

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



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 сортифта 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°C. 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» замечен при температуре ниже 18°C 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

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 Актыбинской 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, Kharinskii, 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°C, в вегетативный период – 16–20°C, генеративный – 16–22°C (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, селекционер	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, селекционер	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	БК и ВС	КС и ВС	БК 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: БК – «всходы – колошение»; КС – «колошение – восковая спелость»; ВС – продолжительность вегетационного периода
Note: БК – SH (sprouting to heading); КС – HR (heading to yellow ripeness); ВС – SR (sprouting to yellow ripeness)

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

По каждой из метрик $r_{\text{вк}}$ и $r_{\text{кк}}$ 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 ($\rho = 0,61$; $p = 0,007$), роль ВК снижается, но недостоверно ($\rho = -0,37$; $p = 0,135$). Зависимость от долготы также недостоверна ($\rho = -0,46$; $p = 0,052$ для $r_{\text{вк}}$ и $\rho = 0,39$; $p = 0,122$ для $r_{\text{кк}}$) и частично может быть объяснена снижением широты северной границы сельскохозяйственной зоны в восточных регионах России (Pavlova, Karachenkova, 2020). В нашем случае корреляция широты и долготы пунктов исследования составила $\rho = -0,23$ ($p = 0,350$). Севернее 53° с. ш. период «колошение – восковая спелость» начинает играть более значительную роль и $r_{\text{кк}} > r_{\text{вк}}$ (см. рис. 1). Таким образом, изменение соотношения коэффициентов корреляции происходит в основном за счет возрастания роли $r_{\text{кк}}$, то есть возрастания вариабельности периода КС у образцов выборки.

Температура в период колошения ($T_{\text{к}}$) варьировала в пунктах исследования от $11,8^\circ\text{C}$ до $21,3^\circ\text{C}$; в месяц после колошения ($T_{\text{пк}}$) – от $15,7^\circ\text{C}$ до $21,1^\circ\text{C}$ (см. таблицу, рис. 2). В среднем $T_{\text{к}} = 18,0^\circ\text{C}$, $T_{\text{пк}} = 18,3^\circ\text{C}$. Зависимость темпера-

туры в месяц колошения и после колошения от широты носит нелинейный характер, оба показателя снижаются к границам рассмотренного широтного диапазона $40\text{--}60^\circ$ с. ш. и максимальны на $48\text{--}54^\circ$ с. ш. (см. рис. 2). До $52\text{--}54^\circ$ с. ш. наблюдается тенденция к превышению температуры колошения над температурой после колошения, в более высоких широтах – наоборот, $T_{\text{к}} < T_{\text{пк}}$. 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 $r_{\text{вк}}$ и $r_{\text{кк}}$ различались температурными условиями колошения и периода после него на уровне значимости 10% по критерию Краскела – Уоллиса. Контрастные по $r_{\text{вк}}$ группы различались температурой в период колошения ($p = 0,055$): в группе с высокими $r_{\text{вк}}$ $T_{\text{к}} = 13,2^\circ\text{C}$, со средними – $T_{\text{к}} = 18,5^\circ\text{C}$, с низкими – $T_{\text{к}} = 18,9^\circ\text{C}$. У контрастных по $r_{\text{кк}}$ групп средняя температура месяца после колошения ($T_{\text{пк}}$) различалась на уровне $p = 0,088$: в группе с высокими $r_{\text{кк}}$ – $T_{\text{пк}} = 17,2^\circ$, средними – $T_{\text{пк}} = 18,6^\circ\text{C}$, низкими – $T_{\text{пк}} = 19,6^\circ\text{C}$.

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

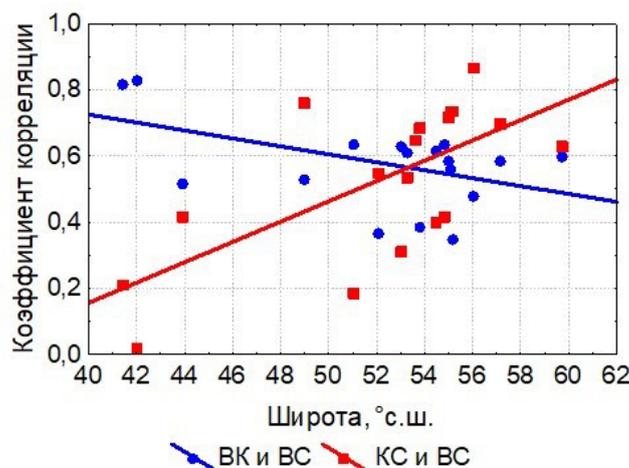


Рис. 1. Широтная зависимость коэффициентов корреляции продолжительности межфазных и вегетационного периодов яровой мягкой пшеницы в 18 пунктах.

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

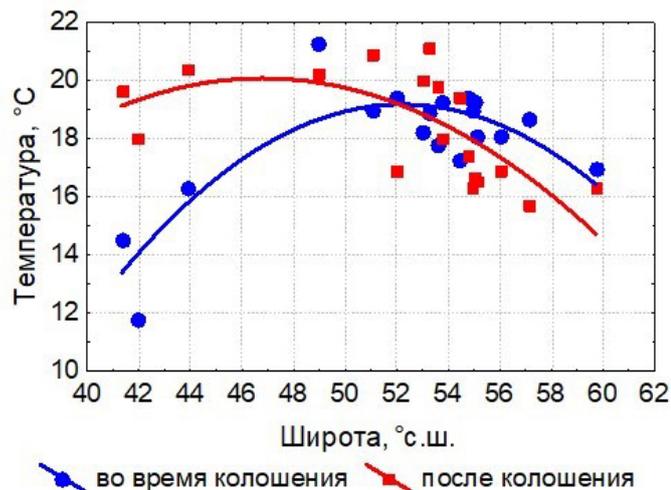


Рис. 2. Широтная зависимость температуры месяца колошения и месяца после колошения яровой мягкой пшеницы в 18 пунктах.

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

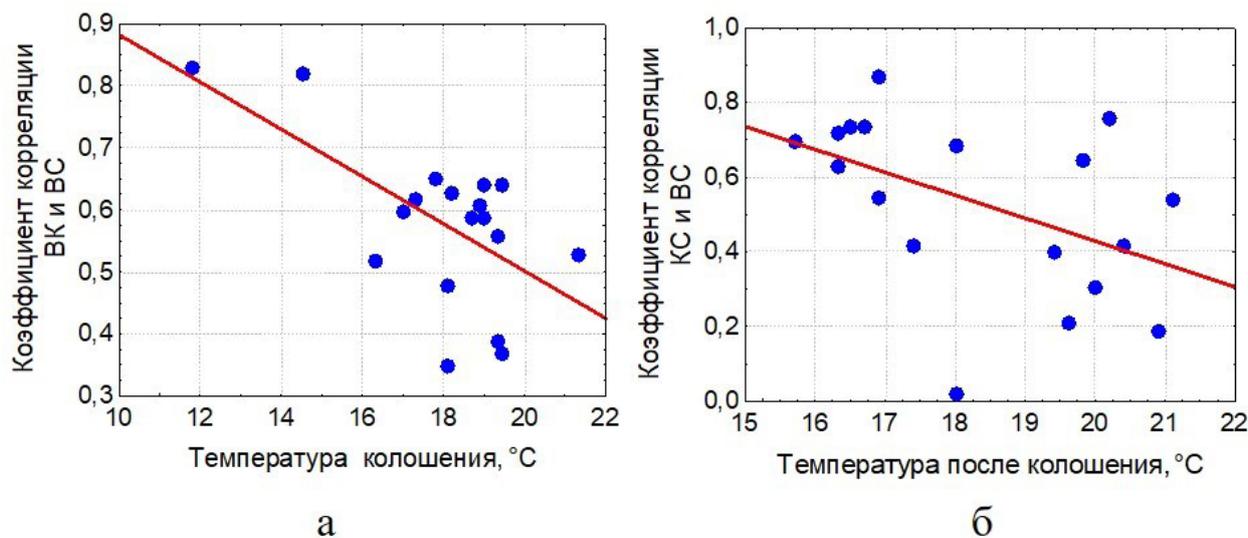


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициентов корреляции: (а) «всходы – колошение» (BK) и продолжительности вегетационного периода (BC) – от температуры периода колошения; (б) «колошение – восковая спелость» (KC) и BC – от температуры месяца после колошения образцов яровой мягкой пшеницы в 18 пунктах

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

Наблюдается отрицательная связь $r_{\text{кв}}$ и температуры после колошения – $\rho = -0,48$ ($p = 0,045$). Из шести значений с $r_{\text{кв}} > 0,7$ четыре наблюдались при температуре ниже 18°C . Контрастные значения – ниже $0,4$ – наблюдались при температуре 18°C и выше. Таким образом, при температуре ниже 18°C 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. $r_{\text{кв}}$ варьировал по годам от $0,05$ до $0,88$, $r_{\text{кв}}$ – от $-0,04$ до $0,92$. Медианное значение распределения по годам соста-

вило для $r_{\text{вк}} = 0,65$, для $r_{\text{кк}} = 0,63$, то есть влияние обоих периодов сравнимо. Коэффициенты $r_{\text{вк}}$ и $r_{\text{кк}}$ связаны отрицательно ($\rho = -0,32$; $p = 0,010$); $r_{\text{вк}}$ показал слабую достоверную связь только с осадками, положительную – с осадками июля ($\rho = 0,29$; $p = 0,030$). Коэффициент $r_{\text{кк}}$ связан отрицательно с различными температурными показателями: средней температурой в течение 14 суток после начала колошения ($\rho = -0,27$; $p = 0,040$), незначимо отрицательно – с температурой мая, июня, июля ($p > 0,150$); со средней температурой КС ($\rho = -0,21$; $p = 0,010$). Таким образом, подтверждена слабая отрицательная зависимость $r_{\text{кк}}$ 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 $r_{\text{вк}} = 0,65$, $r_{\text{кк}} = 0,86$, то есть влияние периода КС больше. Межсортная 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 ($L_{\text{кк}}$) показывает, что этот показатель на 81% детерминирован средней температурой периода ($T_{\text{кк}}$), причем зависимость нелинейна (см. рис. 4, б), что особенно заметно при температуре выше 18°C:

$$L_{\text{кк}} = 161,8 - 9,9T_{\text{кк}} + 0,2T_{\text{кк}}^2 \quad R^2 = 0,81 \quad (1)$$

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

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

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

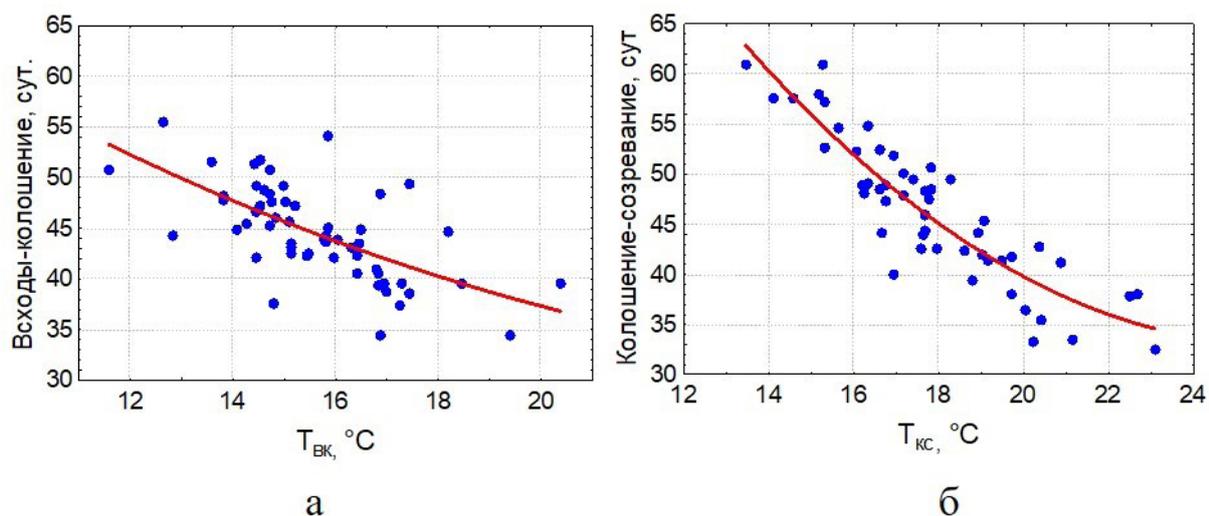


Рис. 4. Зависимость продолжительности межфазных периодов яровой мягкой пшеницы от средней температуры: (а) «всходы – колошение»; (б) «колошение – восковая спелость», среднее для 35 образцов, Пушкин, 1945–2021 гг. $T_{\text{вк}}$, $T_{\text{кк}}$ – температуры периодов «всходы – колошение» и «колошение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

Тренды получены параболической аппроксимацией

Fig. 4. Dependence of spring bread wheat interphase periods on the mean temperature: (a) sprouting to heading; (b) heading to yellow ripeness, average for 35 accessions, Pushkin, 1945–2021. $T_{\text{вк}}$, $T_{\text{кк}}$ – 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°C, 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 kolleksiionnykh 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., Зюев Е.В., Филатенко А.А., Сербин А.А., Ляпунова О.А., Косов В.Ю., Куркиев У.К., Охотникова Т.В., Наврузбеков Н.А., Богуславский Р.Л., Абдулаева А.К., Чикида Н.Н., Митрофанова О.П., Потоккина С.А. Пополнение, сохранение в живом виде и изучение мировой коллекции пшеницы, эгилопса и тритикале: методические указания. 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 kolleksiionnykh 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 (Vegetatsionnyy 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 iskhodnyy material dlya selektsii yarovoy myagkoy pshenitsy v Astrakhanskoj 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., Kovalova O.N., Porokhovina 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., Зюев Е.В., Ковалева О.Н., Пороховина 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., Porokhovina 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., Пороховина 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).
- Seljaninov 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., Патуриная 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.