Tsn1* у образцов стародавней озимой мягкой пшеницы из разных агроэкологических групп

Table 4. Occurrence of dominant and recessive alleles of the *Tsn1* gene in winter bread wheat landraces from different agroecological groups

Агроэкологическая группа по Н. И. Вавилову (Vavilov, 1964)	Число образцов с аллелями / Number of accessions with alleles	
	Tsn1Tsn1	*tsn1tsn1*
Кашгарская мягкая пшеница	1	
Нахичеванская мягкая пшеница	1	1
Белуджистанская	1	
Кашмирская	7	2
Северокитайская	–	1
Южнокитайская	2	2
Озимая горная мягкая кавказская пшеница	5	7
Предгорная азербайджано-дагестанская группа мягких пшениц	8	2
Степная мягкая озимая пшеница (банатки)	8	5
Североевропейские лесные безостые мягкие пшеницы (сандомирки)	2	8
Южноевропейская крупнозерная мягкая пшеница	–	1
Альпийская группа местных озимых и яровых сортов мягкой горной пшеницы	2	1
Всего	**37**	**30**

пшеницы (сандомирки)» – *tsn1tsn1*, а в группах «степная мягкая озимая пшеница (банатки)» и «озимая горная мягкая кавказская пшеница» образцы с доминантными и рецессивными аллелями встречались примерно в равных пропорциях.

Устойчивыми или умеренно устойчивыми (реакция на заражение R или MR) к двум популяциям возбудителя желтой пятнистости, а также к упомянутому во «Введении» изоляту из Краснодарского края (Kornyukhin et al., 2013) были 17 образцов. Они отнесены нами к источникам устойчивости. Среди них девять образцов имели генотип *tsn1tsn1*, остальные восемь – *Tsn1Tsn1* (табл. 5). В основном это были образцы из трех агроэкологических групп: «степная озимая мягкая пшеница (банатки)», «североевропейские лесные безостые мягкие пшеницы (сандомирки)» и «озимая горная мягкая кавказская пшеница».

Чтобы выяснить, достоверна или нет сопряженность между присутствием/отсутствием диагностического фрагмента маркера *Xfcp623* гена *Tsn1* и устойчивостью/восприимчивостью к Ptr при заражении инокулюмами двух популяций, образцы были объединены в группы с учетом выявленных у них аллельных форм гена *Tsn1* и устойчивости/восприимчивости к патогену (табл. 6) и методом «хи-квадрат» проведена оценка достоверности сопряженности признаков. Вычисленные значения хи-квадрата с поправкой Йейтса для каждой популяции патогена были меньше, чем критическое значение при доверительном уровне $P_1 = 0,95$ ($\chi^2 = 3,841$, df = 1), следовательно нулевую гипотезу, что признаки не связаны друг с другом, отвергнуть нельзя.

Обсуждение результатов

При заражении 67 образцов стародавней озимой мягкой пшеницы смесями изолятов, выделенных из тамбовской и ленинградской популяций возбудителя желтой пятнистости 2021 года, были выявлены устойчивые, умеренно устойчивые и восприимчивые образцы. К группе устойчивых, с реакцией на заражение R или MR, мы отнесли 17 образцов, которые также были устойчивыми или умеренно устойчивыми при заражении изолятом из Краснодарского края (см. Kornyukhin et al., 2013). Именно эти образцы определены как источники устойчивости.

С помощью ДНК-маркера *Xfcp623* вся выборка образцов была проверена на наличие доминантного аллеля гена чувствительности *Tsn1* к основному фактору патогенности гриба – токсину Ptr ToxA, индуцирующему некроз на листьях восприимчивых сортов. Показано, что реакция образца в ответ на заражение популяциями патогена, включающими изоляты, несущие ген *ToxA*, прямо не связана с аллельным состоянием гена *Tsn1*. Этот вывод иллюстрируют и данные по генотипам источников устойчивости (см. табл. 5).

Известно, что ген *Tsn1* длиной 10581 пн имеет восемь экзонов. Предсказанный на основании его последовательности белок состоит из 1490 аминокислот и содержит три высококонсервативных домена. Первые пять экзонов гена кодируют домен белка S/TPK (Serine/Threonine Protein Kinase), представляющий серин/треониновую протеинкиназу, которая является фактором активации транскрипции и других сигнальных путей. Шестой экзон контролирует второй домен белка NBS (the N-terminal

Таблица 5. **Разнообразие образцов – источников устойчивости к желтой пятнистости по аллелям гена *Tsn1***

Table 5. **Diversity of accessions – sources of tan spot resistance – in alleles of the *Tsn1* gene**

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Генотип образца / Accession's genotype	Степень устойчивости к популяциям Ptr / Level of resistance to *Ptr* populations	
			Тамб-21	Лен-21
Кашгарская мягкая пшеница				
43251	Яркендская	*Tsn1Tsn1*	MR	MR
Нахичеванская				
18719	–	*tsn1tsn1*	R	MR
Кашмирская				
23956	Pr 6	*tsn1tsn1*	R	MR
Озимая горная мягкая кавказская пшеница				
11225	–	*tsn1tsn1*	MR	MR
18104	–	*Tsn1 Tsn1*	MR	MR
23924	Гюльгери	*tsn1tsn1*	MR	MR
35921	Долис пури	*Tsn1 Tsn1*	MR	R
40182	Гюльгери	*tsn1tsn1*	MR	MR
Степная озимая мягкая пшеница (банатки)				
457	Банатка поздняя	*tsn1tsn1*	MR	MR
3902	Красная	*Tsn1 Tsn1*	MR	MR
8518	Московская 2411	*Tsn1 Tsn1*	R	R
26550	Banatka	*Tsn1 Tsn1*	MR	MR
Североевропейские лесные безостые мягкие пшеницы (сандомирки)				
622	Sandomierka	*tsn1tsn1*	MR	R
9463	Sandomierka	*tsn1tsn1*	MR	MR
9815	Sandomierka	*Tsn1 Tsn1*	MR	MR
14977	Sandomierka	*tsn1tsn1*	MR	MR
Альпийская группа местных озимых и яровых сортов мягкой горной пшеницы				
25064	Ble Rouge de Vaumarcus	*Tsn1 Tsn1*	R	R

Таблица 6. **Сопряженность между наличием/отсутствием диагностического фрагмента маркера *Xfcp623* и устойчивостью/восприимчивостью к возбудителю желтой пятнистости**

Table 6. **Association between the presence/absence of the *Xfcp623* diagnostic fragment and tan spot resistance/susceptibility**

Популяция патогена Pathogen population	Генотип образца / Accession's genotype	Число образцов с фенотипом / Number of accessions with the phenotype		χ^2
		R + MR	S	
Тамб-21	*Tsn1Tsn1*	26	11	2.918
	tsn1tsn1	14	16	
Лен-21	*Tsn1Tsn1*	20	17	0,001
	tsn1tsn1	17	13	

Nucleotide-Binding Site) сигнальной области, обеспечивающей связь с нуклеотидами и обладающей функцией АТФ-азы. Седьмой кодирует повторяющиеся 24 раза белковые последовательности с высоким содержанием лейцина (Leucine-Rich Repeats), которые служат рецептором, связывающимся с элиситором патогена. Последний восьмой экзон не кодирует очевидных консервативных доменов (Faris et al., 2010).

Показано, что все три домена необходимы для чувствительности к токсинам и, следовательно, восприимчивости к болезни (Faris et al., 2010). Поскольку использованный для оценки аллелей гена *Tsn1* маркер *Xfcp623* локализован в 5-м интроне, устойчивость образцов с генотипом *Tsn1Tsn1*, можно объяснить либо наличием мутаций, изменивших какой-либо из доменов, либо нарушением экспрессии самого гена *Tsn1.* Устойчивость образцов с генотипом *Tsn1Tsn1* также может быть связана с наличием генов неспецифической устойчивости. Следует отметить, что для образцов с генотипом *tsn1tsn1*, обладающих расоспецифической устойчивостью, также нельзя исключить присутствие генов неспецифической устойчивости. Источники устойчивости к желтой пятнистости с доминантными и рецессивными аллелями *Tsn1* различаются по механизму устойчивости к изолятам Ptr, продуцирующим токсин Ptr ToxA, и поэтому каждый из них по-своему ценен для селекции.

Из всей выборки проанализированных нами образцов стародавней мягкой пшеницы лишь образцы предгорной азербайджано-дагестанской группы мягких пшениц в основном реагировали в ответ на инокуляцию Ptr в соответствии с представлениями о комплементарности генов *Tsn1* и *ToxA.* Известно, что взаимоотношения в патосистеме «мягкая пшеница – *P. tritici-repentis*» осуществляются по типу «ген-на-ген» в зеркальном отражении, то есть следует ожидать, что изоляты, несущие ген *ToxA* и продуцирующие некроз-индуцирующий токсин, должны вызывать реакцию восприимчивости у сортов, имеющих в своем генотипе доминантный аллель *Tsn1* (Strelkov, Lamari, 2003; Ciuffetti et al., 2010). Для образцов из других агроэкологических групп не наблюдали достоверной связи между наличием/отсутствием доминантного аллеля *Tsn1* и устойчивостью/восприимчивостью к желтой пятнистости.

Из литературы известно, что экспрессия некоторых генов восприимчивости растений и генов – эффекторов патогенов, включая *Tsn1* и *ToxA*, регулируется циркадными ритмами и светом (Faris et al., 2010; Oliver et al., 2012; McDonald, Solomon, 2018). Предполагают, что с помощью вариаций длин волн света можно контролировать или предотвращать вспышки заболеваний растений (Breen et al., 2023). Полученные нами данные о дифференциации стародавней озимой мягкой пшеницы, относящейся к разным агроэкологическим группам, по присутствию/отсутствию доминантных аллелей *Tsn1* и устойчивости/восприимчивости к желтой пятнистости могут быть использованы при подборе исходного материала для более углубленного изучения особенностей взаимодействия этого патогена и растения-хозяина, а также влияния на них внешних условий.

Заключение

По результатам оценки устойчивости к возбудителю желтой пятнистости выделены 17 образцов стародавней пшеницы (к-457, к-622, к-3902, к-8518, к-9463, к-9815, к-11225, к-14977, к-18104, к-18719, к-23924, к-23956, к-25064, к-26550, к-35921, к-40182, к-43251), устойчивых или умеренно устойчивых к популяциям патогена Тамб-21 и Лен-21, а также к ранее использованному изоляту из Краснодарского края. Это позволяет считать образцы источниками устойчивости к этому экономически значимому заболеванию пшеницы. Отмечены образцы с реакцией R к обеим популяциям – к-8518 (Московская 2411, Россия, Московская обл.) и к-25064 (Rouge de la Venoge, Швейцария).

Доминантный аллель гена восприимчивости *Tsn1* к *P. tritici-repentis* найден у 55% образцов изученной выборки стародавней озимой мягкой пшеницы, которые относятся к различным агроэкологическим группам по классификации Н. И. Вавилова (Vavilov, 1964).

На исследованной выборке образцов не обнаружено достоверной связи между выявленным с помощью маркера *Xfcp623* аллельным состоянием гена *Tsn1* у образца и его реакцией в ответ на заражение популяциями патогена, включающими изоляты с геном *ToxA*.

References / Литература

Ahmadi H., Solouki M., Fazeli-Nasab B., Heidari F., Sayyed R.Z. Internal Transcribed Spacer (ITS) regions: a powerful tool for analysis of the diversity of wheat genotypes. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2022;60(2022):137-143.

Andrie R.M., Pandelova I., Ciuffetti L.M. A combination of phenotypic and genotypic characterization strengthens *Pyrenophora tritici-repentis* race identification. *Phytopathology*. 2007;97(6):694-701. DOI: 10.1094/PHYTO-97-6-0694

Ballance G.M., Lamari L., Bernier C.C. Purification and characterization of a host-selective necrosis toxin from *Pyrenophora tritici-repentis*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 1989;35(3):203-213. DOI: 10.1016/0885-5765(89)90051-9

Breen S., McLellan H., Birch P.R.J., Gilroy E.M. Tuning the wavelength: manipulation of light signaling to control plant defense. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(4):3803. DOI: 10.3390/ijms24043803

Ciuffetti L.M., Manning V.A., Pandelova I., Betts M.F. Host-selective toxins, Ptr ToxA and Ptr ToxB, as necrotrophic effectors in the *Pyrenophora tritici-repentis*–wheat interaction. *New Phytologist*. 2010;187(4):911-919. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03362.x

Ciuffetti L.M., Tuori R.P., Gaventa J.M. A single gene encodes a selective toxin causal to the development of tan spot of wheat. *The Plant Cell*. 1997;9(2):135-144. DOI: 10.1105/tpc.9.2.135

Cseh A., Poczai P., Kiss T., Balla K., Berki Z., Horváth Á. et al. Exploring the legacy of Central European historical winter wheat landraces. *Scientific Reports*. 2021;11(1):23915. DOI: 10.1038/s41598-021-03261-4

Faris J.D., Zhang Z., Lu H., Lu S., Reddy L., Cloutier S. et al. A unique wheat disease resistance-like gene governs effector-triggered susceptibility to necrotrophic pathogens. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2010;107(30):13544-13549. DOI: 10.1073/pnas.1004090107

Kornyukhin D.L., Mitrofanova O.P., Mikhailova L.A., Kovalenko N.M. Genetic diversity of landraces and old local cultigens of bread wheat for resistance to leaf blotch, tan spot, and spot blotch (catalogue) (Genofond staromestnykh i starodavnikh selektsionnykh sortov myagkoy pshenitsy po ustoychivosti k buroy rzhavchine, zheltoy i temno-buroy pyatnistosti [katalog]). St. Petersburg: VIZR; 2013. [in Russian] (Корнюхин Д.Л., Митрофанова О.П.,

Михайлова Л.А., Коваленко Н.М. Генофонд старомест-ных и стародавних селекционных сортов мягкой пше-ницы по устойчивости к бурой ржавчине, желтой и темно-бурой пятнистости (каталог). Санкт-Петер-бург: ВИЗР; 2013).

Lamari L., Bernier C.C. Toxin of *Pyrenophora tritici repentis*: host-specificity, significance in disease, and inheritance of host reaction. *Phytopathology*. 1989;79:740-744.

McDonald M.C., Solomon P.S. Just the surface: advances in the discovery and characterization of necrotrophic wheat effectors. *Current Opinion in Microbiology*. 2018;46:14-18. DOI: 10.1016/j.mib.2018.01.019

Mikhailova L.A., Gultyaeva E.I., Kokorina N.M. Laboratory methods of cultivation of wheat tan spot causal agent *Pyrenophora tritici-repentis* (Laboratornye metody kultivirovaniya vozbuditelya zheltoy pyatnistosti pshenitsy *Pyrenophora tritici-repenti*). *Mycology and Phytopathology*. 2002;36(1):63-67. [in Russian] (Михайлова Л.А., Гультяева Е.И., Кокорина Н.М. Лабораторные методы культивирования возбудителя желтой пятнистости пшеницы *Pyrenophora tritici-repentis. Микология и фитопатология*. 2002;36(1):63-67).

Mikhailova L.A., Kovalenko N.M. Characterization of bread and durum wheat resistance to the *Pyrenophora tritici-repentis* pathogen (Kharakteristika ustoychivosti myagkoy i tverdoy pshenitsy k vozbuditelyu zheltoy pyatnistosti *Pyrenophora tritici-repentis*). *Plant Protection News*. 2009;(1):10-15. [in Russian] (Михайлова Л.А., Коваленко Н.М. Характеристика устойчивости мягкой и твердой пшеницы к возбудителю желтой пятнистости *Pyrenophora tritici-repentis*. *Вестник защиты растений*. 2009;(1):10-15).

Murray M.G., Thompson W.F. Rapid isolation of high molecular weight plant DNA. *Nucleic Acids Research.* 1980;8(19):4321-4325. DOI: 10.1093/nar/8.19.4321

Oliver R.P., Friesen T.L., Faris J.D., Solomon P.S. *Stagonospora nodorum*: from pathology to genomics and host resistance. *Annual Review of Phytopathology*. 2012;50:23-43. DOI: 10.1146/annurev-phyto-081211-173019

Rees R.G., Platz G.J., Mayer R.J. Susceptibility of Australian wheats to *Pyrenophora tritici-repentis*. *Australian Journal of Agricultural Research*. 1987;39:141-151.

Strelkov S., Lamari L. Host–parasite interactions in tan spot (*Pyrenophora tritici-repentis*) of wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2003;25(4):339-349. DOI: 10.1080/07060660309507089

Tehseen M.M., Tonk F.A., Tosun M., Istipliler D., Amri A., Sansaloni C.P. et al. Exploring the genetic diversity and population structure of wheat landrace population conserved at ICARDA Genebank. *Frontiers in Genetics*. 2022;13:900572. DOI: 10.3389/fgene.2022.900572

Tomas A., Feng G.H., Reeck G.R., Bockus W.W., Leach J.E. Purification of a cultivar-specific toxin from *Pyrenophora tritici-repentis*, causal agent of tan spot of wheat. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 1990;3(4):221-224.

Tuori R.P., Wolpert T.J., Ciuffetti L.M. Purification and immunological characterization of toxic components from cultures of *Pyrenophora tritici-repentis*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 1995;8(1):41-48. DOI: 10.1094/mpmi-8-0041

Vavilov N.I. World resources of cereals, grain leguminous crops and flax and their utilization in plant breeding. Agroecological survey of the principal field crops. Moscow; Leningrad: USSR Academy of Sciences; 1957. [in Russian] (Вавилов Н.И. Мировые ресурсы сортов хлебных злаков, зерновых бобовых, льна и их использование в селекции. Опыт агроэкологического обозрения важнейших полевых культур. Москва; Ленинград: АН СССР; 1957).

Vavilov N.I. World resources of cereals, grain leguminous crops and flax and their utilization in plant breeding. Wheat (Mirovye resursy sortov khlebnykh zlakov, zernovykh bobovykh, lna i ikh ispolzovaniye v selektsii. Pshenitsa). Moscow; Leningrad: Nauka; 1964. [in Russian] (Вавилов Н.И. Мировые ресурсы сортов хлебных злаков, зерновых бобовых, льна и их использование в селекции. Пшеница. Москва; Ленинград: Наука; 1964).

White T.J., Bruns T., Lee S., Taylor J. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: M.A. Innis, D.H. Gelfand, J.J. Sninsky, T.J. White (eds). *PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications*. London: Academic Press; 1990. p.315-322.

Zaitsev G.N. Mathematical statistics in experimental botany (Matematicheskaya statistika v eksperimentalnoy botanike). Moscow: Nauka; 1984. [in Russian] (Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. Москва: Наука; 1984).

Информация об авторах

Нина Васильевна Мироненко, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, nina2601mir@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-3383-2973

Надежда Михайловна Коваленко, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, nadyakov@mail.ru, http://orcid.org/0000-0001-9577-8816

Ольга Александровна Баранова, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, ш. Подбельского, 3, baranova_oa@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9439-2102

Ольга Павловна Митрофанова, 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, o.mitrofanova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-9171-2964

Information about the authors

Nina V. Mironenko, Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, nina2601mir@mail.ru, http://orcid.org/0000-0003-3383-2973

Nadezhda M. Kovalenko, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, nadyakov@mail.ru, http://orcid.org/0000-0001-9577-8816

Olga A. Baranova, Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, All-Russian Research Institute of Plant Protection, 3 Podbelskogo Hwy., Pushkin, St. Petersburg 196608, Russia, baranova_oa@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-9439-2102

Olga P. Mitrofanova, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, o.mitrofanova@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-9171-2964

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 07.08.2023; одобрена после рецензирования 23.10.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 07.08.2023; approved after reviewing on 23.10.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ИММУНИТЕТ КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.16:632.732
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-215-221

CC BY

Разнообразие образцов ячменя из азиатской части Российской Федерации по устойчивости к обыкновенной злаковой тле

Е. Е. Радченко[1], Р. А. Абдуллаев[1], К. Д. Дятлова[2], Д. Е. Акимова[1], И. А. Звейнек[1]

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

[2] Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Автор, ответственный за переписку: Евгений Евгеньевич Радченко, eugene_radchenko@rambler.ru

Актуальность. Выращивание устойчивых к обыкновенной злаковой тле *Schizaphis graminum* Rondani сортов ячменя – эффективный, экономичный и экологически безопасный способ борьбы с опасным фитофагом. Насекомое способно преодолевать устойчивость растения-хозяина, что обусловливает необходимость неустанного поиска новых генов для обеспечения надежной защиты посевов ячменя от вредителя.
Материалы и методы. Изучали устойчивость к краснодарской популяции насекомого 345 образцов ячменя из азиатской части России. Кроме того, исследовали устойчивость к *S. graminum* сорта 'Post' (носитель гена *Rsg1*), чистой линии, выделенной из гетерогенного по изучаемому признаку сорта 'Онохойский' (к-16626, Бурятия), и образцов местного ячменя из Монголии (к-3885, к-3904 и к-4080). В лабораторных экспериментах ювенильные растения заселяли тлей и при гибели неустойчивого контроля с помощью балловой шкалы оценивали степень поврежденности опытных образцов ячменя. Генетический контроль устойчивости к тле у выделенной из сорта 'Онохойский' линии изучали с помощью тест-клонов насекомого и анализа гибридов F_2, полученных от скрещивания устойчивой линии с восприимчивым к тле сортом 'Белогорский', при заселении растений краснодарской популяцией фитофага, а также клонами *S. graminum*.
Результаты и выводы. Выделили 7 гетерогенных образцов, среди которых у трех местных образцов из Тувы (к-14714, к-14718, к-14733) выявлены растения с высоким уровнем устойчивости к *S. graminum*. Отчетливо выражена и устойчивость выделенной из сорта 'Онохойский' линии. Этот сорт защищен доминантным аллелем, отличающимся от идентифицированного ранее *Rsg1*, а также от аллелей, которые выявлены у образцов местного ячменя к-3904, к-4080 и к-3885 из Монголии. 'Онохойский' имеет также гены с низкой экспрессивностью, которые проявляются в случае утраты эффективности главного гена устойчивости к *S. graminum*.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., *Schizaphis graminum* Rondani, поврежденность, гены устойчивости, селекция растений

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: Радченко Е.Е., Абдуллаев Р.А., Дятлова К.Д., Акимова Д.Е., Звейнек И.А. Разнообразие образцов ячменя из азиатской части Российской Федерации по устойчивости к обыкновенной злаковой тле. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):215-221. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-215-221

© Радченко Е.Е., Абдуллаев Р.А., Дятлова К.Д., Акимова Д.Е., Звейнек И.А., 2023

IMMUNITY OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-215-221

Diversity of barley accessions from the Asian part of Russia in greenbug resistance

Evgeny E. Radchenko[1], Renat A. Abdullaev[1], Ksenia D. Dyatlova[2], Daria E. Akimova[1], Igor A. Zveinek[1]

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

[2] *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia*

Corresponding author: Evgeny E. Radchenko, eugene_radchenko@rambler.ru

Background. The use of barley cultivars resistant to greenbug (*Schizaphis graminum* Rondani) is an effective, economical and ecology-friendly way to control the dangerous phytophage. The insect is able to overcome the resistance of the host plant, which necessitates a relentless search for new genes to ensure reliable protection of barley fields from the pest.
Materials and methods. Resistance to the Krasnodar greenbug population was assessed in 345 barley accessions from the Asian part of Russia. Besides, resistance to *S. graminum* was studied in cv. 'Post' (carrier of the *Rsg1* gene), a pure line derived from cv. 'Onokhoisky' (k-16626, Buryatia) heterogeneous for this trait, and landraces from Mongolia (k-3885, k-3904, and k-4080). Juvenile plants were infested with aphids in the laboratory, and when a susceptible control died, the damage to experimental barley accessions was assessed using a scoring scale. Genetic control of greenbug resistance in the line derived from cv. 'Onokhoisky' was studied using the insect's test clones and an analysis of the segregation in F_2 hybrids from crossing the resistant line with cv. 'Belogorsky' susceptible to the aphid, when the plants were infested with the Krasnodar population of the phytophage and with clones of *S. graminum*.
Results and conclusions. We identified 7 accessions heterogeneous for aphid resistance. Among them, plants with a high level of greenbug resistance were found in three landraces from Tuva (k-14714, k-14718, and k-14733). Resistance was also clearly expressed in the line derived from cv. 'Onokhoisky'. This cultivar is protected by a dominant allele that differs from the previously identified *Rsg1*, as well as from the alleles found in Mongolian landraces k-3904, k-4080, and k-3885. 'Onokhoisky' also has genes with low expressivity, which manifest themselves when the main gene for resistance to *S. graminum* appears ineffective.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., *Schizaphis graminum* Rondani, damage score, genes for resistance, plant breeding

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: Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Dyatlova K.D., Akimova D.E., Zveinek I.A. Diversity of barley accessions from the Asian part of Russia in greenbug resistance. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):215-221. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-215-221

Введение

Существенный ущерб посевам ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в основных зерносеющих регионах юга России может причинять обыкновенная злаковая тля (*Schizaphis graminum* Rondani). Возделывание устойчивых сортов считается эффективным и экологически безопасным способом борьбы с этим насекомым. К сожалению, присущая *S. graminum* специфичность взаимодействия с генотипами ячменя зачастую приводит к утрате эффективности генов устойчивости. Возделывание на обширных площадях генетически однородных сортов может привести к огромным потерям урожая.

Известно лишь 5 аллелей трех генов, которые контролируют устойчивость ячменя к отдельным биотипам обыкновенной злаковой тли в США. Локализованный в хромосоме 1 доминантный аллель устойчивости, который был обозначен символом *Rsg1a*, а впоследствии – *Rsg1*, идентифицирован у сортов 'Omugi', 'Dobaku', 'Derbent', 'Kearney', 'Will' и 'Post' (Gardenhire, Chada, 1961; Smith et al., 1962; Gardenhire et al., 1973; Edwards et al., 1985). С помощью молекулярных маркеров было показано, что *Rsg1* локализован в длинном плече хромосомы 3H (Azhaguvel et al., 2014). У пакистанского образца PI 426756 выявлен доминантный аллель *Rsg2b* (Merkle, Webster, 1987). Этот ген, в отличие от *Rsg1a*, проявляется против биотипа TX1. Специфическое взаимодействие хозяина и фитофага послужило основанием для переименования генов устойчивости, которым были предложены символы *Rsg1* и *Rsg2* (Puterka et al., 1988; Anstead et al., 2003).

Показан множественный аллелизм локусов *Rsg1* и *Rsg2*. Так, образец WBDC336 (PI 682028) (*H. vulgare* subsp. *spontaneum* (K. Koch) Thell.) защищен аллелем *Rsg1.a3*, обеспечивающим устойчивость к биотипам *S. graminum* C, E, H, I, WY81, WY12 MC и WY86 (Xu et al., 2021). Установлено, что образец WBDC053 (PI 681777) (*H. vulgare* subsp. *spontaneum*) несет аллель *Rsg2.a3*, тесно сцепленный с *Rsg2* либо аллельный ему. WBDC053 устойчив к биотипам B, C, E, I, TX1, WY4A, WY4B, WY81, WY12MC и WY86, однако сильно повреждается биотипами тли F, H, WY10MC и WY10B (Xu et al., 2022).

Ген *Rsg3*, идентифицированный у образца местного ячменя PI 565676 из Китая, локализован в длинном плече хромосомы 3H. Этот ген обеспечивает высокую устойчивость к биотипу *S. graminum* F и умеренную – к биотипу E (Xu et al., 2023). Кроме PI 565676, еще 3 образца из Китая (P I565657, P I566459, CI 2548) обладают устойчивостью к ряду биотипов насекомого в США (Mornhinweg et al., 2017).

Банк эффективных генов устойчивости может быть значительно пополнен за счет местных образцов и стародавних сортов ячменя, прежде всего из стран Азии. Известно, что горные районы Индийской и Манчжурско-Китайской подобластей являются центром происхождения тлей (Shaposhnikov, 1967). В наших опытах наиболее устойчивые к *S. graminum* формы сорго были выявлены среди образцов из Китая (Radchenko, Zubov, 2007), многие устойчивые к обыкновенной злаковой тле *S. graminum* образцы овса происходят из стран Азии (Radchenko et al., 2018), высокая частота слабо повреждаемых образцов характерна для ячменя из стран Восточной, Южной Азии (Radchenko et al., 2014) и Узбекистана (Radchenko et al., 2021). Показано, что образцы ячменя к-3885, к-3904 и к-4080 из Монголии имеют по одному гену устойчивости, которые отличаются друг от друга, а также от аллеля *Rsg1* (Radchenko et al., 2022).

Цель настоящей работы – оценить генетическое разнообразие образцов ячменя из азиатской части Российской Федерации по устойчивости к *S. graminum*.

Материалы и методы

Материалом для экспериментов служили 345 образцов ячменя (местные формы, стародавние и современные сорта) из азиатской части РФ и контрольный сорт 'Белогорский', восприимчивый к насекомому. Кроме того, изучали устойчивость к *S. graminum* сорта 'Post' (носитель гена *Rsg1*), чистой линии, выделенной из гетерогенного по изучаемому признаку сорта 'Онохойский' (к-16626, Бурятия), и отобранных из гетерогенных монгольских образцов местного ячменя (к-3885, к-3904 и к-4080) линий, каждая из которых имеет по одному гену, контролирующему слабую поврежденность растений тлей. Оценивали также устойчивость гибридов F_1 от скрещивания сорта 'Белогорский' с выделенной из сорта 'Онохойский' линией и анализировали расщепление по изучаемому признаку гибридов F_2, полученных от скрещивания этих образцов.

Экспериментальная работа выполнена в контролируемых условиях. Оценивали поврежденность опытных образцов ячменя краснодарской (поселок Ботаника Гулькевичского района) популяцией насекомого и выделенными из нее клонами. *S. graminum* собирали в начале июля 2022 г. на сортах сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) 'Кубанское Красное 1677', 'Ефремовское Белое' и 'СЛВ-2'. Собранные в поле выборки клонировали в лаборатории. Для этого семена сорта 'Белогорский' раскладывали на смоченную водой вату, помещенную в половинки чашек Петри. На появившиеся через несколько дней всходы в каждой чашке подсаживали самку и накрывали стеклянными изоляторами. Садки с клонами размещали на освещаемых люминесцентными лампами стеллажах. В экспериментах поддерживалось 108 клонов насекомого.

При изучении устойчивости опытные образцы высевали рядами в пластиковые кюветы с почвой. В каждую кювету помещали 10 рядов испытываемых форм, 2 ряда неустойчивого контроля и сорт 'Post'. Ювенильные растения заселяли популяцией насекомого (смесь имевшихся в нашем распоряжении 108 клонов), стряхивая на ячмень разновозрастных тлей (4-5 особей на растение). Питание *S. graminum* обусловливает некротизацию растительных тканей, что позволяет охарактеризовать поврежденность растений в баллах. При гибели контрольного сорта 'Белогорский' оценивали устойчивость растений, используя шкалу от 0 до 10. К устойчивому классу относили растения, поврежденность которых не превышала четырех баллов (не более 30% листовой поверхности), восприимчивыми считали растения, степень поврежденности которых превышала 70% (Radchenko, 2008). Выделившиеся по устойчивости образцы тестировали повторно.

Изучили устойчивость сорта 'Post', выделенной из сорта 'Онохойский' линии, а также трех устойчивых линий ячменя из Монголии к 108 клонам *S. graminum*. Опытные образцы и неустойчивый контроль высевали по кругу в сосуды с почвой и закрывали изоляторами. Появившиеся всходы заселяли тлями одного клона и при гибели сорта 'Белогорский' оценивали поврежденность растений по упомянутой выше шкале. При нечетком проявлении признака эксперимент повторяли.

Для анализа расщепления по устойчивости к тле гибридов F_2 от скрещивания выделенной из сорта 'Онохой-

ский' линии с восприимчивым тестером в кювету с почвой высевали по одному ряду P_1, P_2, F_1 и по 7-8 рядов F_2. Семена F_2 были собраны с одного растения F_1. Ювенильные растения заселяли популяцией либо клоном тли, авирулентным к устойчивой линии, отобранной из сорта 'Онохойский'. При гибели (9-10 баллов) неустойчивого родителя оценивали поврежденность растений. Неустойчивыми (S) считали растения, сходные по степени поврежденности с сортом 'Белогорский'. К устойчивому классу (R) относили растения, сходные с 'Онохойским' и поврежденные несколько сильнее (предполагаемые гетерозиготы). Соответствие фактических и ожидаемых данных проверяли с помощью критерия χ^2.

Результаты и обсуждение

Скрининг коллекции ячменя из азиатской части России позволил выделить 7 гетерогенных образцов, у которых поврежденность устойчивого к *S. graminum* компонента варьировала от двух до восьми баллов (табл. 1). Существенная изменчивость признака может быть вызвана наличием в популяции тли различающихся по вирулентности к образцам ячменя клонов либо экспрессией генов со слабым фенотипическим проявлением. Сорт 'Онохойский' в этих экспериментах не выделился по устойчивости к насекомому, все растения погибли (поврежденность – 10 баллов). Видимо, фенотипический класс устойчивых генотипов в изученной выборке семян (репродукция КОС ВИР 2015 г.) отсутствовал, либо его частота была очень низка. Выделенная в предыдущих исследованиях из этого сорта линия характеризовалась высокой (2–4 балла) устойчивостью к тле.

Поврежденность растений сорта 'Post', защищенного геном *Rsg1*, составляла 7–9 баллов, то есть в краснодарской популяции *S. graminum* превалировали вирулентные к этому сорту клоны. Поврежденность устойчивых компонентов трех образцов местного ячменя из Тувы составляла 2–4 балла (см. табл. 1). Следовательно, образцы к-14714, к-14718 и к-14733 имеют аллели устойчивости, которые отличаются от *Rsg1*.

Частоты вирулентных к пяти образцам ячменя (сильно повреждавших растения) клонов тли существенно различались. Большинство клонов были вирулентны к сорту 'Post' (83,0% от общего числа изученных), образцам к-3904 (97,2%), к-3888 (73,1%) и к-4080 (95,4%), тогда как линию, отобранную из сорта 'Онохойский', сильно повреждали 23 клона из 108 изученных (21,3%). Надо отметить существенное изменение краснодарской популяции насекомого 2022 г. в сравнении с предыдущим годом: в 2021 г. 32–45% клонов в краснодарской популяции насекомого были вирулентны к образцам из Монголии и к сорту 'Post' (Radchenko et al., 2022).

Различающиеся по фенотипам вирулентности клоны обыкновенной злаковой тли («тест-клоны») позволяют идентифицировать у выделенных образцов ячменя гены резистентности к фитофагу. Если всего лишь 1 клон, авирулентный к тестеру данного гена устойчивости, сильно повреждает оцениваемый образец, то это свидетельствует о том, что образец не имеет функционального аллеля данного гена. В наших экспериментах для идентификации аллелей оказалось достаточно трех клонов *S. graminum* (табл. 2). Так, выделенная из сорта 'Онохойский' линия и образец к-3885 были устойчивы к клону 1, тогда как к-4080, к-3904 и 'Post' – восприимчивы. Следовательно, аллели устойчивости у 'Онохойского' и к-3885 отличаются от аллелей, которые имеют остальные образцы. Взаимодействие исследуемых образцов и *S. graminum* с фенотипом вирулентности 2 свидетельствует о различии генетического контроля устойчивости 'Онохойского' и к-3885. Кроме того, аллели генов устойчивости образцов к-3904, к-4080 и к-3885 отличаются от *Rsg1*. При сравнении поврежденности образцов клоном, имеющим фенотип вирулентности 3, выявлено различие аллелей, которыми защищены образцы к-4080 и к-3904. Таким образом, все 5 образцов имеют разные аллели устойчивости к обыкновенной злаковой тле.

Таблица 1. Образцы ячменя из азиатской части России, выделившиеся по устойчивости к *Schizaphis graminum* Rondani

Table 1. Barley accessions from the Asian part of Russia identified for their resistance to *Schizaphis graminum* Rondani

№ по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Происхождение / Origin	Разновидность / Variety	Устойчивость, балл / Resistance score
14714	Местный	Тува	pallidum	4, 7, 8, 9, 10
14718	«	«	pallidum	3, 4, 7, 8
14733	«	«	nutans	2, 3, 4, 7, 8, 9
24756	«	Якутия	pallidum	5, 7, 10
29622	'Маяк'	Красноярский край	nutans	6, 7, 8, 10
30121	'Иркут'	Иркутская обл.	pallidum	5, 7, 8, 10
30826	'Вулкан'	Красноярский край	nutans	5, 7, 8, 10
16626	'Онохойский' (отбор)	Бурятия	pallidum	1–4
31204	'Post' (контроль)		pyramidatum	7, 8, 9
22089	'Белогорский' (контроль)		pallidum	9, 10

Таблица 2. **Устойчивость образцов ячменя к тест-клонам *Schizaphis graminum* Rondani**

Table 2. **Resistance of barley accessions to test clones of *Schizaphis graminum* Rondani**

Номер по каталогу ВИР / VIR catalogue No.	Образец / Accession	Клон *Schizaphis graminum* / Clone of *Schizaphis graminum*		
		1	2	3
31204	'Post'	S	R	S
16631	'Онохойский'	R	R	R
3885	Местный	R	S	R
3904	«	S	S	R
4080	«	S	S	S

Примечание: R – устойчивый образец; S – восприимчивый образец

Note: R – resistant accession; S – susceptible accession

Необходимо отметить, что мы оценивали дифференциальное взаимодействие генотипов *S. graminum* с отчетливо проявляющимися (поврежденность растений до четырех баллов) генами устойчивости образцов ячменя. Вместе с тем при заселении линий клонами насекомого отмечено 3 фенотипических класса: устойчивый (поврежденность растений на уровне 1-4 балла, действие генов с высокой экспрессивностью у данного образца к данному клону), умеренно устойчивый (6-8 баллов, экспрессия слабо проявляющихся генов) и восприимчивый (9-10 баллов, вирулентность и к главным, и к малым генам устойчивости). Так, все 23 клона, вирулентные к линии, отобранной из сорта 'Онохойский', обусловливали поврежденность растений на уровне 7-9 баллов при гибели контрольного сорта 'Белогорский'. Наблюдали и варьирование по степени проявления признака в пределах устойчивого класса: выявили клоны, обусловливающие поврежденность растений на уровне 1-2, 3-4 и 2–4 балла.

В лабораторных условиях анализировали расщепление гибридов F_2, полученных от скрещивания линии, выделенной из сорта 'Онохойский', с восприимчивым к тле сортом 'Белогорский', при заселении растений краснодарской популяцией фитофага, а также клонами *S. graminum*. Клон 1 обусловливал поврежденность линии из сорта 'Онохойский' на уровне 1-2 (преимущественно 1) балла, клон 2 – 3-4 балла и клон 3 – 7-8 баллов.

При анализе гибридов F_2 уровень поврежденности линии, выделенной из сорта 'Онохойский', во всех случаях был сходен с наблюдавшимся ранее при работе с тест-клонами фитофага. Устойчивость доминировала: степень повреждения гетерозигот и устойчивой родительской формы были идентичны.

Соотношение устойчивых (R) и восприимчивых (S) фенотипов 505 : 184 в F_2 Белогорский × Онохойский при заселении растений популяцией фитофага соответствовало предположению о моногенном доминантном контроле признака (χ^2 = 1,069; P = 0,25–0,50) (табл. 3). Реципрокное скрещивание (Онохойский × Белогорский) не выявило влияния женского или мужского гаметофитов на характер наследования признака. При заселении растений F_2 клонами 1 и 2 полученное соотношение феноти-

Таблица 3. **Расщепление по устойчивости к обыкновенной злаковой тле гибридов F_2 от скрещивания сорта 'Онохойский' с неустойчивым тестером**

Table 3. **Segregation for greenbug resistance in F_2 hybrids from crossing cv. 'Onokhoisky' with a susceptible tester**

Комбинация скрещивания / Cross combination	Оценено растений / Total number of plants	Инвазионный материал / Infesting material	Соотношение фенотипов R : S / Phenotype ratio R : S		χ^2	P
			фактическое / observed	теоретическое / expected		
Белогорский × Онохойский	689	популяция	505 : 184	3 : 1	1,069	0,25–0,50
Онохойский × Белогорский	258	популяция	194 : 64	3 : 1	0,005	0,90–0,95
Белогорский× Онохойский	440	клон 1	326 : 114	3 : 1	0,194	0,50–0,75
Белогорский × Онохойский	144	клон 2	104 : 40	3 : 1	0,593	0,25–0,50
Белогорский × Онохойский	429	клон 3	270 : 159	3 : 1	33,294	< 0,005

Примечание: $\chi^2_{0,05}$ = 3,84

Note: $\chi^2_{0.05}$ = 3.84

пов также соответствовало теоретически ожидаемому 3R : 1S. Заселение растений клоном 3 обусловливало поврежденность выделенной из сорта 'Онохойский' линии на уровне 7–9 баллов и гибрида F_1 – 7-8 баллов, при гибели (10 баллов) растений сорта 'Белогорский'. Полученное соотношение фенотипов (270R : 159S) не удовлетворяет предположению о моногенном доминантном контроле признака, то есть слабо выраженная устойчивость – не результат снижения экспрессии главного гена, а проявление малых генов, экспрессия которых маскировалась при взаимодействии генотипов растений с авирулентными клонами насекомого.

Ранее мы исследовали генетическую природу слабо выраженной устойчивости, которая наблюдается при взаимодействии образцов сорго, защищенных олигогенами, с вирулентными клонами *S. graminum*. Анализировали совместное наследование резистентности линий с генами *Sgr1* и *Sgr4 – Sgr6* против авирулентных и вирулентных к ним клонов фитофага. Во всех случаях слабо проявляющаяся устойчивость оказалась не связана с неполным преодолением олигогена вирулентным клоном, а объяснялась эффектом малых генов (Radchenko et al., 2001). В опытах X. Xu с соавторами (Xu et al., 2023) ген *Rsg3* обеспечивал высокую устойчивость образца местного ячменя из Китая PI 565676 к биотипу *S. graminum* F и умеренную – к биотипу E, то есть наблюдали варьирование экспрессии гена *Rsg3* в пределах устойчивого класса.

В наших экспериментах отмечено сходное варьирование уровня проявления гена устойчивости у сорта 'Онохойский' при взаимодействии с авирулентными клонами тли. Утрата эффективности отчетливо проявляющегося гена устойчивости обусловливает экспрессию маскировавшихся ранее генов со слабым фенотипическим проявлением.

Заключение

В результате изучения 345 образцов ячменя из азиатской части РФ выделили 7 гетерогенных образцов, среди которых у трех местных образцов из Тувы (к-14714, к-14718, к-14733) выявлены растения с высоким уровнем устойчивости к краснодарской популяции *S. graminum*. Отчетливо выражена и устойчивость чистой линии, выделенной из сорта 'Онохойский' (к-16626, Бурятия). Установлено, что этот сорт защищен доминантным аллелем устойчивости к вредителю, который отличается от *Rsg1*, а также от аллелей, выявленных у образцов местного ячменя к-3904, к-4080 и к-3885 из Монголии. Кроме того, 'Онохойский' имеет слабо экспрессирующиеся гены устойчивости к *S. graminum*, которые проявляются в случае утраты эффективности главным геном устойчивости к обыкновенной злаковой тле.

References / Литература

Anstead J.A., Burd J.D., Shufran K.A. Over-summering and biotypic diversity of *Schizaphis graminum* (Homoptera: Aphididae) populations on noncultivated grass hosts. *Environmental Entomology*. 2003;32(3):662-667. DOI: 10.1603/0046-225X-32.3.662

Azhaguvel P., Mornhinweg D., Vidya-Saraswathi D., Rudd J.C., Chekhovskiy K., Saha M. et al. Molecular mapping of greenbug (*Schizaphis graminum*) resistance gene *Rsg1* in barley. *Plant Breeding*. 2014;133(2):227-233. DOI: 10.1111/pbr.12143

Edwards L.H., Smith E.L., Pass H., Morgan G.H. Registration of Post barley. *Crop Science*. 1985;25(2):363.

Gardenhire J.H., Chada H.L. Inheritance of greenbug resistance in barley. *Crop Science*. 1961;1(5):349-352.

Gardenhire J.H., Tuleen N.A., Stewart K.W. Trisomic analysis of greenbug resistance in barley, *Hordeum vulgare* L. *Crop Science*. 1973;13(6):684-685. DOI: 10.2135/cropsci1973.0011183X001300060029x

Merkle O.G., Webster J.A., Morgan G.H. Inheritance of a second source of greenbug resistance in barley. *Crop Science*. 1987;27(2):241-243. DOI: 10.2135/cropsci1987.0011183X002700020023x

Mornhinweg D., Armstrong J.S., Puterka G.J. New greenbug resistant sources in winter barley, *Hordeum vulgare*. *Southwestern Entomologist*. 2017;42(3):619-626. DOI: 10.3958/059.042.0301

Puterka G.J., Peters D.C., Kerns D.L., Slosser J.E., Bush L., Worrall D.W. et al. Designation of two new greenbug (Homoptera: Aphididae) biotypes G and H. *Journal of Economic Entomology*. 1988;81(6):1754-1759. DOI: 10.1093/jee/81.6.1754

Radchenko E.E. Cereal aphids (Zlakovye tli). In: *The study of the genetic resources of cereal crops for resistance to harmful organisms. Guidelines* (*Izucheniye geneticheskikh resursov zernovykh kultur po ustoychivosti k vrednym organizmam. Metodicheskoye posobiye*). Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences; 2008. p.214-257. [in Russian] (Радченко Е.Е. Злаковые тли. В кн.: *Изучение генетических ресурсов зерновых культур по устойчивости к вредным организмам. Методическое пособие*. Москва: Россельхозакадемия; 2008. С.214-257).

Radchenko E.E., Abdullaev R.A., Akimova D.E., Zajtseva I.Y. Genetic diversity of barley accessions from Mongolia for greenbug resistance. *Ecological genetics*. 2022;20(3):175-182. [in Russian] (Радченко Е.Е., Абдуллаев Р.А., Акимова Д.Е., Зайцева И.Ю. Генетическое разнообразие образцов ячменя из Монголии по устойчивости к обыкновенной злаковой тле. *Экологическая генетика*. 2022;20(3):175-182). DOI: 10.17816/ecogen105875

Radchenko E.E., Dyatlova K.D., Akimova D.E., Zveinek I.A. Greenbug resistance in barley landraces from Uzbekistan. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):182-185. DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-182-185

Radchenko E.E., Kuznetsova T.L., Chumakov M.A., Loskutov I.G. Greenbug (*Schizaphis graminum*) resistance in oat (*Avena* spp.) landraces from Asia. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 2018:65(2):571-576. DOI: 10.1007/s10722-017-0554-9

Radchenko E.E., Kuznetsova T.L., Zveinek I.A., Kovaleva O.N. Greenbug resistance in barley accessions from East and South Asia. *Russian Agricultural Sciences*. 2014;40(2):117-120. DOI: 10.3103/S1068367414020177

Radchenko E.E., Odintsova I.G., Vlasova T.V. Inheritance of a weakly expressed greenbug resistance in sorghum. *Russian Journal of Genetics*. 2001;37(10):1144-1149. DOI: 10.1023/A:1012352521382

Radchenko E.E., Zubov A.A. Genetic diversity of sorghum in greenbug resistance. *Russian Agricultural Sciences*. 2007;33(4):223-225. DOI: 10.3103/S1068367407040039

Shaposhnikov G.Kh. Aphid evolution in connection with specialization and changes of hosts (Evolyutsiya tley v svyazi so spetsializatsiyey i smenoy khozyayev) [dissertation]. Leningrad: Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences; 1967. [in Russian] (Шапошников Г.Х. Эволюция тлей в связи со специализацией и сменой хозяев: дис. ... докт. биол. наук. Ленинград: Зоологический институт АН СССР; 1967).

Smith O.D., Schlehuber A.M., Curtis B.C. Inheritance studies of greenbug (*Toxoptera graminum* Rond.) resistance in four varieties of winter barley. *Crop Science*. 1962;2(6):489-491.

Xu X., Mornhinweg D., Bai G., Li G., Bian R., Bernardo A. et al. Characterization of *Rsg3*, a novel greenbug resistance gene from the Chinese barley landrace PI565676. *The Plant Genome*. 2023:16(1):e20287. DOI: 10.1002/tpg2.20287

Xu X., Mornhinweg D.W., Bai G., Steffenson B., Bian R., Li G. et al. *Rsg1.a3*: A new allele conferring unique resistance to greenbug Biotype H at the *Rsg1* locus in *Hordeum vulgare* ssp. *spontaneum*. *Crop Science*. 2021;61(5):3578-3585. DOI: 10.1002/csc2.20581

Xu X., Mornhinweg D., Bernardo A., Li G., Bian R., Steffenson B.J. et al. Characterization of *Rsg2.a3*: A new greenbug resistance allele at the *Rsg2* locus from wild barley (*Hordeum vulgare* ssp. *spontaneum*). *The Crop Journal*. 2022;10(6):1727-1732. DOI: 10.1016/j.cj.2022.01.010

Информация об авторах

Евгений Евгеньевич Радченко, доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, eugene_radchenko@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3019-0306

Ренат Абдуллаевич Абдуллаев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, abdullaev.1988@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-1021-7951

Ксения Дмитриевна Дятлова, доктор педагогических наук, профессор, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022 Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, xenia5204@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9397-9304

Дарья Евгеньевна Акимова, аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, veronikadari@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0657-1715

Игорь Альбертович Звейнек, 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, izv-spb1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2266-6408

Information about the authors

Evgeny E. Radchenko, Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, eugene_radchenko@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-3019-0306

Renat A. Abdullaev, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, abdullaev.1988@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-1021-7951

Ksenia D. Dyatlova, Dr. Sci. (Pedagogy), Professor, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23 Gagarina Ave., Nizhny Novgorod 603022, Russia, xenia5204@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9397-9304

Daria E. Akimova, Postgraduate Student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, veronikadari@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-0657-1715

Igor A. Zveinek, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, izv-spb1@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2266-6408

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.07.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 10.07.2023; approved after reviewing on 12.09.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Краткое сообщение
УДК 634.8:581.177
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-222-231

CC BY

Микроклональное размножение элитных технических сортов винограда (*Vitis vinifera* L.)

А. Ю. Физикова

Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, Сочи, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Юрьевна Физикова, Fizikova.AY@talantiuspeh.ru

Актуальность. Виноград – одна из наиболее экономически значимых культур. Объемы производства винограда в Российской Федерации ежегодно увеличиваются. Такие биологические особенности винограда, как длительный ювенильный период (5–8 лет), высокая степень гетерозиготности генома и часто встречаемое явление инбредной депрессии, когда гомозиготизация при скрещивании приводит к потере жизнеспособности и производственных характеристик сорта, делают вегетативное размножение основой размножения и промышленного выращивания винограда. Микроклональное размножение является основой омоложения и оздоровления современных виноградников. Разработка подходов микроклонального размножения элитных технических сортов винограда является актуальной задачей для современной индустрии виноделия.
Материалы и методы. Для работы были использованы технические сорта винограда ‘Мальбек’, ‘Мерло’, ‘Шардоне’ и ‘Рислинг’ полевой коллекции Всероссийского национального научно-исследовательского института виноградарства и виноделия «Магарач».
Результаты. В данной работе удалось подобрать универсальный, одноэтапный протокол для микроклонального размножения элитных технических сортов винограда, позволяющий получить растения, готовые к пересаживанию в грунт (*ex vitro*) через 1-2 месяца после черенкования.
Заключение. Использование разработанного в данной работе протокола микроклонального размножения технических сортов винограда уменьшит трудозатраты и сократит время для получения растения, готового к адаптации к открытому грунту, в 2-3 раза.

Ключевые слова: *in vitro*, универсальный протокол, ‘Мерло’, ‘Шардоне’, ‘Мальбек’, ‘Рислинг’

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации Научно-технологическим университетом «Сириус» (проект GNZh-RD-2008).
Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Физикова А.Ю. Микроклональное размножение элитных технических сортов винограда (*Vitis vinifera* L.). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):222-231. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-222-231

© Физикова А.Ю., 2023

BRIEF REPORTS

Brief report
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-222-231

Microclonal propagation of elite industrial grape cultivars (*Vitis vinifera* L.)

A. Yu. Fizikova

Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, Sochi, Russia

Corresponding author: Anastasia Yu. Fizikova, Fizikova.AY@talantiuspeh.ru

Background. The grape is one of the most economically significant berry crops: its cultivation area covers over 6.7 million hectares. Due to certain biological characteristics of grapes, such as a long juvenile period (5–8 years), a high degree of genomic heterozygosity, and the frequently encountered phenomenon of inbred depression, when homozygotization during hybridization leads to a loss of viability and production characteristics of the cultivar, vegetative propagation becomes the basis for grape reproduction and industrial cultivation. Microclonal propagation is the foundation for rejuvenation and revitalization of modern vineyards. Developing approaches for microclonal propagation of elite industrial grape cultivars remains a relevant task for the modern wine industry.
Materials and methods. The industrial grape cultivars 'Malbec', 'Merlot', 'Chardonnay', and 'Riesling' from the field collection of the All-Russian National Research institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" were used for the work.
Results. This research succeeded in devising a universal, one-stage protocol for the microclonal propagation of elite industrial grape cultivars, such as 'Merlot', 'Chardonnay', 'Malbec', and 'Riesling', making the production of plants ready for adaptation into the soil (*ex vitro*) within 1 months after rooting.
Conclusion. The use of the microclonal propagation protocol developed in this study for industrial grape cultivars will reduce labor costs and shorten the time required to obtain a plant ready for adaptation to open ground two to three times.

Keywords: medium, *in vitro*, universal protocol, 'Merlot', 'Chardonnay', 'Malbec', 'Riesling'

Acknowledgements: the research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Sirius University of Science and Technology`s project (GNZh-RD-2008).
The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Fizikova A.Yu. Microclonal propagation of elite industrial grape cultivars (*Vitis vinifera* L.). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):222-231. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-222-231

Введение

Виноград – это одна из самых древних культур растений, возделываемая человеком, по разным оценкам, от 6 до 8 тысяч лет. Первый описанный сорт 'Гуэ Блан' датирован 1283 г. Род *Vitis* L. (Vitaceae) включает 60 видов, культивируемых и произрастающих почти исключительно в Северном полушарии. Вид *Vitis vinifera* L. – это единственный вид рода, обитающий в Евразии, предположительно появившийся около 65 миллионов лет назад, став основой виноделия (Myles et al., 2011; This et al., 2006).

В ходе длительной селекции и отбора человечеству удалось получить около 12 000 сортов винограда, которые выращиваются для производства вина (около 60% сортов), употребляются в свежем виде (34% столовых и универсальных сортов), высушиваются с получением изюма (0,7%) и выращиваются для подвоев (8,2%) (McGovern, 2009; Munir et al., 2005). Неудивительно, что виноград стал одной из экономически важных сельскохозяйственных культур: площадь его возделывания составляет более 6,7 млн га (https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL). Объемы производства винограда в Российской Федерации ежегодно увеличиваются в течение последних 10 лет (Usenko, Udalova, 2018).

Ввиду таких биологических особенностей винограда, как длительный ювенильный период (5–8 лет), высокая степень гетерозиготности генома и часто встречаемое явление инбредной депрессии, когда гомозиготизация при скрещивании приводит к потере жизнеспособности и производственных характеристик сорта, вегетативное размножение становится основой размножения и промышленного выращивания винограда (Laimer, 2007; Pierozzi, Moura, 2016; Migicovsky et al., 2017; Töpfer, Trapp, 2022).

Традиционный метод вегетативного размножения винограда требует много времени и сил, а также не позволяет полностью очистить черенки от болезней (Ng et al., 1992). Культура *in vitro* имеет много преимуществ по сравнению с традиционными методами: микроразмножение может обеспечить массовое производство элитного сорта/генотипа, который можно акклиматизировать за короткий период с относительно низкой стоимостью (Rathore et al., 2004). Микроразмножение виноградной лозы осуществляется культивированием микрочеренков, верхушечных меристем побегов, пазушных или адвентивных почек (Heloir et al., 1997; Thomas, 2000; Aazami, 2010; Anupa et al.,2016). Различные виды и сорта винограда по-разному реагируют на условия культивирования (Anupa et al., 2016). Так, для некоторых сортов показано явление некроза верхушки черенка в культуре *in vitro*, что связывают с различными факторами; например, для сорта 'Arka Neelamani' это явление объясняют избыточностью укоренения и формирования большого количества пазушных почек (Thomas, 2000). Стабилизировать ситуацию с одним верхушечным некрозом растений *in vitro* на разных сортах удавалось по-разному: одним сортам было достаточно более частого пассирования и проветривания, другим нужны были дополнительные источники фосфора, третьим – оптимизация соотношений концентрации кальция, бора и фосфатов (Al-Aizari et al., 2020).

В подавляющем большинстве промышленных виноградников выращивают ограниченный перечень сортов, так как они характеризуются уникальным танинным составом, характерной кислотностью и букетом, которые невозможно достичь, выращивая гибридные сорта (http://www.josevouillamoz.com). Основой технического виноградарства и зрелого виноделия во всем мире являются 11 сортов винограда, так называемые «нобелевские» сорта: 'Cabernet Sauvignon', 'Chasselas', 'Chardonnay', 'Grenache', 'Merlot', 'Monastrell', 'Pinot Noir', 'Riesling', 'Sauvignon Blanc', 'Syrah' и 'Ugni Blanc' (Cohen et al., 2023).

Большинство публикаций по подбору оптимальных сред для микроклонального размножения описывают работу на локальных сортах и гибридах вне «нобелевского» списка (Dalla Costa et al., 2019). Хотя создание методики микроклонального размножения именно элитных технических сортов представляет наибольший интерес для омоложения и оздоровления виноградников с сохранением генотипов наиболее ценных технических сортов винограда.

Материалы и методы

Растительные материалы

Для работы были использованы технические сорта винограда 'Мальбек', 'Мерло', 'Шардоне' и 'Рислинг' полевой коллекции Всероссийского национального научно-исследовательского института виноградарства и виноделия «Магарач» РАН.

Культуральные среды

Для подбора оптимальной культуральной среды для размножения культур винограда *in vitro* использовали пять сред. Составы сред, использованных в работе представлены в таблице 1.

Деконтаминация

Для стерилизации эксплантов и введения их в культуру *in vitro* использовали 10-процентный раствор гидрохлорида полигексаметиленгуанидина. Стерилизацию проводили в течение 20 минут в пробирках Falcon при осторожном вращении со скоростью 100 об/мин. После стерилизации экспланты несколько раз промывали стерильной дистиллированной водой, сушили на стерильной фильтровальной бумаге, а затем высаживали на среды для культивирования.

Культивирование

Культивирование растений проводили в климатических камерах при температуре 25°C со световым режимом 16 часов света (интенсивность 60–74 мкмоль $м^{-2}$ $с^{-1}$ [4500–5000 Люкс]) и 8 часов темноты.

Результаты

Для подбора оптимальной методики введения культуры *in vitro* и культивирования сортов винограда из «нобелевского» перечня нами были взяты в работу технические сорта 'Мальбек', 'Мерло', 'Шардоне' и 'Рислинг'.

Для сравнения интенсивности роста и развития растений элитных технических сортов на разных средах было проведено черенкование верхушечных почек сортов 'Мерло' и 'Шардоне' на среды: 1m) 1/2MS 0,5 мг/л BAP (рекомендованная среда для инициации культуры *in vitro* по официальным рекомендациям компании Plantcelltechnology, одного из мировых лидеров продукции для микроклонального размножения); 2m) ½ MS 0.5 мг/л BAP, 0.1 мг/л IBA (среда, рекомендованная Plantcelltechnology для роста и деления черенков винограда); 3m) MS 4 мг/л IAA (среда, рекомендованная Plantcelltechnology для укоренения); 4m) среда для черенкования по патенту 2636030; 5) среда PRM. Каждого сорта брали по 2-3 черенка на один тип среды. Результаты оценивали через 2 и 3 недели культивирования (рис. 1, 2).

Таблица 1. Состав питательных сред
Table 1. Composition of nutrient media

Компоненты Components	PRM	1m	2m	3m	p2636030
Микроэлементы, мг/л / Microelements, mg/l					
$CuSO_4$ $5H_2O$	0,25	0,0125	0,0125	0,025	0,025
H_3BO_3	6,2	3,1	3,1	6,2	6,2
$MnSO_4$ H_2O	22,3	8,45	8,45	16,9	16,9
Na_2MoO_4 $2H_2O$	0,25	0,125	0,125	0,25	0,25
$ZnSO_4$ $7H_2O$	8,6	4,3	4,3	8,6	8,6
$CoCl_2$ $6H_2O$	–	0.0125	0.0125	0,025	0,025
KI	–	0,415	0,415	0,83	0,83
Макроэлементы, мг/л / Macroelements, mg/l					
$CaCl_2$ $2H_2O$	96	220	220	440	66,22
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	471,26	–	–	–	450
KH_2PO_4	170	85	85	170	100
K_2SO_4	990	–	–	–	–
$MgSO_4$	180,54	90,27	90,27	180,54	200
$FeSO4 \cdot 7H_2O$	27,8	13,9	13,9	27,8	27,8
Na2ЭДТА·$2H_2O$	37,26	18,63	18,63	37,26	37,26
NH_4NO_3	400	825	825	1650	150
KNO_3	–	950	950	1900	750
Витамины, мг/л / Vitamins, mg/l					
Никотиновая кислота / Nicotinic acid	0,5	0,5	0,5	0,5	–
Пиридоксин HCl / Pyridoxine HCl	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2
Тиамин HCl / Thiamine HCl	1	0,1	0,1	0,1	0,5
Аскорбиновая кислота / Vitamin C	200	–	–	–	–
Углеводы, % / Carbohydrates, %					
Сахароза / Sucrose	3	3	3	3	3

Таблица 1. Окончание
Table 1. The end

Компоненты Components	PRM	1m	2m	3m	p2636030
Гормоны, мг/л / Hormones, mg/l					
Альфа-нафтилуксусная кислота / Alpha naphthylacetic acid	0,2	–	–	–	–
Индол-3-масляная кислота / Indole-3-butyric acid	–	–	0,1	–	0,2
Индолилуксусная кислота / Indolylacetic acid	–	–	–	4	–
6-бензиламинопурин / 6-benzylaminopurine	0,2	0,5	0,5	–	–
Другие компоненты, мг/л / Other components, mg/ l					
Глицин / glycine	2	2	2	2	–
Уголь / Activated Coal	2000	–	–	–	–
Мио-инозитол / Myo-inositol	100	100	100	100	50
Агар, %	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
pH	5,75	5,6–5,8	5,6–5,8	5,6–5,8	5,6–5,8

Как видно на фотографиях на примере двух сортов винограда ‘Мерло’ и ‘Шардоне’, уже через две недели развития на стандартных средах черенки накопили антоцианы, на некоторых листьях появился хлороз и отмирание верхней части побегов, при этом только на одной питательной среде (2m) появился каллус на части побега, погруженной в питательную среду; на остальных питательных средах ни каллуса, ни листьев, ни корней не образовывалось (рис. 1).

На среде Prm уже через две недели после культивирования выросли корни и листья, в отличие от других использованных сред (рис. 2).

Через 1–1,5 месяца культивирования на одной среде PRM без переноса на свежие среды происходило активное укоренение, удлинение побега и наращивание листьев, растения достигали высоты 13 ± 1 см (рис. 3).

После укоренения черенки на среде Prm начинают интенсивно расти (рис. 4). На рисунке видны отличия в росте и развитии черенков сорта ‘Мальбек’, высаженных в одно и то же время на разные среды; также приведена фотография подросшего 2-месячного растения. Полученные результаты обобщены в таблице 2.

Обсуждение результатов

Создание методики микроклонального размножения элитных, наиболее капризных в культуре технических сортов винограда «нобелевского» списка явилось неожиданным результатом, полученным через два года поисков оптимальных подходов для микроклонального размножения, основываясь на литературных данных (Torregrosa et al., 2015; Malnoy et al., 2016; Nishitani et al., 2016; Ren et al., 2021). По истечении двух лет выживших растений оставалось очень мало и была апробирована среда PRM (Perl et al., 2004). С использованием данной питательной среды удалось получить здоровые растения *in vitro* и *ex vitro* из листовых почек винограда сортов ‘Мальбек’, ‘Шардоне’, ‘Рислинг’ и ‘Мерло’. При использовании питательной среды удалось размножить коллекцию от четырех до 200–300 растений за пять месяцев. В результате проделанной работы вся коллекция растений как технических, так и столовых сортов винограда размножается с использованием только среды PRM, которая на более поздних этапах работы используется нами как регенерационная среда и среда для укоренения регенерантов.

При использовании нашего протокола выращивания с применением единой для всех этапов среды растения можно через месяц уже акклиматизировать, корни на черенках формируются с разной интенсивностью уже через две недели, поэтому растения растут значительно быстрее. Использование одной среды для всех этапов и возможность осуществления редких переносов (один раз в 1-2 месяца) облегчает работу и планирование затрат в промышленном и лабораторном масштабах, а также ускоряет микроклональное размножение элитных сортов технического винограда.



Рис. 1. Сравнение сред для микроклонального размножения винограда:
A – черенки винограда сорта ‘Мерло’ на среде 3m; **B** – черенки винограда сорта ‘Мерло’ через 2 недели инкубации на среде 3m; **C** – черенки винограда сорта ‘Мерло’ через 3 недели инкубации на среде 3m; **D** – черенки винограда сорта ‘Мерло’ через 3 недели инкубации на среде 1m; **E** – черенки винограда сорта ‘Мерло’ через 3 недели инкубации на среде 2m; **F** – черенки винограда сорта ‘Мерло’ через 2 недели инкубации на среде 4m; **G** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ на среде 3m; **H** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ через 2 недели инкубации на среде 3m; **I** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ через 3 недели инкубации на среде 3m; **J** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ через 2 недели инкубации на среде 1m; **K** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ через 3 недели инкубации на среде 2m; **L** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ через 2 недели инкубации на среде 4m

Fig. 1. Comparison of media for microclonal propagation of grapes: A – grape cuttings of cv. ‘Merlot’ on the 3m medium; **B** – grape cuttings of cv. ‘Merlot’ after 2 weeks of incubation on the 3m medium; **C** – grape cuttings of cv. ‘Merlot’ after 3 weeks of incubation on the 3m medium; **D** – grape cuttings of cv. ‘Merlot’ after 3 weeks of incubation on the 1m medium; **E** – grape cuttings of cv. ‘Merlot’ after 3 weeks of incubation on the 2m medium; **F** – grape cuttings of cv. ‘Merlot’ after 2 weeks of incubation on the 4m medium; **G** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ on the 3m medium; **H** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ after 2 weeks of incubation on the 3m medium; **I** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ after 3 weeks of incubation on the 3m medium; **J** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ after 2 weeks of incubation on the 1m medium; **K** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ after 3 weeks of incubation on the 2m medium; **L** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ after 2 weeks of incubation on the 4m medium



Рис. 2. Образование корней и листьев винограда на среде PRM: A – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ на среде PRM; **B** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ через 2 недели инкубации на среде PRM; **C** – черенки винограда сорта ‘Шардоне’ через 3 недели инкубации на среде PRM; **D** – черенки винограда сорта ‘Мерло’ через 2-3 недели инкубации на среде PRM

Fig. 2. Formation of grape roots and leaves on the PRM medium: A – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ on the PRM medium after 1 week; **B** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ after 2 weeks of incubation on the PRM medium; **C** – grape cuttings of cv. ‘Chardonnay’ after 3 weeks of incubation on the PRM medium; **D** – grape cuttings of cv. ‘Merlot’ after 2-3 weeks of incubation on the PRM medium

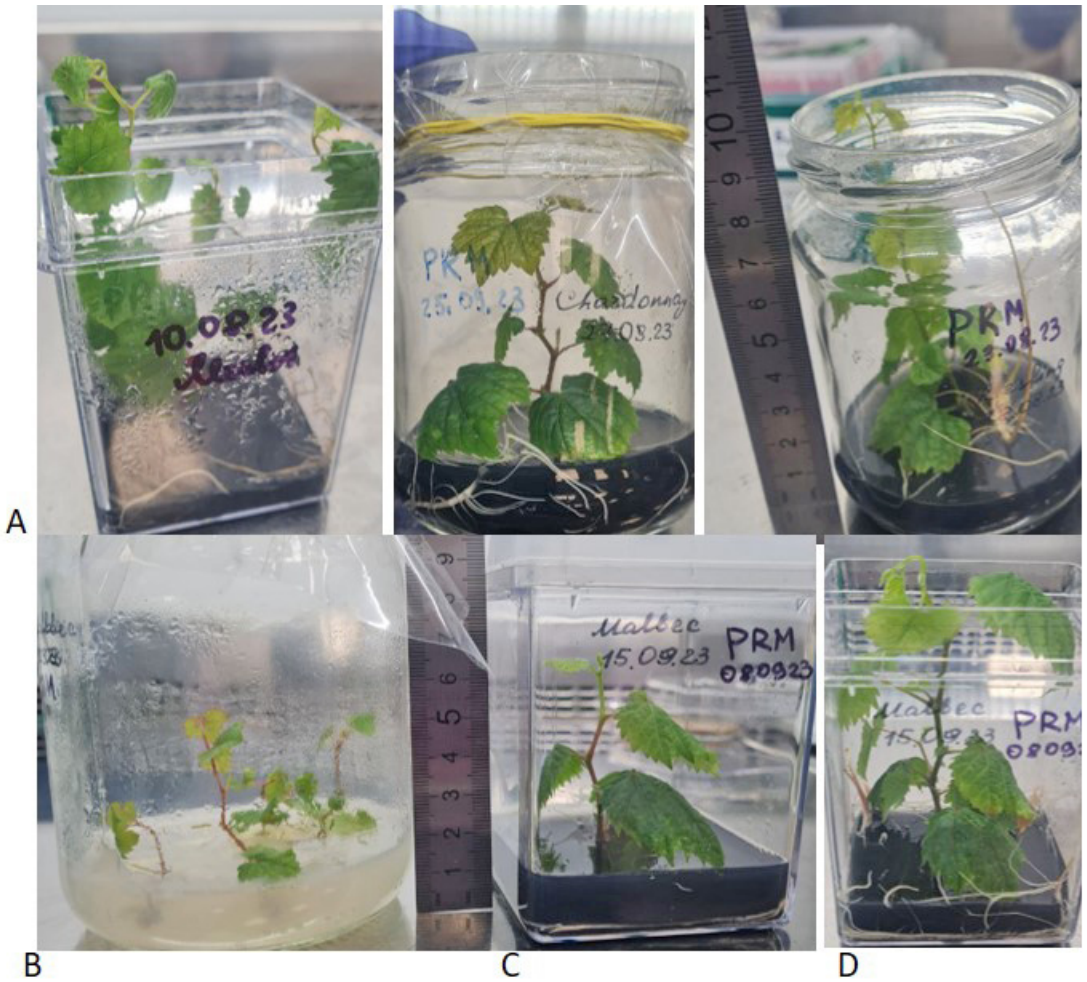


Рис. 3. Виноград 'Мальбек', 'Шардоне', 'Мерло' и 'Рислинг' через 1-2 месяца после черенкования на среде PRM без промежуточных переносов на другие/свежие среды: A – виноград сортов 'Мерло', 'Шардоне' и 'Рислинг' через 2 месяца инкубации на среде PRM; **B** – черенки винограда сорта 'Мальбек' через полтора месяца инкубации на среде 4m; **C** – виноград сорта 'Мальбек' через полтора месяца инкубации на среде PRM; **D** – виноград сорта 'Мальбек' через два месяца инкубации на среде PRM

Fig. 3. 'Malbec', 'Chardonnay', 'Merlot' and 'Riesling' grapes 1-2 months after planting the stalks on the PRM medium without intermediate transfers to other/fresh media: A – *in vitro* grape sprouts of cvs. 'Merlot', 'Chardonnay' and 'Riesling' after 2 months of incubation on the PRM medium; **B** – grape cuttings of cv. 'Malbec' after 1.5 months of incubation on the 4m medium; **C** – grape cuttings of cv. 'Malbec' after 1.5 months of incubation on the PRM medium; **D** – grape cuttings of cv. 'Malbec' after 2 months of incubation on the PRM medium

Таблица 2. Сравнение фенотипа черенков винограда, культивированных на разных средах

Table 2. Comparison of the phenotype of grape cuttings cultivated on different media

Среда / Media	Фенотип через 2 недели культивирования / Phenotype after 2 weeks of cultivation				
	Отмирание листовых почек / Drying out of leaf buds	Хлороз листьев / Leaf chlorosis	Накопление антоцианов / Anthocyanin accumulation	Новые листья / New leaves	Укоренение / Rooting
1m	–	+	+	–	–
2m	+	–	+	–	– (каллус)
3m	+	–	+	–	–
4m	–	–	+	–	– (каллус)
PRM	–	–	–	+	+

References / Литература

Aazami M.A. Effect of some growth regulators on “in vitro” culture of two *Vitis vinifera* L. cultivars. *Romanian Biotechnological Letters*. 2010;15:5229-5232.

Al-Aizari A.A., Al-Obeed R.S., Mohamed M.A.H. Improving micropropagation of some grape cultivars via boron, calcium and phosphate. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2020;48:95-100. DOI: 10.1016/j.ejbt.2020.10.001

Anupa N.T., Sahijram L., Samarth R., Rao B.M. *In vitro* shoot induction of three grape (*Vitis vinifera* L.) varieties using nodal and axillary explants. *The BioScan*. 2016;11(1):201-204.

Cohen P., Bacilieri R., Ramos-Madrigal J., Privman E., Boaretto E., Weber A. et al. Ancient DNA from a lost Negev Highlands desert grape reveals a Late Antiquity wine lineage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2023:120(17): e2213563120. DOI: 10.1073/pnas.2213563120

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

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations: [website]. Available from: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL [accessed Oct. 01, 2023].

Heloir M.C., Fournioux J.C., Oziol L., Bessis R. An improved procedure for the propagation *in vitro* of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Pinot noir) using axillary-bud microcuttings. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture.* 1997;49:223-225. DOI: 10.1023/A:1005867908942

JoseVouillamoz.com: [website]. Available from: http://www.josevouillamoz.com [accessed Sept. 19, 2023].

Laimer M. Transgenic grapevines. *Transgenic Plant Journal*. 2007;1(1):219-227.

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

Massonnet M., Cochetel N., Minio A., Vondras A.M., Lin J., Muyle A. et al. The genetic basis of sex determination in grapes. *Nature Communications*. 2020;11(1):2902. DOI: 10.1038/s41467-020-16700-z

McGovern P.E. Ancient Wine: The Search for the Origins of Viniculture. Princeton, NJ: Princeton University Press; 2003. DOI: 10.1515/9781400849536.1

Migicovsky Z., Sawler J., Gardner K.M., Aradhya M.K., Prins B.H., Schwaninger H.R. et al. Patterns of genomic and phenomic diversity in wine and table grapes. *Horticulture Research*. 2017;4:17035. DOI: 10.1038/hortres.2017.35

Munir I., Yen H.W., Baruth T., Tarkowski R., Azziz R., Magoffin D.A. et al. Resistin stimulation of 17alpha-hydroxylase activity in ovarian theca cells *in vitro*: relevance to polycystic ovary syndrome. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 2005;90(8):4852-4857. DOI: 10.1210/jc.2004-2152

Myles S., Boyko A.R., Owens C.L., Brown P.J., Grassi F., Aradhya M.K. et al. Genetic structure and domestication history of the grape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2011:108(9):3530-3535. DOI: 10.1073/pnas.1009363108

Ng SY.C., Thottappilly G., Rossel H.W. Tissue Culture in disease elimination and micropropagation. In: G. Thottappilly, L.M. Monti, D. Mohan-Raj, A.W. Moore (eds). *Biotechnology: Enhancing Research on Tropical Crops in Africa*. Ibadan: CTA/IITA; 1992. p.171-182.

Nishitani C., Hirai N., Komori S., Wada M., Okada K., Osakabe K. et al. Efficient genome editing in apple using a CRISPR/Cas9 system. *Scientific Reports*. 2016:6(1):31481. DOI: 10.1038/srep31481

Perl A., Colova-Tsolova V., Eshdat Y. *Agrobacterium*-mediated transformation of grape embryogenic calli. In: I.S. Curtis (ed.). *Transgenic Crops of the World*. Dordrecht: Springer; 2004. p.229-242. DOI: 10.1007/978-1-4020-2333-0_17

Pierozzi N., Moura M. Karyotype analysis in grapevines. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 2016:38(1):213-221. DOI: 10.1590/0100-2945-280/14

Rathore J.S., Rathore V., Shekhawat N.S., Singh R.P., Liler G., Phulwaria M. et al. Micropropagation of woody plants. In: P.S. Srivastava, A. Narula, S. Srivastava (eds). *Plant Biotechnology and Molecular Markers*. Dordrecht: Springer; 2004. p.195-205. DOI: 10.1007/1-4020-3213-7_13

Ren C., Liu Y., Guo Y., Duan W., Fan P., Li S. et al. Optimizing the CRISPR/Cas9 system for genome editing in grape by using grape promoters. *Horticulture Research*. 2021:8(1):52. DOI: 10.1038/s41438-021-00489-z

This P., Lacombe T., Thomas M.R. Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *Trends in Genetics*. 2006;22(9):511-519. DOI: 10.1016/j.tig.2006.07.008

Thomas P. Microcutting leaf area, weight and position on the stock shoot influence root vigour, shoot growth and incidence of shoot tip necrosis in grape plantlets *in vitro*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2000:61(3):189-198. DOI: 10.1023/A:1006425807853

Töpfer R., Trapp O. A cool climate perspective on grapevine breeding: climate change and sustainability are driving forces for changing varieties in a traditional market. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022:135(2):3947-3960. DOI: 10.1007/s00122-022-04077-0

Torregrosa L., Vialet S., Adivèze A., Iocco-Corena P., Thomas M.R. Grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Methods in Molecular Biology*. 2015;1224:177-194. DOI: 10.1007/978-1-4939-1658-0_15

Usenko L.N., Udalova Z.V. Analysis of the state of winemaking subcomplex of Russia. *Accounting and Statistics*. 2018:1(49):22-31. [in Russian] (Усенко Л.Н., Удалова З.В. Анализ состояния виноградовинодельческого подкомплекса АПК России. *Учет и статистика*. 2018:1(49):22-31).

Информация об авторе

Анастасия Юрьевна Физикова, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Научно-технологический университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, Сочи, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, Fizikova.AY@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0002-3568-9296

Information about the author

Anastasia Yu. Fizikova, Cand. Sci. (Biology), Researcher, Sirius University of Science and Technology, Research Center of Genetics and Life Sciences, 1 Olimpiysky Ave., Sirius Settlem., Sirius Federal Territory, Sochi, Krasnodar Territory 354340, Russia, Fizikova.AY@talantiuspeh.ru, https://orcid.org/0000-0002-3568-9296

Статья поступила в редакцию 03.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 03.10.2023; approved after reviewing on 30.11.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ОБЗОРЫ

Обзорная статья
УДК 573.6:631.527.8
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-232-240

CC BY

К вопросу о получении удвоенных гаплоидов столовой свеклы *Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef. (обзор)

А. М. Зарецкий, А. Б. Курина, Д. В. Соколова

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

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Зарецкий, a.zaretskii@vir.nw.ru

В настоящее время гибридные семена F_1 у столовой свеклы имеют явное преимущество перед сортовыми популяциями благодаря дружным всходам, высокой выровненности корнеплода и эффекту гетерозиса. В целом гетерозисная селекция столовой свеклы в Российской Федерации развита недостаточно. Одной из причин является отсутствие хорошо изученного гомогенного линейного материала. Другая причина – длительный и трудоемкий процесс получения родительских компонентов для скрещивания классическим путем, обусловленный 2-летним циклом развития культуры, выраженной системой самонесовместимости, инбредной депрессией. Производство удвоенных гаплоидов столовой свеклы *in vitro* позволяет получать гомозиготный материал в короткие сроки. Он может использоваться в селекционных программах в качестве альтернативы традиционным инбредным линиям. Поэтому внедрение технологий получения гаплоидов и дигаплоидов в селекционные программы столовой свеклы имеет большое значение. В статье представлены различные подходы к получению удвоенных гаплоидов свеклы, описаны ключевые достижения в разработке методик, а также основные проблемы и пути их решения. Приемы производства дигаплоидов у столовой свеклы изучены недостаточно и нуждаются в дополнительных исследованиях, нацеленных на увеличение их эффективности и воспроизводимости.

Ключевые слова: *Beta vulgaris* L., андрогенез, гиногенез, культура микроспор, удвоенные гаплоиды

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: Зарецкий А.М., Курина А.Б., Соколова Д.В. К вопросу о получении удвоенных гаплоидов столовой свеклы *Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef. (обзор). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4): 232-240. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-232-240

© Зарецкий А.М., Курина А.Б., Соколова Д.В., 2023

SURVEYS

Original article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-232-240

On the issue of producing doubled haploids of table beet (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef.) (a review)

Alexander M. Zaretsky, Anastasia B. Kurina, Diana V. Sokolova

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

Corresponding author: Alexander M. Zaretsky, a.zaretskii@vir.nw.ru

Currently, hybrid table beet seeds make up a significant part of the seeds sold in the world due to their high synchrony, root uniformity, and the effect of heterosis. Heterosis breeding of table beet in Russia is developed insufficiently. One of the reasons is the lack of a well-studied homogeneous linear material. Another reason is a long and labor-consuming process of obtaining parent components for classical crossing due to a 2-year cycle of crop development, a pronounced self-incompatibility system, and inbreeding depression. *In vitro* production of doubled table beet haploids makes it possible to obtain homozygous material in a short time. It can be used in breeding programs as an alternative to traditional inbred lines. Therefore, introduction of the haploidization technology into the table beet breeding programs is of great importance. This article discusses various approaches to the production of doubled beet haploids and describes crucial achievements, major problems, and the ways to solve them. Methods for producing doubled haploids of table beet has not been studied profoundly enough, so they require additional in-depth research aimed at improving their efficiency and reproducibility.

Keywords: *Beta vulgaris* L., androgenesis; gynogenesis, microspore culture, doubled haploids

***Acknowledgements*:** the article was prepared as part of the implementation of the state task assigned to VIR in accordance with the R&D thematic plan, 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: Zaretsky A.M., Kurina A.B., Sokolova D.V. On the issue of producing doubled haploids of table beet (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef.) (a review). *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):232-240. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-232-240

Введение

В настоящее время в мировой практике свекловодства широкое распространение получило использование гетерозисных гибридов. Базовым требованием к родительским компонентам при селекции на гетерозис является гомозиготность по большинству генов. Традиционно для получения линейного материала в селекции столовой свеклы используются такие методы, как инбридинг и отбор на протяжении нескольких поколений (минимум 4–6). Длительность и трудоемкость процесса обусловлена двулетним циклом развития культуры, самонесовместимостью, инбредной депрессией (Burenin, 2007). Получение гомогенного селекционного материала таким способом занимает 8–12 лет. На сегодняшний день альтернативным методом, позволяющим ускоренно получать гомозиготные линии свеклы, является получение удвоенных гаплоидов *in vitro* (Doubled Haploid method, DH-метод). Благодаря этому методу становится возможным сократить время получения выровненного линейного материала свеклы до 1,5–2,0 лет (Vasilchenko, Kolesnikova, 2018; Zhuzhzhalova et al., 2020). Данный метод не только позволяет ускорить селекционный процесс, но и за счет гаметоклональной изменчивости увеличивает внутривидовое разнообразие культуры, облегчает исследования в области генетических трансформаций и мутагенеза, позволяет обнаруживать генные взаимодействия и проводить генетические манипуляции (Wędzony et al., 2009; Karakotov et al., 2021).

Столовая свекла (*Beta vulgaris* L. var. *conditiva* Alef.) – распространенная, высокоурожайная овощная культура, обладающая экологической пластичностью и длительной лежкостью корнеплодов (Burenin et al., 2016; Sokolova, 2018). Ее корнеплоды обладают высокой антиоксидантной активностью, превосходят многие овощи по содержанию незаменимых аминокислот, содержат большое количество физиологически активных веществ, витаминов, минеральных солей, ценный пигмент бетанин (Herbach et al., 2004; Litvinov, 2008; Ninfali et al., 2017). Свекла столовая является компонентом «борщевого набора» и широко любима населением Российской Федерации.

Столовая свекла – типичное перекрестноопыляемое растение. Ксеногамия имеет преобладающее значение, но возможны и гейтеногамное, и аутогамное опыление (Zaikovskaya, 1968; Krasochkin, 1971). Цветки у свеклы обоеполые. Система генов гаметофитной самонесовместимости предотвращает самоопыление. В результате мутаций в аллелях самонесовместимости в популяциях иногда появляются биотипы, способные завязывать семена за счет самоопыления (Owen, 1942). Частота перекрестного опыления в популяциях значительна, однако иногда встречаются биотипы, способные к размножению без участия пыльцевого родителя (Maletskii, Maletskaya, 1996). В инбредных материалах агамоспермия наблюдается с относительно высокой частотой (Sokolova, 2020). Склонность культуры к различным способам семенного размножения не дает возможности с уверенностью утверждать, каким путем в ходе репродуцирования были получены семена, что отрицательно отражается на получении однородного материала. Закономерно, что для контролируемого получения гомогенного линейного материала метод создания удвоенных гаплоидов *in vitro* у свеклы на сегодняшний день является наиболее передовым.

В 2023 г. в Госреестре селекционных достижений РФ зарегистрировано 175 сортов столовой свеклы, из которых 37 являются гетерозисными гибридами F_1 (рисунок), причем 78% этих гибридов – иностранной селекции (https://reestr.gossortrf.ru). Следует отметить, что гетерозисная селекция столовой свеклы в нашей стране развита недостаточно. Одной из причин является отсутствие хорошо изученного гомогенного линейного материала. В РФ исследования в данном направлении ведутся главным образом в Российском государственном аграрном университете – МСХА имени К.А. Тимирязева и ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» (Pivovarov et al., 2011; Shmykova et al., 2015; Grigolava et al., 2021a; Grigolava et al., 2021b; Grigolava et al., 2022).

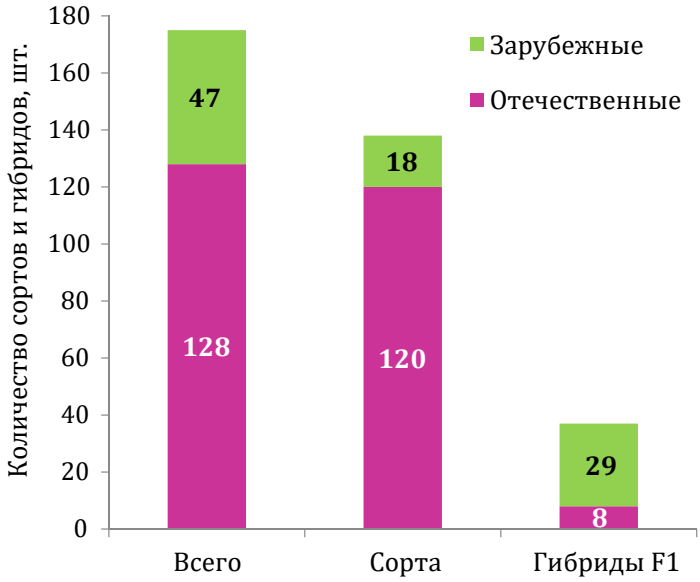


Рисунок. Сорта и гибриды столовой свеклы, зарегистрированные в Госреестре РФ в 2023 г. (https://reestr.gossortrf.ru)

Figure. Table beet cultivars and hybrids registered in the Russian Federation (https://reestr.gossortrf.ru)

В данной статье представлен обзор исследований, посвященных разнообразным подходам к производству удвоенных гаплоидов столовой свеклы, рассматриваются перспективы метода, основные проблемы и пути их решения.

Получение гаплоидов и дигаплоидов. История вопроса.

По одной из версий, впервые гаплоидная форма растения была обнаружена в 1921 г. при попытке инициировать мутации у дурмана (*Datura stramonium* L.) (Blakeslee et al., 1922). В качестве стимулятора авторы использовали холодовой стресс. Впервые выделенный гаплоид вызвал у исследователей большой интерес.

Вскоре гаплоидные растения получили у табака (*Nicotiana* L.) при скрещивании видов *N. tabacum* L. и *N. sylvestris* L. Они отличались от диплоидных форм мелкими цветками и небольшими узкими листьями. Кроме этого, гаплоиды имели стерильную пыльцу и не формировали зрелые семена (Clausen, Mann, 1924).

В 1925 г. гаплоидное растение было обнаружено у пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Гаплоидная форма отличалась от диплоидной по габитусу (имела большую кустистость) и формировала незрелые семена (Gaines, Aase, 1926). В последующих исследованиях добиться гаплоидии у пшеницы удалось при использовании пыльцы, подвергнутой рентгеновскому облучению. Это позволило инактивировать мужские гаметы за счет потери их способности к оплодотворению, инициировать деление яйцеклетки и развитие зародыша (Katayama, 1934; Ferrie, 2017).

Массовое получение гаплоидов начато в 1960-х годах. Были созданы сотни гаплоидных растений табака и риса (Niizeki, Oono, 1968; Nitsch J.P., Nitsch C., 1969). С помощью метода удвоенных гаплоидов в начале 1970-х годов в Канаде был выведен первый сорт рапса ‘Maris Haplona’, а в 1980 г. зарегистрирован первый сорт ячменя ‘Mingo’ (Thompson, 1972; Ho, Jones, 1980). В последующие годы удалось получить гаплоиды у пшеницы (Barclay, 1975; Laurie, Bennett, 1986; Inagaki, Tahir, 1990; Tuvesson, Öhlund, 1993). С тех пор DH-метод стал применяться у большего числа сельскохозяйственных культур. В настоящее время разработаны эффективные приемы получения удвоенных гаплоидов для многих овощных культур, например репы, капусты белокочанной и других представителей семейства Brassicaceae (Domblides et al., 2016), моркови (Voronina, Monakhos, 2021), тыквы (Domblides et al., 2020), кабачка (Ermolaev, Domblides, 2022).

Все существующие методы получения удвоенных гаплоидов включают два базовых этапа: получение гаплоидных растений (n) и диплоидизацию (удвоение) хромосомного набора (2n). Основные способы получения гаплоидов: отдаленная гибридизация с помощью чужеродного вида-опылителя, опыление облученной или обработанной химическими веществами пыльцой, биотехнологически *in vitro* (на основе андрогенеза и гиногенеза) (Blakeslee et al., 1922; Clausen, Mann, 1924; Sachar, Kapoor, 1958; Guha, Maheshwari, 1964; Rangan,1982).

Культура изолированных микроспор *in vitro* – наиболее развитая и перспективная технология на основе андрогенеза по сравнению с вышеперечисленными. Она основана на способности клеток незрелого мужского гаметофита под воздействием внешних контролируемых условий изменять путь развития с гаметофитного на спорофитный и формировать полноценное растение благодаря тотипотентности. В культуре микроспор отсутствуют соматические диплоидные клетки, что позволяет избежать дополнительного подтверждения происхождения полученных тканей и быть уверенными, что сформировавшиеся эмбриоиды являются продуктом эмбриогенеза гаплоидных клеток микроспоры (Zheng, 2003; Soriano et al., 2013).

Эффективность технологии получения гаплоидов из неоплодотворенных семяпочек (на основе гиногенеза), как правило, ниже, чем при андрогенезе. Это связано с тем, что гинецей содержит гораздо меньше половых клеток, чем андроцей. Культура неоплодотворенных семяпочек обычно применяется там, где методы на основе андрогенеза неэффективны (Bohanec, 2009). Попытки создания гаплоидов методами на основе гиногенеза велись с 1950 г. Индийские ученые впервые путем гиногенеза индуцировали гаплоидные растения у разных видов покрытосеменных (Sachar, Kapoor, 1958; Rangan, 1982). Первый гаплоидный каллус был получен у гинкго двулопастного (*Ginkgo biloba* L.) на среде Уайта с добавлением 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-Д) и кокосового молока, однако органогенез не был достигнут (Tulecke, 1964). В последнее время гиногенез широко используется у многих культур (Shmykova et al., 2011; Domblides et al., 2020; Ermolaev, Domblides, 2022).

Развитие техники получения удвоенных гаплоидов у свеклы.

С самого начала внедрения DH-метода в селекцию *B. vulgaris* все работы велись на сахарной свекле (*B. vulgaris* var. *saccharifera* Alef.). Это обусловлено повышенным вниманием к ведущей мировой сахароносной культуре. В настоящее время разработаны техники получения удвоенных гаплоидов сахарной свеклы *in vitro* главным образом на основе гиногенеза.

Техника *in vivo*

Первая гаплоидная форма у сахарной свеклы была получена в 1942 г. шведским ученым Леваном, который использовал обработку растений колхицином (Levan, 1945). Анализ по уровню плоидности семян, полученных от обработанных растений, выявил, помимо диплоидных, триплоидных и тетраплоидных форм, растения с гаплоидным набором хромосом. Гаплоид обладал большим числом узких и мелких листовых пластин. По габитусу он был значительно слабее и ниже диплоидных форм, формировал нормально развитые соцветия, однако не завязывал семена.

В исследованиях шведского ученого Н. О. Боземарка (Bosemark, 1971) сообщается о получении пяти гаплоидов при использовании пыльцы дикого вида свеклы и сахарной свеклы, подвергнутой рентгеновскому облучению. Автору удалось спровоцировать зародыш к делению без оплодотворения и тем самым получить гаплоидные растения, которые позднее были обработаны колхицином. В статье сообщалось о максимум 0,26% гаплоидов среди семян, собранных с диплоидных пыльцестерильных растений, опыленных пыльцой тетраплоидных опылителей. Было отмечено, что растения с цитоплазматической мужской стерильностью (ЦМС), по-видимому, дают больший выход гаплоидов, чем фертильные растения. Это предположение было подтверждено в 1973 г.: семена, собранные со стерильных растений, давали более чем в 10 раз больше гаплоидов, чем собранные с фертильных растений

(Yüce,1973). Однако выход гаплоидов оставался крайне низким.

В 1983 г. сообщалось о получении гаплоидов путем гибридизации сахарной свеклы с признаком ЦМС со столовой свеклой, обладающей доминантным маркерным признаком – красным гипокотилем (Seman, 1983). Выход гаплоидов оказался также очень низким и составил 0,013%.

Техника *in vitro*

Ввиду низкой эффективности спонтанного отбора гаплоидов начались работы более эффективным методом *in vitro*. Несмотря на успехи в получении гаплоидных растений из пыльников или изолированных микроспор у различных культур, индукция гаплоидов у сахарной свеклы, приводящая к формированию растений, долгое время оставалась безуспешной. В период с 1976 по 1985 г. предпринимались многочисленные попытки получения гаплоидов с помощью андрогенеза, которые особым успехом не увенчались (Rogozińska, Gośka, 1982; Van Geyt et al., 1987). Так, в 1982 г. J. H. Rogozińska, M. Gośka (1982) опубликовали данные об исследованиях андрогенеза у сахарной, кормовой и дикой свеклы на среде Линасмайера и Скуга с добавлением различных компонентов, а также с применением натуральных растительных экстрактов. Использование экстрактов картофеля и свеклы не способствовало индуцированию гаплоидов, использование 6-бензиламинопурина (БАП) приводило к меньшему образованию каллуса и корней, а добавление в среду альфа-нафтилуксусной кислоты (НУК) и зеатина давало наибольший выход гаплоидов. Также упоминалось, что предварительная обработка соцветий холодом (+4°C) в течение семи дней положительно влияла на получение гаплоидов у свеклы. Отмечено, что дикие виды свеклы, в противоположность сахарной, оказались более отзывчивы при использовании андрогенеза.

Наибольшее распространение среди способов производства дигаплоидов свеклы получили технологии гиногенеза. В 1983 г. опубликованы результаты первого успешного культивирования неоплодотворенных семязачаток сахарной свеклы (Hosemans, Bossoutrot, 1983). Позднее авторы сообщали о положительном опыте гиногенеза у сахарной свеклы и дали описание методики (Bossoutrot, Hosemans, 1985). В 1990 г. были опубликованы результаты выращивания изолированных семязачатков сахарной свеклы (Lux et al., 1990). Схема опыта включала культивирование растений-доноров, предварительную обработку побегов холодом (+4°C), трехкратную стерилизацию побегов с промыванием бидистилированной водой, подготовку семязачатков, индуцирование их роста, пересадку индуцированных эмбрионов и клонирование *in vitro* гаплоидных растений. Предварительная обработка цветочных почек холодом в течение 4-5 дней приводила к достоверному увеличению выхода зародышей. Отмечено решающее значение содержания цитокининов и второстепенное значение содержания ауксинов в питательной среде.

В дальнейших исследованиях методики гиногенеза совершенствовались: подбирались среды, состав и концентрации гормонов, исследовалась зависимость выхода гаплоидных растений от стадии развития бутона и его размеров (Svirshchevskaya, Doležel, 2000; Zhuzhzhalova et al., 2016; Vasilchenko et al., 2017). Максимальный выход эмбриоидов у наиболее отзывчивых генотипов может достигать 15% (Weich, Levall, 2003).

Исследования гаплоидии столовой свеклы.

Несмотря на генетическую близость сахарной (*B. vulgaris* var. *saccharifera*) и столовой свеклы (*B. vulgaris* var. *conditiva*), технология получения удвоенных гаплоидов для столовой разновидности менее эффективна. О первых попытках получения гаплоидов у столовой свеклы с помощью гиногенеза сообщается в статье 1996 г. (Baranski, 1996). В исследование были включены 15 различных генотипов: сорта, гибриды F_1 и линейные материалы. Наиболее влияющими на получение гаплоидов факторами были генотип растения и условия выращивания растения-донора.

Полная методика получения гаплоидов путем гиногенеза у столовой свеклы была впервые разработана и описана в 2014 г. группой польских исследователей: K. Górecka, U. Kowalska, W. Kiszczak, M. Burian, A. Kapuścińska A., L. Fornal (Kiszczak et al., 2021). Эмбрионы получали с использованием среды N6, содержащей 0,5 мг/л ИУК и 0,2 мг/л БАП, среды Гамборга (B5), содержащей 0,2 мг/л БАП, 0,5 мг/л ИУК, с 322 мг/л путресцина и 100 г/л сахарозы. Авторы также привели условия выращивания растений-доноров, способ стерилизации почек, среды и условия для регенерации, укоренения и акклиматизации, а также метод оценки плоидности проточной цитометрией.

В 2017 г. группа авторов сообщила о первых попытках получения гаплоидов столовой свеклы с помощью андрогенеза (Górecka et al., 2017). Исследователи выяснили, что для индукции андрогенеза лучше всего подходят микроспоры безъядерной стадии развития, которые формируются в бутонах размером 1,3–1,5 мм. Наибольший выход эмбриоидов отмечался на среде Гамборга (B5) с повышенным содержанием сахарозы (100 г/л) и добавлением 2,4-Д, а для регенерации была выбрана среда Мурасиге – Скуга (MC) с добавлением БАП и НУК. Также в работе было отмечено, что для лучшей индукции гаплоидов рекомендуется устранить крахмальные зерна с помощью предварительного культивирования пыльников в водном растворе альфа-амилазы человека.

В 2022 г. группа отечественных исследователей несколько улучшила методику получения гаплоидов путем андрогенеза (Grigolava et al., 2022). В своем исследовании они изучили влияние стадии развития микроспор и различных гормонов на индукцию андрогенеза на среде NLN-13. Описанная методика изолированных микроспор рекомендует использовать одноядерные микроспоры и выращивать их на среде NLN-13 с добавлением 130 г/л сахарозы, 0,1 мг/л 2,4-Д и 0,1 мг/л НУК. Однако выход эмбриоидов/каллуса все еще остается недостаточно высоким.

В 2021 г. группа польских исследователей разработала улучшенный способ получения удвоенных гаплоидных растений у столовой свеклы путем гиногенеза (Kiszczak et al., 2021). Представленная ими методика была сформирована с учетом требований растений столовой свеклы к питательным веществам в период развития и особенностей агрофизических требований культуры. Она включала рекомендации по концентрации макро-, микроэлементов и витаминов для среды B5 и для среды MC, используемых для регенерации и укоренении зародышей. Даны четкие рекомендации по яровизации и проращиванию доноров в климатической камере: по длине фотопериода, интенсивности освещения, частоте полива и особенностям температурного режима. Приведены условия для отбора и дезинфекции бутонов,

выделения зародышей, регенерации и акклиматизации растений.

Улучшение приемов гиногенеза у столовой свеклы было показано рядом отечественных исследователей, изучавших влияние регуляторов роста и углеводов в составе питательных сред на развитие изолированных семязачатков (Grigolava et al., 2021a, 2021b; Grigolava et al., 2022). Авторами была подобрана оптимальная pH среды (5,8), а также показан эффект гелеобразователя питательной среды на эмбрио- и каллусогенез. Максимальный выход эмбриоидов и каллуса был получен при культивировании семязачатков на питательной среде N6 с содержанием ИУК – 0,5 мг/л, БАП – 0,2 мг/л и 60 г/л сахарозы. Несмотря на высокую отзывчивость столовой свеклы в культуре изолированных микроспор к каллусогенезу (52,9%), эмбриогенеза не наблюдалось и регенерация растений не происходила.

Заключение

Гаплоидные технологии для использования в селекции востребованы для многих культур. Преимущества данных методов не вызывают сомнения и заключаются в скорости получения гомогенного линейного материала для последующей селекционной работы.

В последние годы интерес к использованию DH-метода у столовой свеклы растет. Для *B. vulgaris* наибольшее развитие получила технология производства гаплоидов путем гиногенеза, которая преимущественно протестирована на сахарной свекле. Для столовой свеклы проведены исследования по совершенствованию методов гиногенеза, рекомендован состав питательных сред. Можно отметить, что выход удвоенных гаплоидов все еще недостаточно высок. Исследования по данной тематике в свете современных подходов к селекции гибридов столовой свеклы крайне актуальны. Необходимо проведение дополнительного изучения, сконцентрированного на увеличении эффективности и воспроизводимости каждого этапа методики.

Несмотря на то что метод изолированных микроспор более эффективен, чем метод изолированных семязачатков, успешных исследований по получению гаплоидов столовой свеклы этими способами крайне мало. На данный момент существует лишь несколько рекомендаций, касающихся состава питательных сред, условий произрастания или стадии развития микроспор, но выход гаплоидных растений все еще крайне мал. В связи с этим исследования по данному направлению требуют дополнительных экспериментов, направленных на подбор оптимального состава сред и увеличения эффективности андрогенеза.

References / Литература

Baranski R. *In vitro* gynogenesis in red beet (*Beta vulgaris* L.): effects of ovule culture conditions. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 1996;65(1-2):57-60. DOI: 10.5586/asbp.1996.010

Barclay I.R. High frequencies of haploid production in wheat (*Triticum aestivum*) by chromosome elimination. *Nature*. 1975;256:410-411. DOI: 10.1038/256410a0

Blakeslee A.F., Belling J., Farnham M.E., Bergner A.D. A haploid mutant in the Jimson Weed, "*Datura stramonium*". *Science*. 1922;55(1433):646-647. DOI: 10.1126/science.55.1433.646

Bohanec B. Doubled haploids via gynogenesis. In: A. Touraev, Forster B.P., S. Mohan Jain (eds.). *Advances in Haploid Production in Higher Plants*. Dordrecht: Springer; 2009. p.35-46. DOI: 10.1007/978-1-4020-8854-4_2

Bosemark N.O. Haploids and homozygous diploids, triploids and tetraploids in sugar beet. *Hereditas*. 1971;69(2):193-203. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1971.tb02433.x

Bossoutrot D., Hosemans D. Gynogenesis in *Beta vulgaris* L.: From *in vitro* culture of unpollinated ovules to the production of doubled haploid plants in soil. *Plant Cell Reports*. 1985;4(6):300-303. DOI: 10.1007/bf00269883

Burenin V.I. Genetic resources of the *Beta* L. genus (Geneticheskiye resursy roda *Beta* L.). St. Petersburg; 2007. [in Russian] (Буренин В.И. Генетические ресурсы рода *Beta* L. Санкт-Петербург; 2007).

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).

Clausen R.E., Mann M.C. Inheritance in *Nicotiana tabacum*: V. The occurrence of haploid plants in interspecific progenies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1924;10(4):121-124. DOI: 10.1073/pnas.10.4.121

Domblides E., Shmykova N., Khimich G., Korotseva I., Kan L., Domblides A. et al. Production of doubled haploid plants of *Cucurbitaceae* family crops through unpollinated ovule culture *in vitro*. *Acta Horticulturae*. 2020;1294:19-28. DOI: 10.17660/ActaHortic.2020.1294.4

Domblides E.A., Shmykova N.A., Shumilina D.V., Zayachkovskaya T.V., Mineikina A.I., Kozar E.V., Akhramenko V.A., Shevchenko L.L., Kan L.Yu., Bondareva L.L., Domblides A.S. Technology of obtaining doubled haploids in the culture of microspores for the cabbage family (guidelines) (Tekhnologiya polucheniya udvoyennykh gaploidov v culture mikrospor semeystva kapustnye [metodicheskiye rekomendatsii]). Moscow: VNIISSOK; 2016. [in Russian] (Домблидес Е.А., Шмыкова Н.А., Шумилина Д.В., Заячковская Т.В., Минейкина А.И., Козарь Е.В., Ахраменко В.А., Шевченко Л.Л., Кан Л.Ю., Бондарева Л.Л., Домблидес А.С. Технология получения удвоенных гаплоидов в культуре микроспор семейства капустные (методические рекомендации). Москва: ВНИИССОК; 2016).

Dunwell J.M. Haploids in flowering plants: origins and exploitation. *Plant Biotechnology Journal*. 2010;8(4):377-424. DOI: 10.1111/j.1467-7652.2009.00498.x

Ermolaev A.S., Domblides E.A. Optimization of steps in the technology of obtaining doubled haploids of summer squash (*Cucurbita pepo* L.) in the culture of unpollinated ovules *in vitro*. *Vegetable Crops of Russia*. 2022;(5):5-14. [in Russian] (Ермолаев А.С., Домблидес Е.А. Оптимизация этапов технологии получения удвоенных гаплоидов кабачка (*Cucubra pepo* L.) в культуре неопыленных семяпочек *in vitro*. *Овощи России*. 2022;(5):5-14). DOI: 10.18619/2072-9146-2022-5-5-14

Ferrie A.M.R. Doubled haploid production in higher plants. In: B. Thomas, D.J. Murphy, B.G. Murray (eds). *Encyclopedia of Applied Plant Sciences. Vol. 2*. 2nd ed. Cambridge, MA: Academic Press; 2017. p.147-151. DOI: 10.1016/b978-0-12-394807-6.00189-1

Gaines E.F., Aase H.C. A haploid wheat plant. *American Journal of Botany*. 1926;13(6):373-385. DOI: 10.1002/j.1537-2197.1926.tb05892.x

Górecka K., Kryżanowska D., Kowalska U., Kiszczak W., Podwyszyńska M. Development of embryoids by microspore and anther cultures of red beet (*Beta vulgaris* L. subsp.

vulgaris). *Journal of Central European Agriculture*. 2017;18(1):185-195. DOI: 10.5513/JCEA01/18.1.1877

Grigolava T.R., Vishnyakova A.V., Monakhos S.G. Towards isolated microspores culture of red beet. *Potato and Vegetables*. 2022;(5):37-40. [in Russian] (Григолава Т.Р., Вишнякова А.В., Монахос С.Г. Движение к культуре изолированных микроспор свеклы столовой. *Картофель и овощи*. 2022;(5):37-40). DOI: 10.25630/PAV.2022.18.81.007

Grigolava T.R., Vishnyakova A.V., Sinitsyna A.A., Voronina A.V., Zubko O.N., Zudova O.V. et al. Methodological approaches for producing doubled haploids in sugar beet and red beet (*Beta vulgaris* L.). *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021a;25(3):276-283. [in Russian] (Григолава Т.Р., Вишнякова А.В., Синицына А.А., Воронина А.В., Зубко О.Н., Зудова О.В. и др. Методические подходы создания удвоенных гаплоидов сахарной и столовой свеклы (*Beta vulgaris* L.). *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021a;25(3):276-283). DOI: 10.18699/VJ21.031

Grigolava T.R., Vishnyakova A.V., Zubko O.N., Monakhos G.F., Monakhos S.G. Nutrient medium gelling agent effect on embryo- and callusogenesis in isolated ovules of red beet (*Beta vulgaris* L.). *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2021b;(6):32-41. [in Russian] (Григолава Т.Р., Вишнякова А.В., Зубко О.Н., Монахос Г.Ф., Монахос С.Г. Влияние гелеобразователя питательной среды на эмбрио- и каллусогенез в культуре изолированных семязачатков свеклы столовой (*Beta vulgaris* L.). *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2021b;(6):32-41). DOI: 10.26897/0021-342X-2021-6-32-41

Guha S., Maheshwari S.C., *In vitro* production of embryos from anther of *Datura*. *Nature*. 1964;204:497. DOI: 10.1038/204497a0

Herbach K.M., Stintzing E.C., Carle R. Impact of thermal treatment on color and pigment pattern of red beet (*Beta vulgaris* L.) preparations. *Journal of Food Science*. 2004;69(6):491-498. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb10994.x

Ho K.M., Jones G.E. Mingo barley. *Canadian Journal of Plant Science*. 1980;60(1):279-280. DOI: 10.4141/cjps80-041

Hosemans D., Bossoutrot D. *In vitro* culture of unpollinated beet (*Beta vulgaris* L.) ovules of male sterile and male fertile plants and induction of haploid plants. In: G.P. Chapman, S.H. Mantell, R.W. Daniels (eds). *The Experimental Manipulation of Ovule Tissues*. New York, NY: Longman Inc.; 1985. p.79-88.

Hosemans D., Bossoutrot D. Induction of haploid plants from *in vitro* culture of unpollinated beet ovules (*Beta vulgaris* L.). *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung = Journal of Plant Breeding*. 1983;91:74-77.

Inagaki M., Tahir M. Comparison of haploid production frequencies in wheat varieties crossed with *Hordeum bulbosum* L. and maize. *Breeding Science*. 1990;40(2):209-216. DOI: 10.1270/JSBBS1951.40.209

Karakotov S.D., Apasov I.V., Nalbandyan A.A., Vasilchenko E.N., Fedulova T.P. Modern issues of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) hybrid breeding. 2021;25(4):394-400. [in Russian] (Каракотов С.Д., Апасов И.В., Налбандян А.А., Васильченко Е.Н., Федулова Т.П. Современные аспекты селекции гибридов сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.). *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(4):394-400). DOI: 10.18699/VJ21.043

Katayama Y. Haploid formation by X-rays in *Triticum monococcum*. *Cytologia*. 1934;5(2):235-237.

Kiszczak W., Burian M., Kowalska U., Górecka K., Podwyszyńska M. Production of homozygous red beet (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris*) plants by ovule culture. *Methods in Molecular Biology*. 2021;2289:301-312. DOI: 10.1007/978-1-0716-1331-3_20

Krasochkin V.T. Characteristics of the Chenopodiaceae or Salsoleae family (Kharakteristika semeystva marevykh ili solyankovykh Chenopodiaceae Less.). In: *Flora of Cultivated Plants. Vol. 19. Root Plants*. Leningrad: Kolos; 1971. p.5-266. [in Russian] (Красочкин В.Т. Характеристика семейства маревых или солянковых Chenopodiaceae Less. В кн.: *Культурная флора СССР. Т. 19. Корнеплодные растения*. Ленинград: Колос; 1971. С.5-266).

Laurie D.A., Bennett M.D. Wheat × maize hybridization. *Canadian Journal of Genetics and Cytology*. 1986;28(2):313-316. DOI: 10.1139/g86-046

Levan A. A haploid sugar beet after colchicine treatment. *Hereditas.* 1945;31(3-4):399-410. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1945.tb02760.x

Litvinov S.S. Scientific foundations of modern vegetable growing (Nauchnye osnovy sovremennogo ovoshchevodstva). Moscow; 2008. [in Russian] (Литвинов С.С. Научные основы современного овощеводства. Москва; 2008).

Lux H., Herrmann L., Wetzel C. Production of haploid sugar beet, *Beta vulgaris* L. by culturing unpollinated ovules. *Plant Breeding*. 1990;104(3):177-183. DOI: 10.1111/j.1439-0523.1990.tb00420.x

Maletskii S.I., Maletskaya E.I. Self-fertility and agamospermy in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Russian Journal of Genetics*. 1996;32(12):1431-1437.

Niizeki H., Oono K. Induction of haploid rice plant from anther culture. *Proceedings of the Japan Academy*. 1968;44(6):554-557. DOI: 10.2183/pjab1945.44.554

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

Nitsch J.P., Nitsch C. Haploid plants from pollen grains. *Science*. 1969;163(3862):85-87. DOI: 10.1126/science.163.3862.85

Owen F.V., Ruser G.K. Some mendelian characters in *Beta vulgaris* and linkages observed in the Y-R-B group. *Journal of Agricultural Research*. 1942;65(3):155-171.

Pivovarov V.F., Shmykova N.A., Suprunova T.P. Biotechnological approaches to vegetable crop breeding. *Vegetable Crops of Russia*. 2011;3(12):10-17. [in Russian] (Пивоваров В.Ф., Шмыкова Н.А., Супрунова Т.П. Биотехнологические приемы в селекции овощных культур. *Овощи России*. 2011;3(12):10-17).

Rangan T.S. Ovary, ovule, and nucellus culture. In: B.M. Johri (ed.). *Experimental Embryology of Vascular Plants*. Berlin; Heidelberg: Springer; 1982. p.105-129. DOI: 10.1007/978-3-642-67798-4_6

Rogozińska J.H., Gośka M. Attempts to induce haploids in anther cultures of sugar, fodder and wild species of beet. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 1982;51(1):91-105. DOI: 10.5586/asbp.1982.009

Sachar R.C., Kapoor M. Influence of kinetin and gibberellic acid on the test tube seeds of *Cooperia pedunculata* herb. *The Science of Nature*. 1958;45(22):552-553. DOI: 10.1007/bf00632077

Seman I. Possibilities of detection and induction of haploids in *Beta vulgaris* L. *Biologia (Bratislava)*. 1983;38(11):1113-1122.

Shmykova N., Shumilina D., Kushnereva V., Khimich G. Gynogenesis induction in culture of unpollinated ovules of pumpkin. *Vegetable Crops of Russia*. 2011;(1):28-31. [in Russian] (Шмыкова Н., Шумилина Д., Кушнерёва В., Химич Г. Индукция гиногенеза в культуре неопылен-

ных семяпочек тыквы. *Овощи России*. 2011;(1):28-31). DOI: 10.18619/2072-9146-2011-1-28-31

Shmykova N.A., Suprunova T.P., Pivovarov V.F. Biotechnologies and molecular methods in vegetable crop breeding (to 95th anniversary of VNIISSOK). *Agricultural Biology*. 2015;50(5):561-570. [in Russian] (Шмыкова Н.А., Супрунова Т.П., Пивоваров В.Ф. Биотехнологические и молекулярно-генетические методы в селекции овощных культур (к 95-летию ВНИИССОК). *Сельскохозяйственная биология*. 2015;50(5):561-570). DOI: 10.15389/agrobiology.2015.5.561rus

Sokolova D.V. Apomictic lines of sugar beet: development and studying. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2020;181(4):93-101. DOI: 10.30901/2227-8834-2020-4-93-101

Sokolova D.V. Formation of the trait-specific group in VIR's table beet collection: environmental plasticity and stability. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(2):106-117. [in Russian] (Соколова Д.В. Формирование признаковой группы коллекции столовой свеклы ВИР: экологическая пластичность и стабильность. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(2):106-17). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-2-106-117

Soriano M., Li H., Boutilier K. Microspore embryogenesis: establishment of embryo identity and pattern in culture. *Plant Reproduction*. 2013;26(3):181-196. DOI: 10.1007/s00497-013-0226-7

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 05.10.2023].

Svirshchevskaya A.M., Doležel J. Production and performance of gynogenetic sugar beet lines. *Journal of Sugar Beet Research*. 2000;37(4):117-133.

Thompson K.F. Cytoplasmic male-sterility in oil-seed rape. *Heredity*. 1972;29(2):253-257. DOI: 10.1038/hdy.1972.89

Tulecke W. A haploid tissue culture from the female gametophyte of *Ginkgo biloba* L. *Nature*. 1964;203(4940):94-95. DOI: 10.1038/203094a0

Tuvesson I.K.D., Öhlund R.C.V. Plant regeneration through culture of isolated microspores of *Triticum aestivum* L. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*. 1993;34:163-167.

Van Geyt J., Speckmann G.J., D'Halluin K., Jacobs M. *In vitro* induction of haploid plants from unpollinated ovules and ovaries of the sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 1987;73(6):920-925. DOI: 10.1007/BF00289399

Vasilchenko E.N., Kolesnikova E.O. Biotechnological methods of obtaining and evaluating homozygous forms of sugar beet (Biotekhnologicheskiye metody polucheniya i otsenki gomozigotnykh form sakharnoy svekly). *Alleya nauki* = *Alley of Science*. 2018;10(26):292-296. [in Russian] (Васильченко Е.Н., Колесникова Е.О. Биотехнологические методы получения и оценки гомозиготных форм сахарной свеклы. *Аллея Науки*. 2018;10(26):292-296).

Vasilchenko E.N., Zhuzhzhalova T.P., Vashchenko T.G., Zemlyanukhina O.A., Karpechenko N.A., Podvigina O.A. Peculiarities of *in vitro* reproduction of sugar beet haploid regenerants. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2017;3(54):57-66. [in Russian] (Васильченко Е.Н., Жужжалова Т.П., Ващенко Т.Г., Землянухина О.А., Карпеченко Н.А., Подвигина О.А. Особенности формирования гаплоидных регенерантов сахарной свеклы в культуре *in vitro*. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2017;3(54):57-66). DOI: 10.17238/issn2071-2243.2017.3.57

Voronina A.V., Monakhos S.G. Method of obtaining doubled carrot haploids in culture of isolated microspores *in vitro* (Sposob polucheniya udvoyennykh gaploidov morkovi v kulture izolirovannykh mikrospor *in vitro*). Russian Federation; patent number: RU 2750959 C1; 2021. [in Russian] (Воронина А.В., Монахос С.Г. Способ получения удвоенных гаплоидов моркови в культуре изолированных микроспор *in vitro*. Российская Федерация; патент № RU 2750959 C1; 2021).

Wędzony M., Forster B.P., Żur I., Golemiec E., Szechyńska-Hebda M., Dubas E. et al. Progress in doubled haploid technology in higher plants. In: A. Touraev, Forster B.P., S. Mohan Jain (eds.). *Advances in Haploid Production in Higher Plants*. Dordrecht: Springer; 2009. p.1-33. DOI: 10.1007/978-1-4020-8854-4_1

Weich E.W., Levall M.W. Doubled haploid production of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). In: M. Maluszynski, K.J. Kasha, B.P. Forster, I. Szarejko (eds). *Doubled Haploid Production in Crop Plants*. Dordercht: Springer; 2003. p.255-263. DOI: 10.1007/978-94-017-1293-4_38

Yüce S. Haploidie bei der Zuckerrübe [dissertation]. Giessen: Justus-Liebig-Universität; 1973. [in German]

Zaikovskaya N.E. Biology of flowering, cytology and embryology of sugar beet (Biologiya tsveteniya, tsitologiya i embriologiya sakharnoy svekly). In: *Sugar Beet Biology and Breeding (Biologiya i selektsiya sakharnoy svekly)*. Moscow: Kolos; 1968. p.137-207. [in Russian] (Зайковская Н.Э. Биология цветения, цитология и эмбриология сахарной свеклы. В кн.: *Биология и селекция сахарной свеклы*. Москва: Колос; 1968. С.137-207).

Zheng M.Y. Microspore culture in wheat (*Triticum aestivum*) – Doubled haploid production via induced embryogenesis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2003;73(3):213-230. DOI: 10.1023/a:1023076213639

Zhuzhzhalova T.P., Kolesnikova E.O., Vasilchenko E.N., Cherkasova N.N. Biotechnological methods as a tool for efficient sugar beet breeding. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2020;24(1):40-47. DOI: 10.18699/VJ20.593

Zhuzhzhalova T.P., Podvigina O.A., Znamenskaya V.V., Vasil'chenko E.N., Karpechenko N.A., Zemlyanukhina O.A. Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) haploid parthenogenesis *in vitro*: factors and diagnostic characters. *Agricultural Biology*. 2016;51(5):636-644. [in Russian] (Жужжалова Т.П., Подвигина О.А., Знаменская В.В., Васильченко Е.Н., Карпеченко Н.А., Землянухина О.А. Гаплоидный партеногенез *in vitro* у сахарной свеклы (*Beta vulgaris* L.): факторы и диагностические признаки. *Сельскохозяйственная биология*. 2016;51(5):636-644). DOI: 10.15389/agrobiology.2016.5.636rus

Информация об авторах

Александр Михайлович Зарецкий, аспирант, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, a.zaretskii@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0007-3141-4379

Анастасия Борисовна Курина, 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, nastya_n11@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-3197-4751

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

Information about the authors

Alexander M. Zaretsky, Postgraduate Student, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.zaretskii@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0007-3141-4379

Anastasia B. Kurina, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, 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

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

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 29.05.2023; одобрена после рецензирования 05.09.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 29.05.2023; approved after reviewing on 05.09.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ОБЗОРЫ

Обзорная статья
УДК 575.162
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-241-250

CC BY

Генетические основы компактных форм у бахчевых культур

А. В. Иноземцева[1], А. Г. Елацкова[2], Е. К. Хлесткина[1, 3], Н. А. Швачко[1]

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

[2] Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, Краснодарский край, Россия

[3] Университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, Сочи, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анастасия Вадимовна Иноземцева, a.inozemtseva@vir.nw.ru

Генетическая основа компактности у различных сельскохозяйственных культур является областью активных исследований в последние годы. Было выявлено несколько генов, мутации в которых приводят к появлению карликового фенотипа растений. Понимание функций этих генов и механизмов, лежащих в основе карликовости у бахчевых культур, необходимо для разработки новых сортов с повышенной урожайностью и качеством плодов. В настоящей работе приведены актуальные данные о генах, мутации в которых ассоциированы с появлением компактного фенотипа у бахчевых культур, перечислены примеры мутантных компактных фенотипов и связанных с ними генов у таких представителей семейства Cucurbitaceae, как тыква крупноплодная (*Cucurbita maxima* Duch.), тыква твердокорая (*Cucurbita pepo* L.), тыква мускатная (*Cucurbita moschata* Duch.), арбуз (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai), дыня (*Cucumis melo* L.). В работе представлены современные данные о генетической и молекулярной основах формирования компактного фенотипа, а также молекулярные маркеры для выявления известных генов, связанных с уменьшением размера габитуса растений.

Ключевые слова: Cucurbitaceae, компактность, карликовость, молекулярные маркеры

Благодарности: статья выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора № 075-15-2020-911 от 16.11.2020 о предоставлении гранта в виде субсидии из федерального бюджета Российской Федерации. Грант предоставлен для государственной поддержки создания и развития Научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Иноземцева А.В., Елацкова А.Г., Хлесткина Е.К., Швачко Н.А. Генетические основы компактных форм у бахчевых культур. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):241-250. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-241-250

© Иноземцева А.В., Елацкова А.Г., Хлесткина Е.К., Швачко Н.А., 2023

SURVEYS

Review article
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-241-250

Genetic bases of compact forms among cucurbit crops

Anastasiia V. Inozemtseva[1], Anna G. Elatskova[2], Elena K. Khlestkina[1, 3], Natalia A. Shvachko[1]

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

[2] *N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Experiment Station of VIR, Krasnodar, Russia*

[3] *Sirius University of Science and Technology, Research Center for Genetics and Life Sciences, Sochi, Russia*

Corresponding author: Anastasiia V. Inozemtseva, a.inozemtseva@vir.nw.ru

The genetic base of compactness has been an area of active research in recent years, with several genes and mutations identified to be associated with the appearance of dwarf phenotypes. Understanding the functions of these genes and the underlying mechanisms of dwarfism in cucurbit crops is essential for developing new cultivars with improved yield and fruit quality. This study presents current data on genes and mutations associated with the evolvement of compact phenotypes in cucurbit crops. The review includes examples of mutant compact phenotypes and their associated genes in representatives of the Cucurbitaceae family, such as *Cucurbita maxima* Duch., *Cucurbita pepo* L., *Cucurbita moschata* Duch., *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai, and *Cucumis melo* L. The review provides up-to-date information on the genetic and molecular bases of compact phenotype formation, as well as molecular markers for detecting known genes associated with reduced plant size.

Keywords: Cucurbitaceae, dwarfism, semi-dwarfism, molecular markers

Acknowledgements: this review article was prepared with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-15-2020-911 dated Nov. 16, 2020, on providing a grant in the form of subsidies from the Federal Budget of the Russian Federation. The grant was provided for governmental support of the establishment and development of the World-Class Scientific Center “Agrotechnologies for the Future”.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Inozemtseva A.V., Elatskova A.G., Khlestkina E.K., Shvachko N.A. Genetic bases of compact forms among cucurbit crops. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):241-250. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-241-250

Введение

Важными признаками в селекции бахчевых культур являются размеры плетей и плода (Tekhanovich et al., 2019, 2020; Elatskova, 2021; Mashilo et al., 2022). К компактным формам тыквенных растений можно отнести короткоплетистые, кустовые и ультракарликовые фенотипы. Большинство возделываемых сортов *Cucurbita* L. относятся к длинноплетистым формам – от 2,5 до 5,0 м и более (Tekhanovich et al., 2020; Elatskova, 2021). Для арбуза *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai также характерны стелющиеся длинноплетистые формы растения: их плети достигают от 1,5–2,5 до 3–5 м в длину в период массового цветения и образования завязей, что затрудняет как уход за ними, так и уборку урожая (Tekhanovich et al., 2019). Компактные растения, занимающие меньшую площадь, подходят для загущенных посадок и могут обеспечить увеличение урожайности с единицы площади, а также снижение трудозатрат на уход за растениями (Elatskova, 2021). Фенотипы с более короткими плетями также имеют преимущества в качестве сортов, используемых для домашнего сада и при выращивании бахчевых культур в защищенном грунте (Mohr, Sandhu, 1975).

Вегетативный рост и генеративное развитие происходят под влиянием различных фитогормонов (Hedden, 2003). Растительные гормоны, такие как гиббереллин (GA), брассиностероиды (BR) и ауксин (например, индол-3-уксусная кислота, IAA), регулируют рост растений посредством синергетических или антагонистических взаимодействий. Нарушения метаболизма и передачи сигналов в этих гормональных путях часто приводят к карликовому росту растений (Hedden, 2003; Kwon, Choe, 2005; Li et al., 2018).

В обзоре представлены актуальные сведения о генах, ответственных за формирование карликовых, кустовых и короткоплетистых форм у бахчевых культур (таблица).

Гены карликовости, связанные с чувствительностью к гиббереллинам

Гиббереллины (GA) известны своей способностью стимулировать удлинение стебля растений. Известно, что мутации, связанные с недостаточностью гиббереллинов или сниженной чувствительностью к ним, приводят к появлению карликового фенотипа (Hedden, 2001, 2003, 2020). Основной путь регуляции концентрации GA – контроль экспрессии генов *2ODD: Ga3ox*, *Ga20ox* и *Ga2ox* (рисунок). Путь биосинтеза GA катализируется рядом метаболических ферментов, таких как энт-копалил-дифосфатсинтаза (CPS), энт-кауренсинтаза (KS), энт-кауреноксидаза (KO), энт-оксидаза кауреновой кислоты (KAO), GA20-оксидаза (GA20ox) и GA3-оксидаза (GA3ox).

Превращение энт-каурена (продукт циклизации геранилгераниолдифосфата; конечный продукт первого этапа синтеза GA), в биологически активный GA включает постепенное окисление с помощью монооксигеназ цитохрома P450 (P450s), а затем растворимых 2-оксоглутаратзависимых диоксигеназ (2ODDs) (Hedden, 2020). Гены *Ga20ox*, *Ga3ox* позитивно регулируются DELLA-белками. Белки DELLA – репрессоры ответа на гиббереллины. Связывание GA с его рецептором GID1 приводит к изменению его конформации и взаимодействию с белками DELLA, которые затем становятся мишенью для деградации по убиквитин-протеасомному пути посредством ассоциации с компонентом F-box убиквитинлигазы E3 (Hedden, 2001; Yamaguchi, 2008). DELLA-белки принадлежат к семейству регуляторов транскрипции GRAS и содержат N-концевую последовательность с доменами DELLA, LExLE и VHYNP, которая связывается с комплексом GA-GID1 для обеспечения GA-индуцированной деградации (Hedden, 2020, 2001; Yamaguchi, 2008; Schwechheimer, 2012). Заключительная стадия биосинтеза GA с образованием биологически активных конечных продуктов

Таблица. Гены карликовости Cucurbitaceae, освещенные в данном обзоре
Table. Dwarfism genes in Cucurbitaceae described in this review

Тыквенные культуры	Ген	Кодирует	Ссылка
Cucurbita maxima Duch.	GA20ox/Cma_004516	Гиббереллин-20-оксидазу	Lange et al., 1994; Zhang G. et al., 2015
C. moschata Duch.	GA3ox/CmoCh08G006170	Гиббереллин 3β-гидроксилазу	Min et al., 2022
C. pepo L.	GA2ox/Cp4.1LG10g05910.1	Гиббереллин-20-оксидазу	Ding et al. 2021
Cucumis melo L.	CmERECTA/Cmsi/MELO3C016916	Эректоподобную рецепторную киназу (ERECTA-like)	Yang et al., 2020
Citrullus lanatus (Thunb.) Matsum. & Nakai	GA3ox/df/Cla015407	Гиббереллин 3β-гидроксилазу	Wei et al. 2019; Sun et al., 2020; Zhang T. et al. 2021
	ClaGA20ox/dsh/Cla010726/	Гиббереллин-20-оксидазу	Dong et al., 2018.
	dw-1/Cla010337	ABC-транспортер	Zhu et al. 2019
	GA2ox/Cla015405	2-бета-диоксигеназу	Jang et al., 2020

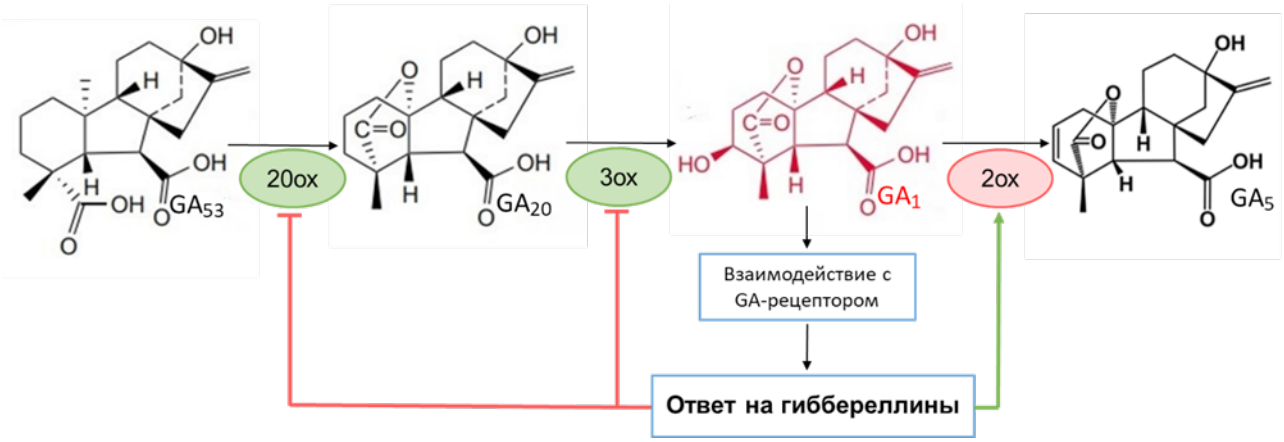


Рисунок. Регуляция биосинтеза гиббереллинов.
Повышение концентрации гиббереллинов вызывает: репрессию транскрипции генов *GA20ox* и *GA3ox*, активацию транскрипции генов *GA2ox*. Результат – снижение уровня концентрации гиббереллинов (Hedden, 2003)

Figure. Regulation of gibberellin biosynthesis.
An increase in gibberellin concentration causes: repression of *GA20ox* and *GA3ox* gene transcription, and activation of *GA2ox* gene transcription. The result is a decrease in the concentration of gibberellin tissues (Hedden, 2003)

GA1 и GA4 в растениях катализируется двумя оксоглутаратзависимыми диоксигеназами *GA20ox* и *GA3ox* (Hedden, 2020). Диоксигеназы (GA20ox, GA3ox и GA2ox) представляют собой ферменты, содержащие железо, которые способствуют биосинтезу GA с использованием 2-оксоглутарата. Связанный с Fe мотив 2OGD имеет консервативную аминокислотную область His-XaaAsp/Glu-(Xaa) n-His (Thomas et al., 1999; Kawai et al., 2014).

Повышение концентрации активных гиббереллинов в тканях вызывает репрессию транскрипции генов *GA20ox* и *GA3ox*, а также активацию транскрипции генов *GA2ox*, в результате чего концентрация GA снижается (Hedden, 2001; Yamaguchi, 2008). Мутации в генах *GA20ox*, *GA3ox* и *GA2ox* могут привести к значительным изменениям в концентрации гиббереллинов в тканях растений, что может существенно влиять на их рост и развитие. Сверхэкспрессия *GA3ox* и *GA20ox* усиливает регуляцию GA, что способствует удлинению растительных организмов, в то время как растения с избыточной экспрессией *GA2ox* отличаются сниженным уровнем концентрации GA и карликовым фенотипом (Fagoaga et al. 2007; Rieu et al., 2008; García-Hurtado et al., 2012; Otani et al., 2013). Связь мутаций в этих генах с появлением карликового фенотипа была показана на многих культурах, включая представителей семейства Cucurbitaceae (Lange et al., 1994; Hedden, 2003; Huang et al., 2010). *GA20ox* кодирует ключевой фермент, который катализирует предпоследнюю стадию биосинтеза GA, превращая GA12 в GA9 и GA53 в GA20 (Spielmeyer et al., 2002; Qin et al., 2013). Примеры, когда мутации в гене *GA20ox* приводят к появлению карликовых фенотипов, известны у многих видов растений. У *Arabidopsis thaliana* L. было обнаружено пять копий генов *GA20ox* (Hedden, 2003). Ген *OsGA20ox2* является геном *sd1* «зеленой революции» риса (Sasaki et al., 2002; Spielmeyer et al., 2002; Hedden, 2003; Oikawa et al., 2004). Мутации в гене *GA20ox* по-разному влияют на общий рост растений. В частности, линия ga20ox1 *Arabidopsis* L. демонстрирует полукарликовый фенотип, в то время как растения ga20ox2 лишь немного меньше, чем растения дикого типа (Rieu et al., 2008).

К настоящему времени картировано несколько генов, участвующих в формировании карликового фенотипа у Cucurbitaceae; некоторые из них являются гомологами гена *GA20ox*. Ген *GA20ox* был идентифицирован у генотипов тыквы *Cucurbita maxima* Duch. (Lange et al., 1994). Также было показано, что трансгенный салат-латук, содержащий тыквенный ген *GA20ox*, демонстрировал фенотип карликовости у растений поколения T2 (Niki et al., 2001). У *C. maxima* было обнаружено, что один из трех локусов количественных признаков (quantitative trait locus, QTL) для карликовости включает ген (*Cma_004516*), кодирующий GA20ox. G. Zhang с соавторами идентифицировали вставку/делецию длиной 1249 пн (InDel) и два SNP в промоторной области и 3 пн InDel и 8 SNP в интронной области *Cma_004516* (Zhang G. et al., 2015). Были разработаны два молекулярных маркера, нацеленных на поиск InDel, длиной 1249 пн, названные InDel1456 и InDel1146, для идентификации карликового фенотипа у тыквы.

Содержание биологически активного GA3 в мутантах dsh было значительно ниже нормы, а экспрессия гена *Cla010726*, кодирующего GA20ox, значительно снижена у карликовых мутантов арбуза. У растений наблюдался фенотип с короткими стеблями и междоузлиями, а также мелкими листьями и плодами. Было показано, что мутации в промотерной части гена *ClaGA20ox* приводят к карликовости растений арбуза. Мутант dsh является потенциально полезным источником генетических ресурсов для выведения новых сортов арбуза с признаками карликовости. Одним из потенциальных генов, ответственных за карликовость арбуза, является ген *Cla010726/ClaGA20ox*, расположенный на 7-й хромосоме (Dong et al., 2018, 2021).

Ген *GA3ox* кодирует фермент гиббереллин 3-оксидазу, катализирует последний этап биосинтеза гиббереллинов. Мутации в гене *GA3ox* могут привести к измененной продукции гиббереллинов, что может существенно влиять на рост и развитие растений. Например, мутации, которые снижают активность *GA3ox*, могут привести к карликовости, укорачиванию междоузлий, задержке цветения и уменьшению размера плодов (Hedden, 2020). *GA3ox* регулируется различными факторами, такими как свет и температура, уровень гормонов и стадия развития растений (Hedden, 2001, 2020). Мутации генов *GA3ox* были идентифицированы у многих культур, таких как *Arabidopsis thaliana* (Chiang et al., 1997), *Oryza* L. (Itoh et al., 2001) и *Zea mays* L. (Chen et al., 2014). Ген *DWARF1*, который является аллелем d1, кодирует *GA3ox*, приводящий к карликовости у кукурузы (Chen et al.,

2014). Гомологи гена *GA3ox* уже обнаружены у многих представителей семейства тыквенных. Гомологи *GA3ox* были обнаружены у инбредной линии корейского огурца – ген *CsGy7G019320*. Было показано, что появление карликового фенотипа обусловлено делецией на 20 пн в гене *CsGy7G019320* (Anarjan et al., 2023).

У тыквы *Cucurbita moschata* Duch. и *Cucurbita pepo* L. появление кустового фенотипа регулируется генами *Bu*, также связанными с GA (Wu et al., 2008, 2015). Группой китайских исследователей (Min et al., 2022) был идентифицирован ген *CmoCh08G006170* на хромосоме 8, который кодирует гиббереллин 3β-гидроксилазу (GA3ox) и является наиболее вероятным геном-кандидатом для карликового фенотипа Si1. Уровень экспрессии *CmoCh08G006170* в стеблях Si1 был значительно повышен по сравнению с таковым у N87 дикого типа, а карликовый фенотип мог быть восстановлен экзогенной обработкой GA3 (Min et al. 2022).

В последние годы разными группами исследователей было обнаружено и подтверждено, что ген *Cla015407* – гомолог гена *GA3ox* у арбуза (*Citrullus lanatus*) (Wei et al., 2019; Sun et al., 2020; Zhang T. et al., 2021). В мутантном варианте гена *Cla015407* обнаружена SNP (G → A) в интроне, приводящая к измененному сплайсингу. В результате происходит генерация двух изоформ, одна из которых содержит делецию на 13 пн во втором экзоне GA3ox, что приводит к образованию усеченного белка и потере функционального домена диоксигеназы Fe2OG у растений с карликовым фенотипом. При этом экспрессия *Cla015407* и других генов биосинтеза и метаболизма GA была в основном повышена, а биоактивный GA4 был значительно снижен в побегах карликовых растений по сравнению с плетистыми формами. Применение экзогенного GA восстанавливало карликовые растения до нормального состояния. Потеря функции *GA3ox* приводила к уменьшению GA4 и фенотипу карликовости у арбуза (Sun et al., 2020; Wei et al., 2019). Группой исследователей из Таиланда (Chomkaeo et al., 2023) также был разработан и предложен высокопроизводительный функциональный маркер Cla015407-GA. Ген *GA2ox* кодирует гиббереллин-2-оксидазу (*GA2oxs*). На пути дезактивации GA *GA2ox*-гены преобразуют биоактивный GA4 и GA1 в неактивный, поддерживая баланс биоактивного GA и промежуточных продуктов (Yamaguchi, 2008; Wang Y. et al., 2017; Binenbaum et al., 2018). Известно, что повышение экспрессии *GA2ox*-генов снижает уровень концентрации активного GA, вызывая карликовый фенотип у *Arabidopsis thaliana* (*AtGA2ox7* и *AtGA2ox8*) (Schomburg et al., 2003), *Oryza* (*OsGA2ox6*) (Huang et al., 2010), *Nicotiana* L. (*GmRAV*) (Zhao et al., 2016) и других видов растений. Определены три локуса количественных признаков (QTL) карликовости в геноме *Cucurbita pepo*, один из которых включал ген *GA2ox* (*Cp4.1LG12*), связанный с инактивацией GA (Xiang et al., 2018). Wenqi Ding et al. (2021) идентифицировали ген *Cp4.1LG10g05910.1*, кодирующий гиббереллин-2-оксидазу и ассоциированный с проявлением карликового фенотипа у *C. pepo*. Уровень экспрессии *Cp4.1LG10g05910.1* и активность фермента GA2ox были выше у карликового мутанта X10. Было показано, что SNP в консервативной области домена DIOX N вызывает изменения в сайте связывания факторов транскрипции в промоторе *Cp4.1LG10g05910.1*, которые могут влиять на регуляцию экспрессии гена. Карликовая линия X10 была чувствительна к GA (Ding et al., 2021). Недавно Yoon Jeong Jang et al. (2020) выявили ген-кандидат *Cla015405* на хромосоме 9, содержащий мотив 2-бета-диоксигеназы (GA2ox). Было продемонстрировано, что SNP (C на A) во втором экзоне *Cla015405* приводит к замене глутаминовой кислоты на лизин. У карликового мутанта Caupatdw наблюдалась повышенная экспрессия гена *Cla015405* по сравнению с диким типом Hs4450. Для выявления мутантов по гену *Cla015405* авторами был предложен SNP-маркер Dwf 9–4.

Важная роль генов, связанных с чувствительностью к гиббереллинам, в формировании компактных форм у бахчевых культур была подтверждена множеством исследований. Дальнейшие исследования в этой области могут способствовать разработке новых методов управления ростом и развитием растений с целью повышения их урожайности и экономической эффективности.

Гены карликовости, связанные с транспортом ауксина

Ауксин – это фитогормон, транспортирующийся базипетально от апексов побегов к нижележащим органам, и его роль в регулировании нескольких важных характеристик, таких как высота растений и ветвление побегов, также хорошо известна (Palme et al., 2006). Направленный транспорт ауксина и формирование его градиента в тканях осуществляются за счет взаимодействия различных переносчиков. На данный момент идентифицированы некоторые переносчики ауксина: AUXIN RESISTANT 1/LIKE AUX1 (AUX1/LAX), PIN и ABCB/MDR/PGP (Titapiwatanakun et al., 2009; Titapiwatanakun, Murphy, 2009). С белками PIN взаимодействует эректоподобная рецепторная киназа (ERECTA-like receptor kinase). ABCB1, ABCB4 и ABCB19 – наиболее изученные переносчики ауксина из семейства ABCB4 (Geisler, Murphy, 2006). Мутации в тканях, связанных с транспортом ауксина, могут вызывать появление карликовых и полукарликовых фенотипов, что было продемонстрированно на многих культурах (Noh, 2001; Li et al., 2018). Мутанты *Arabidopsis* по генам *abcb1* и *abcb19* демонстрируют уменьшение роста и снижение полярного транспорта ауксина. Наиболее выраженно эти эффекты наблюдались у двойного мутанта abcb1 abcb19 (Noh, 2001). Было показано, что ABCB1 функционирует согласованно с PGP19/MDR1/ABCB19 ауксинов у *Arabidopsis* (Geisler et al., 2005). Избыточная экспрессия *OsPIN2* у риса может усиливать транспорт ауксина от стеблей к корням, что приводит к снижению высоты растения (Chen et al., 2012). Было обнаружено, что потеря функции гена *ABCB1* лежит в основе карликовых фенотипов ценных в сельском хозяйстве мутантов кукурузы brachytic2/zmabcb1 (Zhang X. et al., 2019).

Сверхэкспрессия гена *ZmPIN1a* ассоциирована со снижением высоты растения кукурузы (Li et al., 2018). Гены рецепторных киназ *Arabidopsis ERECTA ERECTA* (*ER*), *ERECT LIKE 1* (*ARL1*) и *ERECT LIKE 2* (*ARL2*) кодируют богатые лейцином повторяющиеся рецептор-подобные киназы, которые, как было показано, регулируют удлинение стебля. Мутант erecta демонстрирует уменьшенный размер стебля и гипокотиля, а тройной мутант er erl1 erl2 имеет фенотип ультракарлика (Shpak et al., 2004). У тыквенных культур также были обнаружены мутанты с карликовым фенотипом, обусловленным мутациями в генах транспорта ауксина. У мутанта арбуза линии dwarf, WM102, был идентифицирован ген *Cldw-1* (*Cla010337*) на хромосоме 9, кодирующий ABC-транспортер (Zhu et al., 2019). WM102, как и первый карликовый арбуз, был получен из сорта ‘Bush Sugar Baby’ и был мутантом по гену

dw-1, имел короткие междоузлия с двумя-тремя ветвями (Mohr, Sandhu, 1975). Потеря функции гена *dw-1* является наиболее частой причиной появления кустового фенотипа у арбуза (Strygina et al., 2022; Zhu et al., 2019). Ген *dw-1s* был идентифицирован у сорта арбуза короткого срока созревания 'Somali Loca'. Ген *dw-1s* является аллельным к *dw-1*, и растения с функциональной копией этого гена имеют среднюю длину плети между нормальной и карликовой (Tekhanovich et al., 2019). Для идентификации мутантного аллеля *dw-1* H. Zhu et al. (2019) предложили два типа молекулярных маркеров: Indel 1 и dCAPS3. С помощью данных маркеров в одном из недавних исследований было продемонстрированно, что большинство кустовых и ультракустовых образцов коллекции ВИР из анализируемой выборки являются мутантами по гену *dw-1* (Strygina et al., 2022).

Недавно был клонирован ген короткого междоузлия (*Cmsi*) у дыни *Cucumis melo* L., который кодирует эректоподобную рецепторную киназу (ERECTA-like), регулирующую удлинение междоузлий (Yang et al., 2020). Сообщалось о четырех карликовых/полукарликовых мутантах si-1, si-2, si-3 и mdw1 с рецессивным типом наследования у дыни (Paris et al., 1984). Hwang et al. (2014) обнаружили, что локус mdw1 тесно связан с геном *mERE*, который совпадает с *CmERECTA* (*MELO3C016916*). В одном из недавних исследований ген *Cmsi* (*CmERECTA*) был отображен на хромосоме 7 (Yang et al., 2020). CMSI взаимодействует с геном переноса полярного ауксина *CmPIN2*. Концентрация ауксина была значительно снижена у полукарликового мутанта M406, что согласуется со стимулирующей ролью ауксина в удлинении междоузлий; мутация *Cmsi* в полукарликовом мутанте M406 нарушила взаимодействие между *CmSI* и *CmPIN2* (Yang et al., 2020). Замена одного нуклеотида с T на G в 25-м экзоне привела к преждевременному появлению стоп-кодона и усечению белка у карликового мутанта M406. Исследователями также был предложен маркер dCAPS2 CmSI для маркерного отбора по мутации в *Cmsi* в селекции дыни (Yang et al., 2020). В одном из недавних исследований (Xu et al., 2023) был идентифицирован новый мутант с коротким междоузлием, si107 у огурца. Укороченные междоузлия у si107 связаны с делецией на 2 пн в гене *CsSI*, кодирующем эректоподобную рецепторную киназу (ERECTA-like receptor kinase). Уровни эндогенного ауксина в стеблях si107 были снижены по сравнению с диким типом. Показано, что *CsSI* регулирует длину междоузлий огурца с помощью ауксинового сигнального пути (Xu et al., 2023).

Таким образом, ауксин играет ключевую роль в регулировании роста и развития растений, а его транспорт осуществляется с помощью различных переносчиков, таких как AUX1/LAX, PIN и ABCB/MDR/PGP. Мутации в генах, связанных с транспортом ауксина, могут вызывать карликовые и полукарликовые фенотипы у различных бахчевых культур. Эти гены представляют потенциальную ценность для дальнейших исследований и разработки новых сортов с желаемыми селекционными признаками.

Гены путей биосинтеза брассиностероидов, связанные с появлением карликового фенотипа

Другая группа растительных гормонов – брассиностероидов (BR) участвует в регуляции высоты растений (Kwon, Choe, 2005; Castorina, Consonni, 2020; Bajguz, Chmur, 2022). Карликовые мутанты с дефицитом BR или нечувствительные к нему были обнаружены у многих культур: *Arabidopsis thaliana* (Azpiroz et al., 1998), *Oryza*, (Mori et al., 2002) и многих других. Не стали исключением культуры растений семейства Cucurbitaceae. Сообщалось о нескольких генах, лежащих в основе появления компактных или сверхкомпактных мутантов огурца (*Cucumis sativus* L.) с типичным фенотипом мутанта с дефицитом BR: *super compact-1* (*scp-1*), (*scp-2*), *cpa* (*compact plant architecture*), *cpa-2* (Hou et al., 2017; Wang H. et al., 2017; Zhang M. et al., 2021; Zhang M. et al., 2022). Ген *scp-1/CsCYP85A1* – член семейства генов монооксигеназы цитохрома P450 растений – играет важную роль в регуляции удлинения междоузлий у огурца. Ген *scp-1/CsCYP85A1* кодирует BR-C6-оксидазу в пути биосинтеза BR. Суперкомпактный мутант контролируется рецессивным геном (*scp*), который показывает сильно уменьшенную длину стебля, темно-зеленые и сморщенные листья (Wang H. et al., 2017). Также был обнаружен спонтанный карликовый мутант super compact-2 (scp-2), который демонстрирует типичный фенотип с дефицитом биосинтеза BR. Показано, что мутация в гене *CsDET2* приводит к системному дефициту брассиностероидов и суперкомпактному фенотипу огурца (Hou et al., 2017). Ген *CsDWF5*, кодирующий 7-дегидрохолестеролредуктазу, которая участвует в биосинтезе стеролов, был идентифицирован как ген-кандидат для *cpa* (Zhang M. et al., 2021). В одном из недавних исследований новый рецессивный компактный аллель, обозначенный как *cpa-2* (c*ompact plant architecture-2*), был картирован в области 109 000 пн на хромосоме 7. Ген *CsaV37G030530* (*CsDWF1*) является геном-кандидатом для *cpa-2*, он кодирует C-24-редуктазу, которая действует как ключевой фермент в биосинтезе BR. Компактный фенотип может быть частично восстановлен путем экзогенного применения BR (Zhang M. et al., 2022).

Выделение и характеристика карликовых мутантов с нарушением биосинтеза BR сыграли важную роль в понимании путей биосинтеза брассиностероидов. Фенотипы мутантов-карликов BR отличаются от фенотипов GA и ауксиновых карликов более серьезными изменениями в развитии листьев и соцветий. BR-мутанты восстанавливаются до фенотипа дикого типа путем экзогенного применения BR (Kwon, Choe, 2005). Основная особенность характерного фенотипа карликового вида BR обусловлена однонаправленным уменьшением размеров органов. Длина цветоножек, стеблей, корней и листовых пластинок уменьшается, листья становятся более круглыми на вид. Это контрастирует с фенотипами листьев биосинтетических и сигнальных мутантов GA, которые демонстрируют более короткие и узкие листья по сравнению с диким типом. Мутанты BR dwf имеют меньший объем клеток, но содержат такое же количество хлоропластов, как и дикий тип, что приводит к появлению более темного зеленого цвета (Azpiroz et al., 1998; Kwon, Choe, 2005).

У бахчевых культур, таких как тыква, арбуз и дыня, пока не были обнаружены карликовые мутанты растений по генам, связанным с путями биосинтеза брассиностероидов. Хотя на примере других культур показано, что мутации в этих генах могут приводить к карликовости у растений. Исследования в этом направлении представляют собой перспективную область для поиска источников генов, связанных с появлением карликовых фенотипов, что может способствовать созданию новых сортов бахчевых культур с более компактным и удобным для выращивания размером.

Кустовые и короткоплетистые сорта и линии бахчевых культур из коллекции ВИР

Создание новых форм растения компактно-кустового и короткоплетистого типа, пригодных к механизированному возделыванию, является одним из важнейших направлений для селекции бахчевых культур (Mohr, Sandhu, 1975; Tekhanovich et al., 2020). На основе коллекции ВИР создан ряд кустовых и короткоплетистых сортов тыквы, арбуза и дыни (Elatskova, 2019, 2021; Tekhanovich et al., 2019).

Для селекции кустовых и короткоплетистых сортов арбуза был использован образец кустового сорта 'Bush Dessert King' (США). На Кубанской опытной станции ВИР была создана линия КРЛ 732, на основе которой в 2009 г. вывели сорт 'Святослав' (Tekhanovich et al., 2019). В дальнейшем выделен ряд перспективных селекционных линий, которые относятся к кустовому и короткоплетистому типу; среди них – рассеченнолистные линии КРЛ 652, КРЛ 656, КРЛ 376, КРЛ 694, а также кустовые цельнолистные линии КЦЛ 760, КЦЛ 806 и короткоплетистые линии КПЛ 368, КПЛ 774. Они отличаются по различным морфологическим и хозяйственным признакам, включая форму растения, тип листа, размер и форму плода, продолжительности вегетационного периода (от ранних до средне- и позднеспелых). Разнообразие этих линий позволяет ускорить процесс селекции и получить новые кустовые и короткоплетистые сорта (Tekhanovich et al., 2019).

Для селекции кустовых сортов дыни выделены кустовые линии (КЛ): КЛ 351, КЛ 355, КЛ 508, Кустовая 755, длина плетей которых составляет 0,5–0,8 м. Среди них – КЛ 508 и Кустовая 755, обладающие наилучшими по продуктивности и качеству плодов признаками. Путем скрещивания кустовых форм с лучшими плетистыми сортами крупноплодной тыквы (*Cucurbita maxima*) были выделены перспективные линии, такие как Кустовая 8 и Кустовая 11, которые обладают скороспелостью, хорошей продуктивностью и качеством плодов. На основе линии Кустовая 11 выведены сорта порционной кустовой тыквы 'Малышка' (длина плети 0,9–1,0 м) и 'Матрешка' (длина плети 0,7–0,9 м), включенные в Госреестр РФ по 12-ти регионам (Elatskova, 2019).

У вида твердокорой тыквы (*C. pepo*) созданы кустовые и короткоплетистые (1–1,5 м) селекционные формы (Elatskova, 2019). Кустовая форма мускатной тыквы (*C. moschata*) создана на основе растений коллекционного образца 'Early Butternut' (к-017, США): растения имеют компактно-кустовой габитус (0,8–1,0 м) и плоды средней массой 1,0–1,5 кг с достаточно высокими вкусовыми характеристиками (Elatskova, 2021).

На сегодняшний день продолжается изучение бахчевых культур из коллекции ВИР с целью выявления новых форм компактно-кустового типа.

Заключение

В обзоре освещены современные исследования генов, ассоциированных с появлением компактных форм у бахчевых культур, и связанных с ними физиологических функций растений. На примере различных культур, включая бахчевые, было продемонстрировано, что мутации в генах, регулирующих чувствительность и синтез гормонов гиббереллина, ауксина и брассиностероидов, приводят к изменению морфологии растений и формированию более компактных фенотипов. В работе также были представлены разработанные молекулярные маркеры, которые позволяют обнаруживать мутантные аллели этих генов и определять желаемые фенотипы. Несмотря на значительное количество открытий, сделанных в последние годы и десятилетия, создание сортов растений с компактной формой остается важным и развивающимся направлением в селекции бахчевых культур. Благодаря коллекции ВИР были разработаны различные сорта тыквы, арбуза и дыни с кустовым ростом и короткими побегами. Эти сорта и линии могут служить источником генетического материала для создания новых сортов, которые будут более удобны для механизированной обработки. Дальнейшее исследование генов, отвечающих за компактность растений, позволит селекционерам разработать новые сорта бахчевых культур с желаемой формой и улучшенными характеристиками.

References / Литература

Anarjan M.B, Begum S., Bae I., Lee S. Mutation in the *GA3ox* gene governs short-internode characteristic in a Korean cucumber inbred line. *Horticulture Environment and Biotechnology*. 2023;64(3):485-495. DOI: 10.1007/s13580-022-00496-6

Azpiroz R., Wu Y., Locascio J.C., Feldmann K.A. An *Arabidopsis* brassinosteroid-dependent mutant is blocked in cell elongation. *The Plant Cell*. 1998;10(2):219-230. DOI: 10.1105/tpc.10.2.219

Bajguz A., Chmur M. Biosynthesis and inactivation of brassinosteroids in plants. In: R. Akula, G. Sirhindi (eds). *Jasmonates and Brassinosteroids in Plants: Metabolism, Signaling, and Biotechnological Applications*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2022. p.1-22. DOI: 10.1201/9781003110651-1

Binenbaum J., Weinstain R., Shani E. Gibberellin localization and transport in plants. *Trends in Plant Science*. 2018;23(5):410-421. DOI: 10.1016/j.tplants.2018.02.005

Castorina G., Consonni G. The role of brassinosteroids in controlling plant height in Poaceae: A genetic perspective. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(4):1191. DOI: 10.3390/ijms21041191

Chen Y., Fan X., Song W., Zhang Y., Xu G. Over-expression of *OsPIN2* leads to increased tiller numbers, angle and shorter plant height through suppression of *OsLAZY1*. *Plant Biotechnology Journal*. 2012;10(2):139-149. DOI: 10.1111/j.1467-7652.2011.00637.x

Chen Y., Hou M., Liu L., Wu S., Shen Y., Ishiyama K. et al. The maize *DWARF1* encodes a gibberellin 3-oxidase and is dual localized to the nucleus and cytosol. *Plant Physiology*. 2014;166(4):2028-2039. DOI: 10.1104/pp.114.247486

Chiang H.H., Hwang I., Goodman H.M. Isolation of the *Arabidopsis* GA4 locus. *The Plant Cell*. 1995;7(2):195-201. DOI: 10.1105/tpc.7.2.195

Chomkaeo N., Janphen K., Hinlo M., Petchara N., Struss D., Sakulsingharoj C. et al. A mutation in acceptor splice site of *GA3ox* homolog *Cla015407* gene confers a dwarf phenotype in watermelon (*Citrullus lanatus* L.). *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*. 2023;28(3):13. DOI: 10.14456/apst.2023.48

Ding W., Wang Y., Qi C., Luo Y., Wang C., Xu W. et al. Fine mapping identified the gibberellin 2-oxidase gene *CpDw* leading to a dwarf phenotype in squash (*Cucurbita pepo* L.). *Plant Science*. 2021;306:110857. DOI: 10.1016/j.plantsci.2021.110857

Dong W., Wu D., Li G., Wu D., Wang Z. Next-generation sequencing from bulked segregant analysis identifies a dwarfism

gene in watermelon. *Scientific Reports*. 2018;8(1):2908. DOI: 10.1038/s41598-018-21293-1

Dong W., Wu D., Wang C., Liu Y., Wu D. Characterization of the molecular mechanism underlying the dwarfism of *dsh* mutant watermelon plants. *Plant Science*. 2021;313:111074. DOI: 10.1016/j.plantsci.2021.111074

Elatskova A.G. Diversity of the pumpkin collection and its hereditary potential. Results and prospects of breeding practice. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(2):77-82. [in Russian] (Елацкова А.Г. Разнообразие коллекции тыквы и ее наследственный потенциал. Результаты и перспективы селекции. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(2):77-82). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-77-82

Elatskova A.G. Identification and development of source material for breeding early bushy and short-vined cultivars of *Cucurbita moschata* Duch. ex Poir. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(3):143-150. [in Russian] (Елацкова А.Г. Выявление и создание исходного материала для селекции раннеспелых кустовых и короткоплетистых сортов мускатной тыквы (*Cucurbita moschata* Duch. ex Poir). *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(3):143-150). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-3-143-150

Fagoaga C., Tadeo F.R., Iglesias D.J., Huerta L., Lliso I., Vidal A.M. et al. Engineering of gibberellin levels in citrus by sense and antisense overexpression of a GA 20-oxidase gene modifies plant architecture. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58(6):1407-1420. DOI: 10.1093/jxb/erm004

García-Hurtado N., Carrera E., Ruiz-Rivero O., López-Gresa M.P., Hedden P., Gong F. et al. The characterization of transgenic tomato overexpressing *gibberellin 20-oxidase* reveals induction of parthenocarpic fruit growth, higher yield, and alteration of the gibberellin biosynthetic pathway. *Journal of Experimental Botany*. 2012;63(16):5803-5813. DOI: 10.1093/jxb/ers229

Geisler M., Blakeslee J.J., Bouchard R., Lee O.R., Vincenzetti V., Bandyopadhyay A. et al. Cellular efflux of auxin catalyzed by the *Arabidopsis* MDR/PGP transporter AtPGP1. *The Plant Journal*. 2005;44(2):179-194. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2005.02519.x

Geisler M., Murphy A.S. The ABC of auxin transport: The role of p-glycoproteins in plant development. *FEBS Letters*. 2006;580(4):1094-1102. DOI: 10.1016/j.febslet.2005.11.054

Hedden P. Gibberellin metabolism and its regulation. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2001;20(4):317-318. DOI: 10.1007/s003440010039

Hedden P. The current status of research on gibberellin biosynthesis. *Plant and Cell Physiology*. 2020;61(11):1832-1849. DOI: 10.1093/pcp/pcaa092

Hedden P. The genes of the Green Revolution. *Trends in Genetics*. 2003;19(1):5-9. DOI: 10.1016/S0168-9525(02)00009-4

Hou S., Niu H., Tao Q., Wang S., Gong Z., Li S. et al. A mutant in the *CsDET2* gene leads to a systemic brassinosteriod deficiency and super compact phenotype in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 2017;130(8):1693-1703. DOI: 10.1007/s00122-017-2919-z

Huang J., Tang D., Shen Y., Qin B., Hong L., You A. et al. Activation of gibberellin 2-oxidase 6 decreases active gibberellin levels and creates a dominant semi-dwarf phenotype in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Genetics and Genomics*. 2010;37(1):23-36. DOI: 10.1016/S1673-8527(09)60022-9

Hwang J., Oh J., Kim Z., Staub J.E., Chung S.M., Park Y. Fine genetic mapping of a locus controlling short internode length in melon (*Cucumis melo* L.). *Molecular Breeding*. 2014;34(3):949-961. DOI: 10.1007/s11032-014-0088-1

Itoh H., Ueguchi-Tanaka M., Sentoku N., Kitano H., Matsuoka M., Kobayashi M. Cloning and functional analysis of two gibberellin 3beta-hydroxylase genes that are differently expressed during the growth of rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2001;98(15):8909-8914. DOI: 10.1073/pnas.141239398

Jang Y.J., Yun H.S., Rhee S.J., Seo M., Kim Y., Lee G.P. Exploring molecular markers and candidate genes responsible for watermelon dwarfism. *Horticulture Environment and Biotechnology*. 2020;61(1):173-182. DOI: 10.1007/s13580-020-00229-7

Kawai Y., Ono E., Mizutani M. Evolution and diversity of the 2-oxoglutarate-dependent dioxygenase superfamily in plants. *The Plant Journal*. 2014;78(2):328-343. DOI: 10.1111/tpj.12479

Kwon M., Choe S. Brassinosteroid biosynthesis and *dwarf* mutants. *Journal of Plant Biology*. 2005;48(1):1-15. DOI: 10.1007/BF03030559

Lange T., Hedden P., Graebe J.E. Expression cloning of a gibberellin 20-oxidase, a multifunctional enzyme involved in gibberellin biosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1994;91(18):8552-8556. DOI: 10.1073/pnas.91.18.8552

Li Z., Zhang X., Zhao Y., Li Y., Zhang G., Peng Z. et al. Enhancing auxin accumulation in maize root tips improves root growth and dwarfs plant height. *Plant Biotechnology Journal*. 2018;16(1):86-99. DOI: 10.1111/pbi.12751

Mashilo J., Shimelis H., Ngwepe R.M. Genetic resources of bottle gourd (*Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.] and citron watermelon (*Citrullus lanatus* var. *citroides* (L.H. Bailey) Mansf. ex Greb.) – implications for genetic improvement, product development and commercialization: A review. *South African Journal of Botany*. 2022;145:28-47. DOI: 10.1016/j.sajb.2021.10.013

Min Z., Hu X., Han X., Li Y., Li J., Wang D. et al. A novel single-base mutation in *GA3ox* confers a Ga-deficient dwarf phenotype in pumpkin (*Cucurbita moschata* D.). SSRN: 2022. DOI: 10.2139/ssrn.3988095 Available from: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3988095 [accessed Jan. 17, 2023].

Mohr H.C., Sandhu M.S. Inheritance and morphological traits of a double recessive dwarf in watermelon, *Citrullus lanatus* (Thunb.) Mansf. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 1975;100(2):135-137. DOI: 10.21273/jashs.100.2.135

Mori M., Nomura T., Ooka H., Ishizaka M., Yokota T., Sugimoto K. et al. Isolation and characterization of a rice dwarf mutant with a defect in brassinosteroid biosynthesis. *Plant Physiology*. 2002;130(3):1152-1161. DOI: 10.1104/pp.007179

Niki T., Nishijima T., Nakayama M., Hisamatsu T., Oyama-Okubo N., Yamazaki H. et al. Production of dwarf lettuce by overexpressing a pumpkin gibberellin 20-oxidase gene. *Plant Physiology*. 2001;126(3):965-972. DOI: 10.1104/pp.126.3.965

Noh B. Multidrug resistance-like genes of *Arabidopsis* required for auxin transport and auxin-mediated development. *The Plant Cell*. 2001;13(11):2441-2454. DOI: 10.1105/tpc.13.11.2441

Oikawa T., Koshioka M., Kojima K., Yoshida H., Kawata M. A role of *OsGA20ox1*, encoding an isoform of gibberellin 20-oxidase, for regulation of plant stature in rice. *Plant Molecular Biology*. 2004;55(5):687-700. DOI: 10.1007/s11103-004-1692-y

Otani M., Meguro S., Gondaira H., Hayashi M., Saito M., Han D.S. et al. Overexpression of the gibberellin 2-oxidase gene from *Torenia fournieri* induces dwarf phenotypes in the liliaceous monocotyledon *Tricyrtis* sp. *Journal*

of Plant Physiology. 2013;170(16):1416-1423. DOI: 10.1016/j.jplph.2013.05.002

Palme K., Dovzhenko A., Ditengou F.A. Auxin transport and gravitational research: perspectives. *Protoplasma*. 2006;229(2-4):175-181. DOI: 10.1007/s00709-006-0216-9

Paris H.S., Nerson H., Karchi Z. Genelics of internode length in melons. *Journal of Heredity*. 1984;75(5):403-406. DOI: 10.1093/oxfordjournals.jhered.a109965

Qin X., Liu J.H., Zhao W.S., Chen X.J., Guo Z.J., Peng Y.L. Gibberellin 20-oxidase gene *OsGA20ox3* regulates plant stature and disease development in rice. *Molecular Plant–Microbe Interactions*. 2013;26(2):227-239. DOI: 10.1094/MPMI-05-12-0138-R

Rieu I., Ruiz-Rivero O., Fernandez-Garcia N., Griffiths J., Powers S.J., Gong F. et al. The gibberellin biosynthetic genes *AtGA20ox1* and *AtGA20ox2* act, partially redundantly, to promote growth and development throughout the *Arabidopsis* life cycle*. The Plant Journal*. 2008;53(3):488-504. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2007.03356.x

Sasaki A., Ashikari M., Ueguchi-Tanaka M., Itoh H., Nishimura A., Swapan D. et al. A mutant gibberellin-synthesis gene in rice. *Nature*. 2002;416(6882):701-702. DOI: 10.1038/416701a

Schomburg F.M., Bizzell C.M., Lee D.J., Zeevaart J.A.D., Amasino R.M. Overexpression of a novel class of gibberellin 2-oxidases decreases gibberellin levels and creates dwarf plants. *The Plant Cell*. 2003;15(1):151-163. DOI: 10.1105/tpc.005975

Schwechheimer C. Gibberellin signaling in plants – the extended version. *Frontiers in Plant Science*. 2012;2:107. DOI: 10.3389/fpls.2011.00107

Shpak E.D., Berthiaume C.T., Hill E.J., Torii K.U. Synergistic interaction of three ERECTA-family receptor-like kinases controls *Arabidopsis* organ growth and flower development by promoting cell proliferation. *Development*. 2004;131(7):1491-1501. DOI: 10.1242/dev.01028

Spielmeyer W., Ellis M.H., Chandler P.M. Semidwarf (*sd-1*), "green revolution" rice, contains a defective gibberellin 20-oxidase gene. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2002;99(13):9043-9048. DOI: 10.1073/pnas.132266399

Strygina K.V., Elatskova A.G., Elatskov Yu.A., Tekhanovich G.A., Khlestkina E.K. Analysis of the genes that determine the dwarf form of watermelon *Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai in the VIR collection. *Russian Journal of Genetics*. 2022;58(12):1457-1472. DOI: 10.1134/S1022795422120134

Sun Y., Zhang H., Fan M., He Y., Guo P. A mutation in the intron splice acceptor site of a *GA3ox* gene confers dwarf architecture in watermelon (*Citrullus lanatus* L.). *Scientific Reports*. 2020;10(1):14915. DOI: 10.1038/s41598-020-71861-7

Tekhanovich G.A., Elatskova A.G., Elatskov Yu.A. Genetic sources for breeding bushy and short-vine watermelon cultivars. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2019;180(2):89-94. [in Russian] (Теханович Г.А., Елацкова А.Г., Елацков Ю.А. Генетические источники для селекции кустовых и короткоплетистых сортов арбуза. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2019;180(2):89-94). DOI: 10.30901/2227-8834-2019-2-89-94

Tekhanovich G.A., Elatskova A.G., Elatskov Yu.A. Investigations by N.I. Vavilov and his influence on the promotion of introduction, collection study and breeding of cucurbitaceous crops. *Vavilovia*. 2020;2(2):44-57. [in Russian] (Теханович Г.А., Елацкова А.Г., Елацков Ю.А. Исследования Н.И. Вавилова и его влияние на развитие интродукции, изучение коллекции и селекции бахчевых культур. *Vavilovia*. 2020;2(2):44-57). DOI: 10.30901/2658-3860-2019-2-44-57

Thomas S.G., Phillips A.L., Hedden P. Molecular cloning and functional expression of gibberellin 2-oxidases, multifunctional enzymes involved in gibberellin deactivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 1999;96(8):4698-4703. DOI: 10.1073/pnas.96.8.4698

Titapiwatanakun B., Blakeslee J.J., Bandyopadhyay A., Yang H., Mravec J., Sauer M. et al. ABCB19/PGP19 stabilises PIN1 in membrane microdomains in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*. 2009;57(1):27-44. DOI: 10.1111/j.1365-313X.2008.03668.x

Titapiwatanakun B., Murphy A.S. Post-transcriptional regulation of auxin transport proteins: cellular trafficking, protein phosphorylation, protein maturation, ubiquitination, and membrane composition. *Journal of Experimental Botany*. 2009;60(4):1093-1107. DOI: 10.1093/jxb/ern240

Wang H., Li W., Qin Y., Pan Y., Wang X., Weng Y. et al. The cytochrome P450 gene *CsCYP85A1* is a putative candidate for super compact-1 (*Scp-1*) plant architecture mutation in cucumber (*Cucumis sativu*s L.). *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:266. DOI: 10.3389/fpls.2017.00266

Wang Y., Zhao J., Lu W., Deng D. Gibberellin in plant height control: old player, new story. *Plant Cell Reports*. 2017;36(3):391-398. DOI: 10.1007/s00299-017-2104-5

Wei C., Zhu C., Yang L., Zhao W., Ma R., Li H. et al. A point mutation resulting in a 13 bp deletion in the coding sequence of *Cldf* leads to a GA-deficient dwarf phenotype in watermelon. *Horticulture Research*. 2019;6(1):132. DOI: 10.1038/s41438-019-0213-8

Wu T., Cao J., Qin Z., Du Y.L. Identification of a novel GA-related bush mutant in pumpkin (*Cucurbita moschata* Duchesne). *Pakistan Journal of Botany*. 2015;47(4):1359-1366.

Wu T., Cao J., Zhang Y. Comparison of antioxidant activities and endogenous hormone levels between bush and vine-type tropical pumpkin (*Cucurbita moschata* Duchesne). *Scientia Horticulturae*. 2008;116(1):27-33. DOI: 10.1016/j.scienta.2007.11.003

Xiang C., Duan Y., Li H., Ma W., Huang S., Sui X. et al. A high-density EST-SSR-based genetic map and QTL analysis of dwarf trait in *Cucurbita pepo* L. *International Journal of Molecular Sciences*. 2018;19(10):3140. DOI: 10.3390/ijms19103140

Xu X., Hu Q., Wang J., Wang X., Lou L., Xu J. et al. A 2-bp deletion in the protein kinase domain region of the ERECTA-like receptor kinase gene in cucumber results in short internode phenotype. *Plant Science*. 2023;327:111536. DOI: 10.1016/j.plantsci.2022.111536

Yamaguchi S. Gibberellin metabolism and its regulation. *Annual Review of Plant Biology*. 2008;59:225-251. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092804

Yang S., Zhang K., Zhu H., Zhang X., Yan W., Xu N. et al. Melon *short internode* (*CmSi*) encodes an ERECTA-like receptor kinase regulating stem elongation through auxin signaling. *Horticulture Research*. 2020;7(1):202. DOI: 10.1038/s41438-020-00426-6

Zhang G., Ren Y., Sun H., Guo S., Zhang F., Zhang J. et al. A high-density genetic map for anchoring genome sequences and identifying QTLs associated with dwarf vine in pumpkin (*Cucurbita maxima* Duch.). *BMC Genomics*. 2015;16:1101. DOI: 10.1186/s12864-015-2312-8

Zhang M., Song M., Cheng F., Yang Z., Davoudi M., Chen J. et al. Identification of a putative candidate gene encoding 7-dehydrocholesterol reductase involved in brassinosteroids biosynthesis for compact plant architecture in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Theoretical and Applied*

Genetics. 2021;134(7):2023-2034. DOI: 10.1007/s00122-021-03802-5

Zhang M., Song M., Davoudi M., Cheng F., Yin J., Zha G. et al. The mutation of C-24 reductase, a key enzyme involved in brassinolide biosynthesis, confers a novel compact plant architecture phenotype to cucumber. *Theoretical and Applied Genetics*. 2022;135(8):2711-2723. DOI: 10.1007/s00122-022-04144-6

Zhang T., Liu J., Amanullah S., Ding Z., Cui H., Luan F. et al. Fine mapping of *Cla015407* controlling plant height in watermelon. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 2021;146(3):196-205. DOI: 10.21273/JASHS04934-20

Zhang X., Hou X., Liu Y., Zheng L., Yi Q., Zhang H. et al. Maize *brachytic2* (*br2*) suppresses the elongation of lower internodes for excessive auxin accumulation in the intercalary meristem region. *BMC Plant Biology*. 2019;19(1):589. DOI: 10.1186/s12870-019-2200-5

Zhao L., Yang X., Du H.L., Li M.M., Ding F.Q., Lv Q.X. et al. Reduced GA biosynthesis in *GmRAV*-transgenic tobacco causes the dwarf phenotype. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2016;63(5):690-694. DOI: 10.1134/S1021443716050198

Zhu H., Zhang M., Sun S., Yang S., Li J., Li H. et al. A single nucleotide deletion in an ABC transporter gene leads to a dwarf phenotype in watermelon. *Frontiers in Plant Science*. 2019;10:1399. DOI: 10.3389/fpls.2019.01399

Информация об авторах

Анастасия Вадимовна Иноземцева, 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.inozemtseva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0005-8881-8791

Анна Генриховна Елацкова, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Кубанская опытная станция – филиал ВИР, 352183 Россия, Краснодарский край, п. Ботаника, ул. Центральная, 2, elatskova.a@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9735-8700

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», Университет «Сириус», Научный центр генетики и наук о жизни, 354340 Россия, Краснодарский край, Сочи, федеральная территория «Сириус», пгт. Сириус, Олимпийский пр., 1, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

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

Information about the authors

Anastasiia V. Inozemtseva, Postgraduate Student, Associate Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, a.inozemtseva@vir.nw.ru, https://orcid.org/0009-0005-8881-8791

Anna G. Elatskova, Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Kuban Experiment Station of VIR, 2 Tsentralnaya St., Krasnodar 352183, Russia, elatskova.a@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0001-9735-8700

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 Settlem., Sirius Federal Territory, Sochi, Krasnodar Territory 354340, Russia, director@vir.nw.ru, https://orcid.org/0000-0002-8470-8254

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

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 29.10.2023; одобрена после рецензирования 30.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.
The article was submitted on 29.10.2023; approved after reviewing on 30.11.2023; accepted for publication on 05.12.2023.

ИСТОРИЯ АГРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИР. СЛАВНЫЕ ИМЕНА

CC BY

УДК 57:58:633/635:631.52(066)
DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-251-261

Приложения к «*Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции*»: к 115-летию со дня основания журнала

«*Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*» – старейший российский специализированный журнал, издающийся с приложениями в Санкт-Петербурге с начала XX века и до сегодняшнего дня. В 2023 году журналу исполнилось 115 лет со дня основания. Журнал «*Труды Бюро по прикладной ботанике*» основан русским ботаником, заложившим в России основы прикладной ботаники, заведующим Бюро по прикладной ботанике Робертом Регелем в 1908 году. Журнал по праву занимал главенствующее место среди российских периодических изданий, стал центральным органом по прикладной ботанике и селекции в России. В межвоенный период Советской России и СССР (1917–1940) журнал возглавлял всемирно известный русский ученый, признанный авторитет в области генетики, селекции, растениеводства, иммунитета растений, общественный и государственный деятель академик Н. И. Вавилов.

С 1908 года при «*Трудах…*» издаются в виде особых приложений общедоступные оригинальные или переводные работы, излагающие современное положение (на момент публикации) познаний по различным отделам прикладной ботаники и селекции.

Приложения издавались в период с 1908 по 1937 год, единственным исключением в послевоенный советский период является издание методического сборника «Методы комплексного изучения фотосинтеза» в 1969 году в виде особого приложения к тому 40. В формате приложений к известному журналу, помещающему на своих страницах оригинальные работы, результаты исследований по отдельным культурам, сводки и обзоры в области прикладной ботаники, селекции и генетики, крупные работы общего характера русских и иностранных авторов были замечены отечественным читателем значительно быстрее.

Академик Н. И. Вавилов, возглавлявший редакционный комитет, обязывал всех без исключения сотрудников публиковаться вначале в «*Трудах…*», а затем уже в других изданиях. Таким образом, в период с 1908 по 1937 год книжные издания выходили в свет в виде приложений к «*Трудам Бюро по прикладной ботанике*» (1908–1917), «*Трудам по прикладной ботанике и селекции*» (1918–1927), «*Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции*» (1927–1931), «*Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции*». Сер. (1932–1937).

Приложения 1–21 изданы под редакцией Р. Э. Регеля, начиная с приложения 22-го – под редакцией Н. И. Вавилова. В соответствии с зафиксированной на приложениях продолжающейся нумерацией в свет должно было выйти 84 приложения, плюс приложение к тому 40, но по факту не все заявленные приложения были изданы.

Главная задача, которую поставила перед собой редакция журнала «*Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*» в связи с 115-летием со дня основания, – представить научному сообществу полный список приложений к журналу с целью ознакомления читателей с книгами, вышедшими в виде приложений в период 1908–1937 гг., предоставить возможность увидеть, как изменилась тематика актуальных исследований в области ботаники, селекции и генетики растений за столетие, призвать к чтению первоисточников, перелистывая сегодня старые страницы вировского журнала «*Труды…*».

Список составлен сотрудниками библиотечно-издательского отдела ВИР: И. В. Котелкиной, д-ром биол. наук Е. А. Соколовой, А. Г. Крыловым.

Для цитирования: Приложения к «*Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции*»: к 115-летию со дня основания журнала. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(4):251-261. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-251-261

HISTORY OF AGROBIOLOGICAL RESEARCH AND VIR. NAMES OF RENOWN

DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-251-261

Supplements to the *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*: dedicated to the 115th anniversary of the journal

Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding is the oldest specialized journal in Russia. It has been published in St. Petersburg with supplements since the early 20th century up to the present day. In 2023, the journal celebrated its 115th anniversary. The journal *Bulletin of Applied Botany* was founded in 1908 by Robert Regel, Head of the Bureau of Applied Botany, the Russian botanist who laid the foundations of applied botany in Russia. The journal rightfully occupied a leading place among Russian scientific periodicals and acquired the core authority in applied botany and breeding within Russia. During the interwar period of Soviet Russia and the USSR (1917–1940), the journal was headed by the world-famous Russian scientist Academician Nikolay Vavilov, a public figure and official, a recognized expert in the field of plant genetics, breeding, cultivation, and immunology.

Since 1908, publicly available original or translated articles recounting the current (at the time of publication) state of knowledge in various sectors of applied botany and plant breeding have been published in the form of supplements to the *Proceedings*.

Supplements were published from 1908 through 1937. The only exception in the postwar Soviet period was the publication of the collection of guidelines entitled *Methods for the Comprehensive Study of Photosynthesis* in 1969, formatted as a special supplement to volume 40. Fundamental publications by Russian and foreign authors were noticed by domestic readers much faster when they appeared as supplements to a well-known journal that contained original articles, research results on individual crops, summaries and reviews in the field of applied botany, plant breeding and genetics.

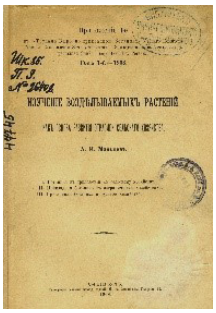
Academician Nikolay Vavilov, who headed the editorial committee, impelled all of his staff members, without exception, to publish their research findings first in the *Proceedings*, and only after that in other editions.

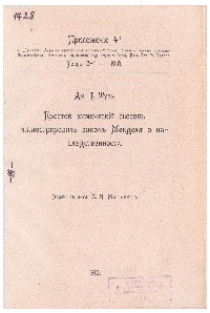
Supplements 1–21 were published under the editorship of Robert Regel, and beginning from supplement 22 under the editorship of Nikolay Vavilov. Following the consecutive numbering on the supplements, 84 supplements should have been published, plus an additional one to volume 40, but *de facto* not all of the announced supplements appeared in print.

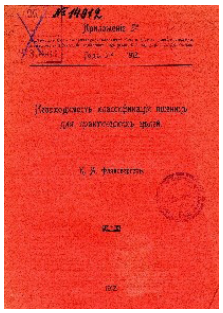
The mission undertaken by the Editorial Board of the *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding* for the journal's 115th anniversary was to present a complete list of supplements to the journal in order to familiarize the scientific community and other readers with the books published as supplements in 1908–1937. It is seen as a good opportunity to trace how the prioritized research topics in the fields of botany, plant breeding and genetics changed over a century and to encourage readers to get acquainted with the primary sources, browsing through the old pages of VIR's journal.

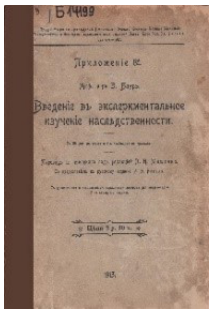
The list was compiled by the staff members of VIR's Library and Publishing Department: Irina V. Kotelkina, Elena A. Sokolova (Dr. of Biol. Sci.), and Anton G. Krylov.

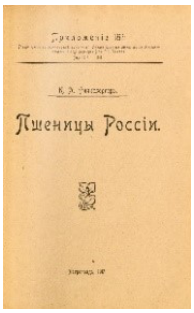
For citation: Supplements to the *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*: dedicated to the 115th anniversary of the journal. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(4):251-261. DOI: 10.30901/2227-8834-2023-4-251-261

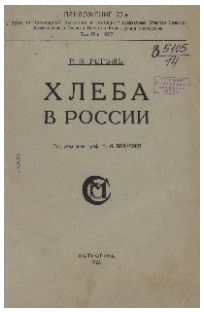

Приложение 1-е


Приложение 4-е

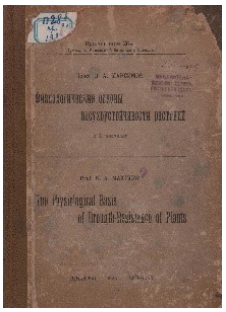

Приложение 5-е

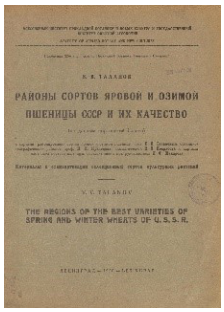

Приложение 8-е

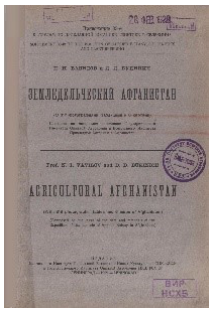

Приложение 18-е

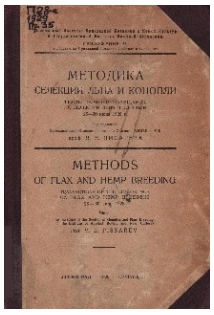

Приложение 22-е

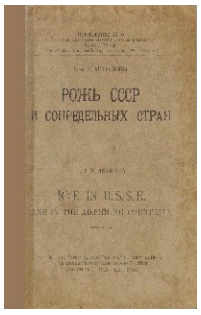

Приложение 23-е

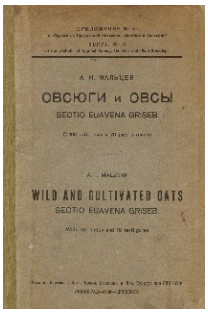

Приложение 26-е

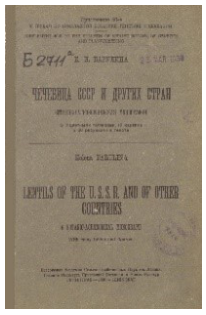

Приложение 32-е

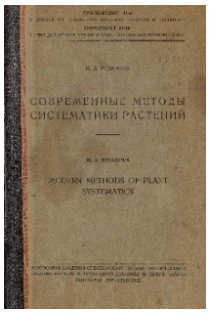

Приложение 33-е

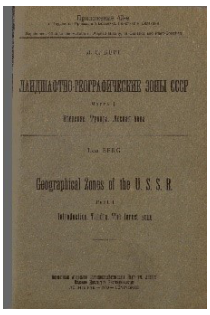

Приложение 35-е

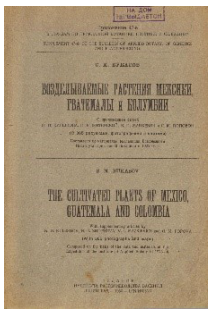

Приложение 36-е

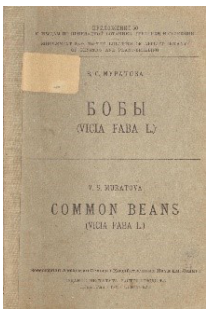

Приложение 38-е

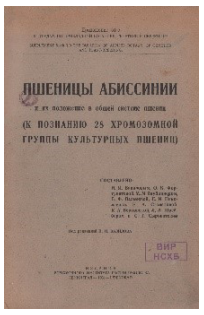

Приложение 40-е

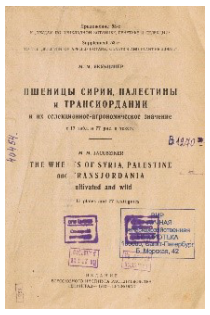

Приложение 41-е

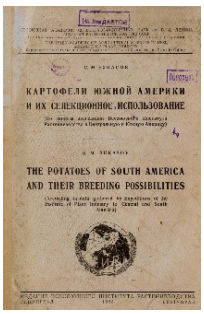

Приложение 42-е

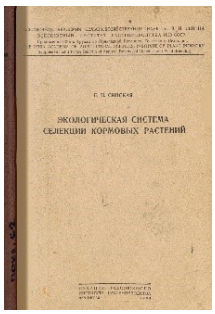

Приложение 47-е

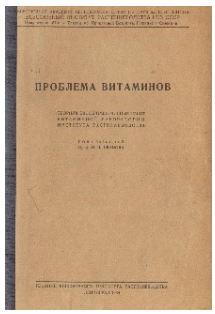

Приложение 50-е

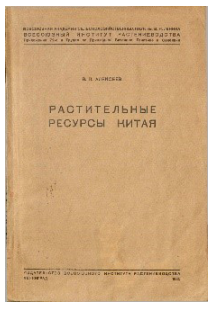

Приложение 51-е


Приложение 53-е


Приложение 58-е


Приложение 62-е


Приложение 67-е


Приложение 72-е

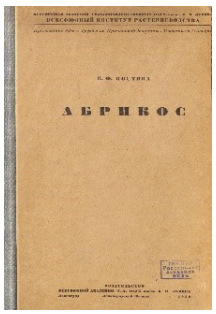

Приложение 83-е

Рисунок. Приложения к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»
Figure. Supplements to the *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*

ПРИЛОЖЕНИЯ
к «Трудам Бюро по прикладной ботанике»

Приложение 1-е

Мальцев, А. И. Изучение возделываемых растений, как основа развития отраслей сельского хозяйства / А. И. Мальцев. – Санкт-Петербург : Тип. редакции периодических изданий Министерства финансов, 1908. – 78 с. – (Прил. 1-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 1, № 5/6).

Приложение 2-е

Мальцев, А. И. Пивоваренные ячмени в России и настоящее положение их в хозяйстве и в отпускной торговле / А. И. Мальцев. – Санкт-Петербург ; Юрьев : Тип. К. Маттисена, 1910. – 79, [1] с. + [1] отд. л. рис., [1] отд. л. схем., [1] отд. л. табл. – (Прил. 2-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 3, № 1).

Приложение 3-е

Скалозубов, Н. Как выводятся новые сорта культурных растений : происхождение форм растений, как основа практики семеноводства / Н. Скалозубов. – [Санкт-Петербург] ; Юрьев : Тип. К. Маттисена, 1910. – 41 с. : 35 рис., портр., черт. – (Прил. 3-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 3, № 7).

Приложение 4-е

Шуль, Дж. Г. Простой химический способ иллюстрировать закон Менделя о наследственности : [перевод с английского] / Дж. Г. Шуль ; перевод с английского А. И. Мальцева. – Санкт-Петербург, 1910. – 12 с. : 1 рис. – (Прил. 4-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 3, № 11). – Перевод ст.: A simple chemical device to illustrate Mendelian inheritance / G. H. Schull // Plant world. 1909. Vol. 12, No 7.

Приложение 5-е

Фляксбергер, К. А. Необходимость классификации пшениц для практических целей : [читано на Областном съезде по селекции и семеноводству (Санкт-Петербург, 26 января 1912 г.)] / К. А. Фляксбергер. – Санкт-Петербург ; Юрьев : Тип. К. Маттисена, 1912. – 16 с. : табл. – (Прил. 5-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 5, № 2).

Приложение 6-е

Петунников, А. Н. Свод ботанических терминов, встречающихся в русской ботанической литературе / сост. А. Петунников. – Изд. 2-е, перепеч. с 1-го изд. IX съезда русских естествоиспытателей и врачей. – Санкт-Петербург ; Юрьев : Тип. К. Маттисена, 1912. – XI, 161 с. – (Прил. 6-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 5, № 5–9).

Приложение 7-е

Мальцев, А. И. Как собирать и составлять коллекции сорных семян / А. И. Мальцев. – Санкт-Петербург ; Юрьев : Тип. К. Маттисена, 1912. – 18, [1] с. : рис. – (Прил. 7-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 5, № 10).

Мальцев, А. И. Как собирать и составлять коллекции сорных семян : руководство к правильному сбору, составлению коллекций и испытанию семян сорных растений, со списком их для Европейской России / А. И. Мальцев. – 2-е изд., испр. и доп. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1917. – 72 с. : 22 рис. – (Прил. 7-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 9, № 11).

Приложение 8-е

Баур, Э. Введение в экспериментальное изучение наследственности = Einführung in die experimentelle Vererbungslehre : [перевод с немецкого] / Эрвин Баур ; перевод с немецкого под редакцией П. И. Мищенко ; предисловие к русскому изданию Р. Э. Регеля ; с дополнениями и исправлениями, сделанными автором для предстоящего 2-го немецкого издания. – [Санкт-Петербург ; Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1913. – V, 342 с. : [80] рис., табл., диагр., граф. + [9] л. табл. в красках. – (Прил. 8-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 6, № 1–10). – Перевод изд.: Einführung in die experimentelle Vererbungslehre / E. Baur.

Приложение 9-е

Фрувирт, К. Селекция кукурузы, кормовой свеклы и других корнеплодов, масличных растений и кормовых злаков : [перевод с немецкого] / К. Фрувирт ; перевод с немецкого Ф. А. Сацыперова ; [исключительное право перевода на русский язык приобретено ГУЗиЗ от издателя, фирмы Парей в Берлине, от которой выписаны также гальванопластические оттиски всех оригинальных клише к входящим в издание рисункам]. – Санкт-Петербург., 1914. – IX, 270 с. : 39 рис., табл. – (Прил. 9-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 7, № 1–6). – Перевод изд.: Die Züchtung der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen : [в 5 т.]. Bd. 2 / C. Fruwirth. 2nd ed., revised again.

Приложение 10-е

Зебер, М. Современные методы исследования крови в связи с учением об эволюции организмов : экспериментальные доказательства теории эволюции организмов : [перевод с немецкого] / Макс Зебер ; перевод с немецкого: Ф. Штробиндер, Э. Штробиндер ; с многочисленными добавлениями автора к немецкому изданию 1909 г. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1914. – 63, [1] с. – (Прил. 10-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 7, № 7–8). – Перевод изд.: Moderne Blutforschung und Abstammungslehre : experimentelle Beweise der Descendenztheorie / Max Seber. Frankfurt am Main, 1909.

Приложение 11-е

Фрувирт, К. Селекция картофеля, земляной груши, льна, конопли, табака, хмеля, гречихи и бобовых растений : [перевод с немецкого] / К. Фрувирт ; перевод с немецкого Ф. А. Сацыперова. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1914. – 282 с. : 35 рис., фот., табл. – (Прил. 11-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 7, № 9–12). – Перевод изд.: Die Züchtung der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen : [в 5 т.]. Bd. 3 / C. Fruwirth. 2nd ed., revised again.

Приложение 12-е

Зибен, Г. Введение в ботаническую микротехнику : [перевод с немецкого] / Губерт Зибен ; перевод с немецкого Н. П. Мельникова ; под редакцией и с предисловием к русскому изданию Б. Б. Гриневецкого ; предисловие 1. H. Fitting ; предисловие 2. Hubert Sieben – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1915. – 77, [2] с. : табл., рис., черт. – (Прил. 12-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 8, № 1/2). – Библиогр.: с. 69–74. – Указ.: с. 75–77. – Перевод изд.: Einführung in die botanische Mikrotechnik / H. Sieben. Jena, 1913.

Приложение 13-е

Фрувирт, К. Селекция колониальных растений, т. е. сахарного тростника, риса, просовых, кофейного дерева, какао, померанцевых, хлопчатника и других волокнистых растений, сладкого картофеля, маниока, земляного ореха, масличной пальмы, маслины и кунжута : [перевод с немецкого] / К. Фрувирт ; составлено в сотрудничестве с : В. Буссе, И. С. Крамером, А. Говардом, Ф. Гунгером, Г. Ликом, И. Э. фан дер Стоком, Трабю, Вебберотм, де-Вильдеманом ; перевод с немецкого Ф. А. Сацыперова. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1915. – 198 с. : 32 рис., фот. – (Прил. 13-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 8, № 3–6, 8, 9). – Перевод изд.: Die Züchtung der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen : [в 5 т.]. Bd. 5 / C. Fruwirth.

Приложение 14-е

Мальцев, А. И. Как распространяются сорные растения при помощи плодов и семян / А. И. Мальцев ; [рис.: М. Лобановой, П. Веселова]. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1915. – 34, [l] с. : рис. + [4] отд. л. рис. – (Прил. 14-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 8, № 7).

Приложение 15-е

Мищенко, П. И. Шкала цветов : пособие для ботаников и зоологов при научных и научно-прикладных работах / П. И. Мищенко ; предисловие П. Мищенко. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1915. – 14 с. + [2] цв. табл. – (Прил. 15-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 9, № 1). – Извлеч. из кн.: Chromotaxia seu nomenclator colorum polyglotus additis speciminibus coloratis ad usum botanicorum et zoologorum / P. A. Saccardo.

Приложение 16-е

Дильс, А. Ботаническая география : [перевод с немецкого] / А. Дильс ; перевод с немецкого под редакцией П. И. Мищенко. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1916. – 138 с. : рис., табл. – (Прил. 16-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 9, № 4–6, 8, 10). – Перевод изд.: Pflanzengeographie / A. Diels. 1908.

Приложение 17-е

Сацыперов, Ф. А. Лекарственные растения в России : [труд представлен Бюро в состоящую при Императорской Академии наук Комиссию по изучению естественных производительных сил России] / Ф. А. Сацыперов. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1917. – 110 с. – (Прил. 17-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 10, № 2–5).

Приложение 18-е

Фляксбергер, К. А. Пшеницы России : [труд представлен Бюро в состоящую при Академии наук Комиссию по изучению естественных производительных сил России] / К. А. Фляксбергер. – Петроград ; [Юрьев : Тип. К. Маттисена], 1917. – 56 с. – (Прил. 18-е к «Трудам Бюро по прикладной ботанике» ; т. 10, № 6, 7/10).

ПРИЛОЖЕНИЯ
к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»

19-е приложение к «Трудам» не было издано.

Составители владеют минимальными данными о данном издании: Основные принципы селекции : [Рукопись] / Р. Э. Регель. – Петроград, [1918?]. – (Прил. 19-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»).

Приложение 20-е

Буллер, Р. Пшеница в Канаде = [Wheat in Canada] : (Открытие и распространение пшеницы «Маркиз» ; История возделывания пшеницы в Канаде) : [сокращенный перевод с английского с разрешения автора] / Реджинальд Буллер ; перевод под редакцией и с предисловием Н. И. Вавилова ; [сокращенный перевод с английского Е. Н. Вавиловой-Сахаровой]. – Петроград : Новая деревня, 1923. – 104 с. : табл., рис. + [1] отд. л. портр. [Ч. Е. Саундерса]. – ([Прил. 20-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»]). – Перевод изд.: Essays on Wheat : Including the Discovery and Introduction of Marquis Wheat, the Early History of Wheat-Growing in Manitoba, Wheat in Western Canada, the Origin of Red Bobs and Kitchener, and the Wild Wheat of Palestine / A. H. Reginald Buller. New York : Macmillan Company, 1919. – Из содерж: (От редакции: [«… Нам казался весьма уместным и целесообразным перевод в сжатом виде книги профессора Буллера, дающей описание лучших канадских сортов, приемов их выведения и в целом дающей обстоятельную картину эволюции поле-

водства в Канаде за последние 10 лет. <…> Перевод сделан, с разрешения автора, Е. Н. Вавиловой-Сахаровой, при чем выпущена V-ая глава о происхождении пшеницы, большинство рисунков и сокращен текст, имеющий меньше интереса для русского читателя»] / Редактор [Н. И. Вавилов]. – С. V–VII).

Приложение 21-е

Нильсон, Г. Селекция растений в Швеции = [Plant breeding in Sweden] / Гіальмар Нильсон ; под редакцией В. В. Таланова ; перевод В. Талановой. – Петроград : Военная тип., 1918. – 18 с. : портр. + [4] отд. л. рис. – (Прил. 21-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции» ; т. 11, № 5/6). – Перевод ст.: Plant-breeding in Sweden / H. Hjalmar Nilsson // The Journal of Heredity. 1914. Vol. 5. P. 281–296, [с некоторыми дополнениями по французскому изданию : L'Institut suédois de Svalöf pour l'amélioration des plantes de grande culture / N. Hjalmar Nilsson. 1913].

Приложение 22-е

Регель, Р. Э. Хлеба в России = [Cereals of Russia] / Р. Э. Регель ; [с разрешения Комиссии по изучению естественных производительных сил России при РАН] ; под редакцией Н. И. Вавилова. – Петроград : Военная тип. Штаба Р.К.К.А., 1922. – 55, [1] с. : граф., диагр. – (Прил. 22-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции» ; т. 13).

Приложение 23-е

Вавилов, Н. И. Полевые культуры юго-востока = Field crops of South-Eastern European Russia / Н. И. Вавилов. – Петроград : Новая деревня, 1922. – 228, IV с. : [9] табл., [6] рис., [15] карт. – (Прил. 23-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции» ; т. 13).

Приложение 24-е

Чинго-Чингас, К. М. Пшеницы Юго-Востока России в мукомольном и хлебопекарном отношении = The wheats of South-Eastern Russia in Europe from the point of view of milling and baking : [из лаборатории кафедры частного земледелия и селекции Саратовского университета] / К. М. Чинго-Чингас. – Петроград : Новая деревня, 1922. – 55 с. + [1] отд. л. рис. – (Прил. 24-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции» ; т. 13).

Приложение 25-е

Мальцев, А. И. Руководство по изучению и определению семян и плодов сорных растений. Ч. 1. Морфология-биология = Manual of weed seeds / А. И. Мальцев. – Ленинград : Тип. им. Гуттенберга, 1925. – 141, [3] с. : 52 рис. (170 фиг.), табл. – (Прил. 25-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»).

Приложение 26-е

Максимов, Н. А. Физиологические основы засухоустойчивости растений = The physiological basis of drought-resistance of plants / Н. А. Максимов. – Ленинград : Тип. «Коминтерн», 1926. – 436 с. : 61 рис., фот., табл., граф. – (Прил. 26-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»).

Приложение 27-е

Кичунов, Н. И. Очерк современного положения промышленного плодоводства в С. Америке [Северной Америке] = The present state of commercial horticulture in North Amerika / Н. И. Кичунов. – Ленинград : Коминтерн, 1925. – 164 с. : портр. – (Прил. 27-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»).

Приложение 28-е

Макаров, И. Ф. Карта земледелия СССР = The agricultural map of USSR / И. Ф. Макаров ; под общей редакцией и с предисловием Н. И. Вавилова. – Ленинград : ВИПБиНК, 1926 (Ленинград : Рос. гос. акад. тип.). – 90, [l] с. : 18 карт., [11] табл. + [1] отд. л. карт. – (Прил. 28-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»).

Приложение 29-е

Таланов, В. В. Сорта яровой пшеницы по данным сети государственного испытания НКЗ РСФСР за 1924 и 1925 гг. = The best varieties of the spring wheats. Вып. 1 / В. В. Таланов ; ВИПБиНК, ГИОА, отд. испытания и введения новых сортов. – Ленинград : ВИПБиНК ; ГИОА, 1926 (Ленинград : Тип. «Коминтерн»). – VIII, 231 с. : рис., фот., табл. + [1] отд. л. картогр., [44] табл. на отд. л., [33] фот., рис. на отд. л. – (Прил. 29-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»).

ПРИЛОЖЕНИЯ
к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»

Приложение 30-е

Батыренко, В. Г. Сорта яровой пшеницы = The varieties of spring wheat : сводный отчет за 1923–1926 гг. Украинской сети по изучению сортов культурных растений при Всеукраинском обществе семеноводства / В. Г. Батыренко, В. А. Зосимов. – Харьков : Харківська школа друкарського діла ім. А. Багинського, 1927. – 184 с. : табл., [7] рис., [2] картогр. + [2] отд. л. карт., [4] отд. л. табл. – (Прил. 30-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 31-е

Батыренко, В. Г. Сорта картофеля = The varieties of potato : сводный отчет за 1925 и 1926 гг. Украинской сети по изучению сортов культурных растений при Всеукраинском обществе семеноводства / В. Г. Батыренко, А. Д. Беликов. –

Харьков : Червоний друк, 1927. – 119 с. : табл., 1 карт. + [2] отд. л. табл. – (Прил. 31-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 32-е

Таланов, В. В. Районы сортов яровой и озимой пшеницы СССР и их качество = The regions of the best varieties of spring and winter wheats of USSR : (по данным сортосетей Союза), с картами : районирования сортов яровой и озимой пшеницы, сост. В. В. Талановым, ботанико-географических районов проф. Н. И. Кузнецова, климатической П. И. Некрасова и картами плотности посевов пшеницы, сост. под руководством И. Ф. Макарова : материалы к стандартизации селекционных сортов культурных растений / В. В. Таланов ; [составитель очерка [гл. II] В. Е. Писарев. – Ленинград : Тип. «Коминтерн» Центриздата народов СССР, 1928. – 144, [1], II с. : табл., рис., фот. + [6] отд. л. карт. – (Прил. 32-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 33-е

Вавилов, Н. И. Земледельческий Афганистан : составлен по материалам экспедиции Государственного института опытной агрономии и Всесоюзного института прикладной ботаники в Афганистан = Agricultural Afghanistan : (composed on the basis of the data and materials of the expedition of the Institute of applied botany to Afghanistan) : [Леониду Николаевичу Старку (полномочный представитель СССР в Афганистане) посвящают этот труд авторы] / Н. И. Вавилов, Д. Д. Букинич ; [под общей редакцией Н. И. Вавилова]. – Ленинград : ВИПБиНК ; ГИОА, 1929 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – [3], 610, XXXII с. : 318 фот., рис., табл., карт., черт. + [6] отд. л. карт, [28] отд. л. рис., [1] отд. склад. л. карт. – (Прил. 33-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 34-е

Гибель озимых хлебов и мероприятия по ее предупреждению = The perishing of winter cereals and preventive measures : (1. Труды Всесоюзного совещания по вопросу о гибели озимых хлебов в 1927/28 г. в г. Харькове ; 2. Гибель озимых хлебов в различных районах СССР в 1927/28 г. по данным анкеты Всесоюзного института прикладной ботаники и новых культур) / под редакцией Н. Н. Кулешова. – Ленинград : ВИПБиНК ; ГИОА, 1929 (Ленинград : Тип. им. Бухарина). – 409, [3] с. : табл., черт., фот. + [4] отд. л. карт. : [2] карт. – (Прил. 34-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 35-е

Методика селекции льна и конопли : труды первого совещания по селекции льна и конопли ([Москва], 26–30 июня 1928 г.) = Methods of flax and hemp breeding : transactions of the conference on flax and hemp breeders ([Moscow], 26–30 june 1928) / под редакцией В. Е. Писарева. – Ленинград : Печатня, 1929. – 524, [7] с. : рис., фот., схем., табл. + [1] отд. л. фот., [2] отд. л. карт. – (Прил. 35-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 36-е

Антропов, В. Рожь СССР и сопредельных стран = Rye in USSR and in the adjoining countries / В. и В. Антроповы ; [авторы отдельных глав: М. И. Княгиничев, Ф. Н. Прокофьев, С. М. Мартынов]. – Ленинград : ВИПБиНК ; ГИОА, 1929 (Ленинград : Тип. «Коминтерн»). – 365, [1] с. : табл., рис., карт., схем., фот. + [1] отд. л. карт. – (Прил. 36-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 37-е

Кулешов, Н. Н. Итоги работы по семенному контролю в Харькове в 1918–1926 г. = The results of the seed testing work in Kharkov during the years 1918–1926 : (по материалам Центральной семенной станции УССР) / Н. Н. Кулешов ; при участии: Н. Л. Векслерчик, А. М. Егоровой, Н. И. Крыловой, Б. Я. Стахевича, М. С. Хорошковой, Н. А. Щегловой. – Ленинград : ВИПБиНК ; ГИОА, 1929 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 195, [7] с. : табл., рис., фот. – (Прил. 37-е к «Трудам по прикладной ботанике и селекции»).

Приложение 38-е

Мальцев, А. И. Овсюги и овсы. Sectio *Euavena* Griseb. = Wild and cultivated oats Sectio *Euavena* Griseb. / А. И. Мальцев. – Ленинград : ВИПБиНК, 1930 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – [III], 522 с. : фот., схем., 70 рис., табл. + [3] отд. л. карт., [100] отд. л. табл. рис. – (Прил. 38-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 39-е

Распределение посевов пшениц по СССР = Distribution of wheat cultivation in USSR / ответственный редактор К. А. Флаксбергер ; составители: И. Ф. Макаров, А. А. Добронравов, Н. З. Голубцов, М. А. Киселева, З. И. Гусева, Н. П. Курицын ; карты составлены А. Я. Орубой ; карты вычерчены А. Я. Барсковым. – Ленинград : Институт растениеводства, 1931 (Ленинград : Тип. «Коминтерн»). XXXII, 111, [1] с. : табл., карт. + [30] отд. л. карт. – (Прил. 39-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 40-е

Барулина, Е. И. Чечевица СССР и других стран : ботанико-агрономическая монография = Lentils of the USSR and of other countries : a botanic-agronomical monograph / Е. И. Барулина ; составитель гл. 15 «Анатомия чечевицы» О. М. Введенская. – Ленинград : ИПБиНК, 1930 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 319 с. : 86 рис., 16 карт., табл., фот. + [3] отд. л. цв. табл. – (Прил. 40-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 41-е

Розанова, М. А. Современные методы систематики растений = Modern methods of plant systematics / М. А. Розанова ; [ответственные редакторы: Е. В. Вульф, Г. А. Левитский]. – Ленинград : ИПБиНК, 1930 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – 184 с. : рис., табл., схем., карт. – (Прил. 41-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 42-е

Берг, Л. С. Ландшафтно-географические зоны СССР. Ч. I. Введение. Тундра. Лесная зона = Geographical zones of the USSR. Part I. Introduction. Tundra. The forest zone / Л. С. Берг. – Ленинград : Институт растениеводства, 1930 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 401 с. : рис., карт., табл.. фот. + [8] отд. л. карт. – (Прил. 42-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 43-е

Пашкевич, В. В. Сорта плодовых деревьев Волыни = The varieties of fruit trees of Volhynia / В. В. Пашкевич ; [ответственный редактор Ю. Н. Воронов]. – Ленинград : Институт растениеводства, 1930 (Ленинград : Тип. АН СССР). – 215, [1] с. : рис., фот. – (Прил. 43-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 44-е

Авдулов, Н. П. Карио-систематическое исследование семейства злаков = Karyo-systematische Untersuchung der Familie *Gramineen* / Н. П. Авдулов. – Ленинград : Институт растениеводства, 1931 (Ленинград : Тип. «Коминтерн»). – 428 с. : рис., табл., схем. – (Прил. 44-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 45-е

Петропавловский, М. Ф. Возделываемые овсы СССР = Cultivated oats of USSR / М. Ф. Петропавловский. – Ленинград : Институт растениеводства, 1931 (Ленинград : Гос. тип. им. Ивана Федорова). – 138, [1] с. : [58] рис., табл., диагр., карт. – (Прил. 45-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 46-е

Чинго-Чингас, К. М. Мукомольные и хлебопекарные особенности сортов пшениц СССР = Milling and baking properties of the wheats varieties in USSR / К. М. Чинго-Чингас ; предисловие Н. И. Вавилова ; ответственный редактор К. А. Фляксбергер. – Ленинград : ИПБиНК, 1930 [1931] (Ленинград : Гос. тип. им. Е. Соколовой). – 455, [3] с. : табл., рис., черт., схем., план., фот. + [1] отд. л. карт., [1] отд. л. цв. рис. – (Прил. 46-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 47-е

Букасов, С. М. Возделываемые растения Мексики, Гватемалы и Колумбии : с приложением статей Н. Н. Кулешова, Н. Е. Житеневой, В. И. Мацкевич и Г. М. Поповой : составлено по материалам экспедиции Всесоюзного института прикладной ботаники в 1925-6 гг. = The cultivated plants of Mexico, Guatemala and Colombia : with supplementary articles by N. N. Kuleshov, N. E. Zhiteneva, V. I. Mazkievicz, G. M. Popova : composed on the basis of the data and materials of the expedition of the Institute applied botany in 1925-6 / С. М. Букасов ; авторы статей: Н. Н. Кулешов, Н. Е. Житенева, В. И. Мацкевич, Г. М. Попова, [Ф. М. Мауер]. – Ленинград : Институт растениеводства, 1930 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 553, XXXVII, V с. : 307 рис., фот., карт., табл. + [8] отд. л. фот., [1] рис., [2] отд. л. цв. табл., [1] карт., [1] отд. л. табл. – (Прил. 47-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 48-е

Кулешов, Н. Н. Вопросы семеноводства люцерны и эспарцета = [Seed growing of alfalfa and sainfoin] : [доклады сделаны на 2-ой сессии секции кормовых трав НТС Семеноводсоюза, май 1929 г.] / Н. Н. Кулешов, А. И. Белов, В. М. Рабинович. – Ленинград : ВИР, 1931 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 79, [1] с. : рис., карт., табл. + [1] отд. л. рис. – (Прил. 48-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 49-е

Пашкевич, В. В. Бесплодие и степень урожайности в плодоводстве в зависимости от сорта опыляющего = Sterility and degree of productivity in fruitgrowing, in dependence on the pollinating variety / В. В. Пашкевич ; ответственный редактор М. А. Розанова. – Ленинград : Институт растениеводства, 1930 (Ленинград : Гос. тип. им. Е. Соколовой). – 204 с. : 11 рис., фот., табл., 6 черт. – (Прил. 49-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 50-е

Муратова, В. С. Бобы (*Vicia faba* L.) : [ботанико-агрономическая монография] = Common beans (*Vicia faba* L.) : [a botanikal-agronomical monograph] / В. С. Муратова ; ответственный редактор Е. В. Вульф. – Ленинград : Институт растениеводства, 1931 (Ленинград : Тип. АН СССР). – 298 с. : рис., фот., карт., табл. + [1] отд. л. карт., [3] отд. л. цв. табл. – (Прил. 50-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 51-е

Пшеницы Абиссинии и их положение в общей системе пшениц : (к познанию 28-хромозомной группы культурных пшениц) = The wheats of Abyssinia and their place in the general system of wheats : (a contribution to the knowledge of the 28 chromosomes group of cultivated wheats) / составлено: Н. И. Вавиловым, О. К. Фортунатовой, М. М. Якубцинером, Е. Ф. Пальмовой, Е. И. Николаенко, Е. А. Столетовой, К. А. Верховской, Л. Л. Шрейбером, С. Г. Сыроватским ; под редак-

цией Н. И. Вавилова. – Ленинград : ВИР, 1931 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 236 с. : рис., фот., табл., карт. – (Прил. 51-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 52-е

Вульф, Е. В. Введение в историческую географию растений = Introduction to the historical geography of plants : [посвящ. Эмме Францевне Вульф] / Е. В. Вульф ; [ответственный редактор А. Альбенский]. – Ленинград : Институт растениеводства, 1932 (Ленинград : 20-я тип. ОГИЗа им. Е. Соколовой). – 356 с. : 141 рис., табл., карт., портр. – (Прил. 52-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 53-е

Якубцинер, М. М. Пшеницы Сирии, Палестины и Трансиордании и их селекционное – агрономическое значение = The wheats of Syria, Palestine and Transjordania : cultivated and wild / М. М. Якубцинер ; ответственные редакторы: К. А. Фляксбергер, М. Г. Пруцкова. – Ленинград : ВИР, 1932 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – 276 с. : 17 табл., 77 рис., фот., карт. – (Прил. 53-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 54-е

Проблема безалкалоидного люпина = Problem of alkaloidless lupin : [сб. ст.] / под редакцией Н. Н. Иванова ; авторы: Н. И. Вавилов, Н. Н. Иванов, В. С. Федотов, Н. И. Шарапов, М. И. Смирнова, П. М. Жуковский. – Ленинград : Институт растениеводства, 1932 (Ленинград : 2-я тип. ОНТИ им. Е. Соколовой). – 63 с. : табл., рис. – (Прил. 54-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 55-е

Казарьян, Ш. Мукомольно-хлебопекарные особенности сортов ржи = Milling and baking properties of the varieties of rye / Ш. Казарьян ; ответственный редактор В. Е. Писарев. – Ленинград : Институт растениеводства, 1933 (Ленинград : 21 тип. им. И. Федорова). – 134, [1] с. : рис., табл., фот., черт. – (Прил. 55-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 56-е

Веселовская, М. А. Мак : его классификация и значение, как масличной культуры = The poppy : its classification and its importance as an oleiferous crop / М. А. Веселовская ; ответственный редактор Е. Н. Синская. – Ленинград : ВИР, 1933 (Ленинград : Картотип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА, Тип. им. Володарского). – [4], 213, [3], XXII, [2] с. : рис., фот., табл., карт. + [1] отд. л. табл., [3] отд. л. цв. табл. – (Прил. 56-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 58-е

Букасов, С. М. Картофели Южной Америки и их селекционное использование : (по данным экспедиций Всесоюзного института растениеводства в Центральную и Южную Америку : (по материалам экспедиций Всесоюзного института растениеводства в Центральную и Южную Америку в 1925–1928 гг., обработанным Институтом в 1928–1932 гг.) = The potatoes of South America and their breeding possibilities : (according to data gathered by expeditions of the Institute of plant industry to Central and South America) : (on the basis of the material collected by the Institute of plant industry, in 1925–1928, to Central and South America, and worked up in 1928–1932) / С. М. Букасов ; ответственный редактор Н. Ковалев. – Ленинград : ВИР, 1933 (Ленинград : ФЗУ им. КИМа, тип. «Коминтерн»). – 192 с. : табл., 55 рис. + [2] отд. л. табл., [2] отд. л. цв. рис., [2] отд. л. карт. – (Прил. 58-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 60-е

Малеев, В. П. Теоретические основы акклиматизации = Theoretical basis of acclimatization / В. П. Малеев ; ответственный редактор Е. В. Вульф. – Ленинград : ВИР, 1933 (Ленинград : Тип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 168 с. : табл. – (Прил. 60-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 61-е

Вехов, Н. К. Вегетативное размножение древесных растений летними черенками = Vegetative propagation of trees and shrubs by means of summer cuttings / Н. К. Вехов, М. П. Ильин ; ответственный редактор А. И. Лусс. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : 2-я тип. Изд-ва Леноблисполкома и Ленсовета). – 283, [1] с. : рис., табл. – (Прил. 61-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 62-е

Синская, Е. Н. Экологическая система селекции кормовых растений = Ecological system of breeding forage plants / Е. Н. Синская ; ответственные редакторы: Н. Вавилов, М. Гилев. – Ленинград : ВИР, 1933 (Ленинград : Тип. им. Бубнова). – 43, [1] с. : табл. – (Прил. 62-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 63-е

Монюшко, В. А. Рожковое дерево и возможности его культуры в СССР = The carob tree and the possibility of its cultivation in USSR (*Ceratonia siliqua* L.) : [авт. посвящ. памяти Юрия Николаевича Воронова] / В. А. Монюшко ; ответственный редактор Е. В. Вульф ; перевод резюме на французский язык Н. А. Обнорского. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Картотип. Гидрограф. Упр., Упр. ВМС РККА). – 128 с. : табл., карт., фот., рис. + [1] отд. л. карт. – (Прил. 63-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 64-е

Основы организации и методы селекции. Вып. 2. Плодово-ягодные культуры = Principles of the organization and methods of plant breeding. 2. Fruits and small fruits : [сборник] / редакторы: А. И. Лусс, Н. В. Ковалев. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. «Печатный труд»). – 79, [1] с. : табл., схем. – (Прил. 64-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 65-е

Казарьян, Ш. Ячмень в мукомольном и хлебопекарном отношении = Barley from the point of view of milling and baking / Ш. Казарьян ; ответственный редактор Н. И. Вавилов. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 62, [1] с. : рис., фот., табл., черт. – (Прил. 65-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 66-е

Основы организации и методы селекции. Вып. 1. Зерновые культуры = Principles of the organization and methods of plant breeding. 1. Grain crops : [сборник] / ответственный редактор И. А. Сизов. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 118, [2] с. : табл., схем. – (Прил. 66-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 67-е

Проблема витаминов : сб. экспериментальных работ витаминной лаборатории Института растениеводства = The problem of vitamins : experimental works of the vitamine laboratory of the Institute of plant industry / под редакцией Н. Н. Иванова. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – 257, [4] с. : табл., рис., диагр. + [1] отд. л. рис. – (Прил. 67-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 68-е

Троицкий, Н. А. Дикорастущие кормовые растения Закавказья = Wild growing forage plants of Transcaucasia / Н. А. Троицкий ; ответственный редактор Е. Н. Синская. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. «Смена»). – 54, [1] с. : табл. – (Прил. 68-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 69-е

Казарьян, Ш. Методика мукомольно-хлебопекарного испытания пшеницы = Methodics of milling and baking tests in wheat / Ш. Казарьян ; ответственный редактор К. А. Флякcбергер. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 56 с. : табл. – (Прил. 69-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 70-е

Казарьян, Ш. Пшеницы ССР Армении и их качества = The wheats of Armenia and their properties : (из работ мукомольно-хлебопекарной лаборатории ВИР) / Ш. Казарьян ; ответственный редактор К. А. Флякcбергер. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 79, [1] с. : табл. – (Прил. 70-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 71-е

Медведев, П. Ф. Крапивы СССР : видовой состав, распространение и использование = The nettles of USSR : specific diversity distribution and utilization / П. Ф. Медведев ; ответственный редактор А. И. Мальцев. – Ленинград : ВИР, 1934 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 66, [1] с. : табл. – (Прил. 71-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 72-е

Алексеев, В. П. Растительные ресурсы Китая : (плодовые, овощные, технические и декоративные растения) = Plant resources of China : (fruits, vegetables, industrial crops and ornamental plants) / В. П. Алексеев ; ответственный редактор Е. В. Вульф. – Ленинград : ВИР, 1935 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 107, [1] с. : табл. + [1] отд. л. табл., [3] отд. л. карт. – (Прил. 72-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 73-е

Синская, Е. Н. Видообразование у люцерны и других растений = On species formation in lucerne and in other plants / Е. Н. Синская ; ответственный редактор Н. И. Вавилов. – Ленинград ; Москва : ВАСХНИЛ, Ленингр. фил., 1935 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – 124, [1] с. : табл., рис., фот. – (Прил. 73-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 74-е

Основы организации и методы селекции. Вып. 3. Прядильные лубо-волокнистые культуры = Principles of the organization and methods of plant breeding. 3. Bast fiber plants : [сб.] / ответственный редактор И. А. Сизов ; [сборник составлен работниками: Всесоюзного института растениеводства (ВИР), Всесоюзного института льна (ВНИИЛ), Всесоюзного института конопли (ВНИКО)]. – Ленинград ; Москва : ВАСХНИЛ, Ленингр. отд-ние, 1935 (Ленинград : Тип. «Сев. печатник» УМП Севкрая). – 111, [1] с. : табл., фот., рис., схем., граф. + [1] отд. л. схем. – (Прил. 74-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 75-е

Селекция и семеноводство кормовых культур : итоги работ Всесоюзного совещания по селекции и семеноводству кормовых растений, 15-24 января 1935 г. при Всесоюзном институте растениеводства : [сборник докладов] / ответственный редактор М. И. Гилев ; под редакцией: Е. Н. Синской, М. И. Гилева, В. В. Суворова ; вступительное слово Н. И. Вавилова. – Ленинград ; Москва : ВАСХНИЛ, 1935 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – 116 с. : табл., схем. – (Прил. 75-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 76-е

Сизов, И. А. Конопля СССР = Hemp in the USSR / И. А. Сизов ; ответственный редактор А. Б. Александров. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1936 (Ленинград : Тип. «Промполиграф»). – 75, [1] с. : табл., рис., фот., схем., граф. – (Прил. 76-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 77-е

Воронцов, В. Е. Культура и переработка розовой герани в СССР = Pink geranium cultivation and the manufacture of geranium oil in the USSR / В. Е. Воронцов ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный институт растениеводства, Батумский субтропический ботанический сад ; ответственный редактор Г. Н. Шлыков. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1936 (Ленинград : 21-я тип. ОГИЗа им. И. Федорова). – 124, [2] с. : табл., рис., фот., граф. – (Прил. 77-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 78-е

Рубцов, Г. А. Научные основы селекции плодовых деревьев = Scientific basis of fruit tree breeding / Г. А. Рубцов ; ответственный редактор М. А. Розанова. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1936 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 124, [2] с. : табл., рис. – (Прил. 78-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 79-е

Матюк, И. С. Лиственница и ее значение в народном хозяйстве СССР / И. С. Матюк ; ответственный редактор А. Б. Александров. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1936 (Ленинград : Типо-литогр. им. т. Григорьева). – 60 с. : табл., карт. – (Прил. 79-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 80-е

Мальков, Ф. И. Главнейшие сорняки Туркменской ССР и меры борьбы с ними = Principal weeds of the Turkmenian SSR and means of controlling them / Ф. И. Мальков ; ответственный редактор А. И. Мальцев. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1936 (Ленинград : Тип. ВКСХУ им. Сталина). – 48 с. : табл., рис. – (Прил. 80-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 81-е

Позняк, А. Д. Хинное дерево и его культура = Cinchona and its cultivation / А. Д. Позняк ; с предисловием и под редакцией Г. К. Крейера. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1936 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – 172 с. : табл., рис., фот. – (Прил. 81-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 83-е

Костина, К. Ф. Абрикос = The apricot / К. Ф. Костина ; ответственный редактор Н. В. Ковалев. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1936 (2-я тип. Изд-ва Леноблисполкома и Совета). – 291, [1] с. : табл., рис., диагр., карт., схем. – (Прил. 83-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение 84-е

Проблема витаминов : 2-й сб. экспериментальных работ витаминной лаборатории Всесоюзного института растениеводства = Problem of vitamins : experimental works of the vitamin laboratory of the Institute of plant industry / ответственные редакторы: Н. Н. Иванов, В. Н. Букин ; [под общим научным руководством: Н. Н. Иванова, В. Н. Букина ; при участии: В. А. Энгельгардта, М. Ф. Глазунова. – Ленинград : ВАСХНИЛ, Ленинградский филиал, 1937 (Ленинград : Тип. «Печатня»). – 339 с. : табл., рис. – (Прил. 84-е к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции»).

Приложение к т. 40 (1969)

Методы комплексного изучения фотосинтеза : (методический сборник) / под редакцией О. Д. Быкова ; ВАСХНИЛ, Всесоюзный научно-исследовательский институт растениеводства им. Н. И. Вавилова. – Ленинград : ВИР, 1969. – 260 с. : табл., ил. – (Прил. [к «Трудам по прикладной ботанике, генетике и селекции» ; т. 40]).

**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*
Корректура: *А.Г. Крылов*
Компьютерная верстка: *А.В. Иванов*

Адрес редакции:
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42
Тел.: (812) 314-49-14; e-mail: trudyVIR@vir.nw.ru; i.kotielkina@vir.nw.ru

Почтовый адрес редакции
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42, 44

Подписано в печать 25.12.2023. Формат 70×100$^{1}/_{8}$.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 32,75. Тираж 100 экз. Заказ № 380/2.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова» (ВИР),
редакционно-издательский сектор ВИР

Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 42

Индивидуальный предприниматель Юшкевич Галина Викторовна
192286, г. Санкт-Петербург, Альпийский пер., д. 45