

Растениеводство, защита и биотехнология растений

УДК 633.14:664.64.016.8

DOI 10.31857/S2500262724030054 EDN FVOGLB

СЕЛЕКЦИОННАЯ ОЦЕНКА ПОПУЛЯЦИИ ОЗИМОЙ РЖИ ГК-494/15ВВ С ВЫСОКОЙ ВЯЗКОСТЬЮ ВОДНОГО ЭКСТРАКТА ЗЕРНОВОГО ШРОТА

© 2024 г. А. А. Гончаренко, академик РАН, А. В. Макаров, доктор сельскохозяйственных наук, Н. В. Цыганкова, Т. В. Семенова, В. Н. Точили, Н. А. Ключко, М. С. Гончаренко, кандидаты сельскохозяйственных наук, П. А. Плотников

Федеральный исследовательский центр «Немчиновка»,
143026, Московская обл., Одинцовский район, пос. Новоивановское, ул. Агрохимиков, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

Исследования проводили с целью сравнительной оценки популяции озимой ржи ГК-494/15вв, отобранной на высокую вязкость водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота (9,7 сПуаз) для улучшения технологических и хлебопекарных качеств зерна. Сравнительные испытания выполняли в 2017–2023 гг. на делянках 12 м² в 3-кратной повторности. В качестве стандартов использовали культивируемые сорта озимой ржи Татьяна, Московская 12, Московская 15 и Московская 18, у которых средняя ВВЭ составляет 4,4...4,9 сПуаз. Высоковязкая популяция ГК-494/15вв была достоверно лучше стандартов по высоте амилограммы (407 ед. против 243...299 ед.), формоустойчивости подового хлеба (0,29 против 0,21...0,24) и качеству мякиша формового хлеба (4,5 балла против 3,6...3,8 балла). По урожайности и другим признакам различия были недостоверными. По числу падения и температуре клейстеризации крахмала наблюдалась устойчивая тенденция в положительном направлении, по объему формового хлеба – в отрицательном. По зимостойкости, содержанию белка и крахмала в зерне корреляционной сопряженности с признаком ВВЭ не выявлено. Отмечена сходная реакция таких признаков, как высота амилограммы, число падения и температура клейстеризации крахмала на изменяющиеся метеорологические условия года, что подтверждает достоверно высокая корреляция между ними ($r = 0,77...0,87$). Для признака ВВЭ такая корреляция имела место только для температуры клейстеризации крахмала ($r = 0,71$). Высокий потенциал ВВЭ снижал объемный выход формового хлеба, благодаря чему он имел лучшие структурно-механические свойства мякиша. ВВЭ – важный признак при селекции озимой ржи на высокие хлебопекарные качества зерна, а изучаемая популяция ГК-494/15вв требует селекционного улучшения по признакам короткостебельности, устойчивости к полеганию, массе 1000 зерен и натуре зерна.

BREEDING ASSESSMENT OF WINTER RYE POPULATION GC-494/15VV WITH HIGH VISCOSITY OF WATER EXTRACT OF GRAIN MEAL

A. A. Goncharenko, A. V. Makarov, N. V. Tsygankova, T. V. Semenova, V. N. Tochilin, N. A. Klochko, M. S. Goncharenko, P. A. Plotnikov

Federal Research Center «Nemchinovka»,
143026, Moskovskaya obl., Odintsovskii r-n, ul. Agrokhimikov, 6
E-mail: goncharenko05@mail.ru

The results of a comparative assessment of the winter rye population GC-494/15vv, selected for high viscosity of a water extract (VWE) of grain meal (9,7 sPoise) in order to improve the technological and baking qualities of grain, are presented. Cultivated varieties of winter rye Tatiana, Moskovskaya 12, Moskovskaya 15 and Moskovskaya 18 were used as the standard, in which the VWE varied at the level of 4.4...4.9 sPoise. Comparative tests were carried out in 2017–2023 on plots of 12 m² in 3-fold repetition. In terms of yield and other traits the differences were unreliable, but in terms of the number of falling and the temperature of starch gelatinization there was a steady trend in the positive direction, and in terms of the volume output of bread – in the negative. In terms of winter hardiness, protein and starch content in grain there was no correlation with the trait of VWE. The influence of the weather conditions of the year on the dynamics of various traits was analyzed. There is a similar dynamics of such traits as the height of the amylogram, the number of falling and the temperature of starch gelatinization for changing weather conditions of the year, which is confirmed by a reliable correlation between them ($r = 0,77...0,87$). For the trait of VWE a reliable correlation took place only for the starch gelatinization temperature ($r = 0,71$). The high potential of the VWE reduced the volumetric output of the formed bread, so that it had the best structural and mechanical properties of the crumb. It is concluded that VWE is an important feature in the breeding of winter rye for high baking qualities of grain.

Ключевые слова: озимая рожь (*Secale cereale* L.), сорт, популяция, вязкость водного экстракта, хлебопекарные качества зерна.

Keywords: winter rye (*Secale cereale* L.), variety, population, viscosity of water extract, baking qualities of grain.

В мировом земледелии озимую рожь культивируют, главным образом, как хлебную культуру. Отличительная ее особенность – высокое содержание в зерне некрахмальных полисахаридов (пентозанов), которые очень важны в хлебопечении, но нежелательны при кормлении животных [1]. Пентозаны связывают воду при замесе теста, увеличивая его вязкость и улучшая физические свойства. При тестообразовании они выполняют функцию клейковинных белков, обеспечивая формоустойчивость теста, что в сочетании с низкой активностью амилазных

ферментов улучшает структурно-механические свойства мякиша выпекаемого хлеба [2].

По отношению к воде пентозаны подразделяют на растворимые и нерастворимые [3]. Особую роль играют водорастворимые пентозаны, способные формировать высоковязкие водные растворы при относительно низкой концентрации, что очень важно в технологии приготовления ржаного теста [4]. Селекцию озимой ржи на высокое содержание водорастворимых пентозанов с целью улучшения хлебопекарных качеств зерна

до последних лет не проводили [5, 6, 7]. Ситуация изменилась после появления сведений о том, что потенциал вязкости водного экстракта (ВВЭ) зернового шрота озимой ржи находится почти в прямой зависимости от содержания водорастворимых пентозанов (коэффициент корреляции $r=0,97$) [8]. Обнаружение этой сопряженности открыло путь к масштабному скринингу селекционного материала на содержание пентозанов, поскольку появилась возможность использовать уровень вязкости как косвенный критерий их количественного определения. В селекционном аспекте важно то, что высокий уровень ВВЭ зернового шрота может служить хорошим индикатором пригодности зерна озимой ржи на хлебопекарные цели [9, 10].

В свете изложенного особый интерес представляет выведение сортов озимой ржи с высокой ВВЭ. В Федеральном исследовательском центре «Немчиновка» целенаправленную селекцию озимой ржи по признаку ВВЭ ведут с 2001 г. За 23 года была разработана методика оценки селекционного материала озимой ржи по ВВЭ с использованием роторного вискозиметра VT5/LR [11] и проведен 10-кратный дивергентный (разнонаправленный) отбор по этому признаку на базе сортов Альфа и Московская 12. В результате созданы уникальные субпопуляции, отличающиеся высокой контрастностью признака ВВЭ: высоковязкие, которые превосходят исходные сорта по величине этого показателя в 3,3...6,0 раз, и низковязкие, которые уступали исходными в 2,6...3,5 раза [12]. По результатам предварительного изучения продуктов отбора было установлено, что высоковязкие популяции несколько уступают исходным сортам по урожайности, но значимо превосходят их по некоторым показателям качества зерна. Наиболее высокий коррелятивный эффект отбора, проведенного по вязкости, достигался по числу падения, высоте амилограммы, формоустойчивости хлеба, качеству хлебного мякиша. Это послужило основанием для ассортативного скрещивания высоковязких субпопуляций между собой с целью усиления экспрессии перечисленных признаков. В результате чего в 2015 г. была создана уникальная высоковязкая (на уровне 9...10 сП) популяция ГК-494/15вв, которая в последующие годы (2017–2023 гг.) проходила интенсивную селекционную проработку на опытном поле ФИЦ «Немчиновка».

Цель исследований – селекционная оценка высоковязкой популяции ржи ГК-494/15вв по урожайным, морфо-биологическим и хлебопекарным признакам зерна, в сравнении с районированными сортами.

Методика. Исходным материалом для изучения послужила высоковязкая популяция ГК-494/15вв. В 2017–2023 гг. ее сравнивали с районированными сортами озимой ржи Татьяна, Московская 12, Московская 15, Московская 18, у которых средний уровень ВВЭ по результатам предварительного испытания составлял $\eta=4,3...4,9$ сП. Полевые исследования проводили на опытном поле ФИЦ «Немчиновка» на делянках 12 м² в трех повторениях при норме высева 500 шт. семян на 1 м².

Почва опытного участка – дерново-подзолистая, суглинистая. Содержание гумуса (по Тюрину в модификации ЦИНАО) в слое почвы 0...20 см составляло 2,1 %, подвижных P₂O₅ и K₂O (по Кирсанову) – соответственно 101...150 мг/кг и 8Г...120 мг/кг, рН солевой вытяжки (1,0 KCl) – 6,6 ед.

После уборки отбирали среднюю пробу зерна массой 3 кг для оценки его физико-технологических и мукомольно-хлебопекарных качеств по различным показателям. Относительную ВВЭ из цельносмолотой

муки измеряли в сантипуазах (сП) на ротационном вискозиметре VT5L/R согласно действующей методике [11]. Оценку хлебопекарных качеств зерна проводили методом пробной лабораторной выпечки подового и формового хлеба из цельносмолотой муки. Формоустойчивость теста (показатель Н/D) определяли путем отношения высоты подового хлеба к его диаметру, а качество мякиша формового хлеба – методом глазомерной оценки его физических свойств (цвета, пористости, липкости, упругости), а также путем измерения объемного выхода формового хлеба. Высоту амилограммы и температуру клейстеризации крахмала определяли на амилографе Брабендера, число падения (ЧП) – на приборе Хагберга–Пертена, содержание белка и крахмала – на инфракрасном спектрофотометре Spectra Star 2400.

Данные в таблице представлены в виде генеральной средней и стандартной ошибки ($M \pm m$). Все изучаемые признаки были количественными (полигенными) и имели распределение, близкое к нормальному. Для оценки степени сопряженности изучаемых признаков вычисляли парные коэффициенты корреляции Пирсона r и их квадратические ошибки $\pm sr$. Достоверность различий между сортами оценивали по t-критерию Стьюдента [13].

Метеоусловия в годы исследований значительно различались. Наиболее неблагоприятными для налива зерна они были в 2019 г., когда из-за обильных осадков в июле (85,8 мм) посевы рано полегли (14 июля) и в таком состоянии находились до уборки (30 июля), из-за чего зерно характеризовалось низкой натурой. Для этого года так же была характерна самая низкая вязкость водного экстракта (4,0...6,3 сП), высота амилограммы (70...190 ед.) и число падения (70...72 с). Сходные условия сложились в 2017 и 2020 гг. Сильно дождливая погода в эти годы существенно снижала потенциал ВВЭ у всех испытываемых популяций, включая ГК-494/15вв. Аномально жаркую погоду в июне–июле на фоне сильной засухи (осадков выпало 51 % от нормы) отмечали в 2021 г. В этих условиях у популяции ГК-494/15 сформировалось зерно с предельно высоким числом падения (301 с) и высокой вязкостью водного экстракта (11,9 сП). У низковязких стандартных сортов ржи абсолютные величины этих признаков были также высокими: число падения – 256...289 с, вязкость – 6,0...7,1 сП. Относительно благоприятные условия для формирования зерна с высокой вязкостью сложились также в 2022 и 2023 гг.



Рис. 1. Лабораторная выпечка подового и формового хлеба из муки сортов ржи Московская 12 и ГК-494/15вв.

Селекционная оценка высоковязкой популяции ГК-494/15вв, в сравнении с сортами Татьяна, Московская 12, Московская 15 и Московская 18 (среднее за 2017–2023 гг.)

Признаки	ГК-494/15вв	Татьяна	Московская 12	Московская 15	Московская 18
Урожайность, т/га	5,6±0,37	6,0±0,48	6,2±0,26	6,5±0,34	6,6±0,36
Зимостойкость, %	81,5±4,1	85,2±5,6	75,5±10,6	80,1±8,0	74,4±10,8
Высота растений, см	147±3,2	133±3,3*	136±2,2*	135±2,9*	140±3,5
Устойчивость к полеганию, балл	5,0±0,6	5,6±1,0	6,5±0,9	5,9±1,0	5,3±0,9
Число зерен в колосе, шт.	51,3±1,8	56,0±1,2	53,0±2,8	55,2±1,2	52,3±2,2
Масса 1000 зерен, г	30,3±1,8	31,1±1,6	32,3±2,1	32,4±1,8	32,6±1,8
Натура зерна, г/л	702±9	703±9	723±8	727±10	717±9
Вязкость ВЭ, сП	9,7±0,6	4,9±0,4*	4,8±0,3*	4,4±0,3*	4,6±0,5*
Число падения, с	223±28	161±28	203±30	173±32	176±32
Высота амилограммы, е.а.	407±40	243±45*	299±37*	298±36*	281±38*
Температура клейстеризации, °С	63,0±2,1	60,9±1,6	61,6±2,3	61,5±1,9	61,4±1,6
Отношение Н/D	0,29±0,018	0,24±0,017*	0,24±0,016*	0,22±0,014*	0,21±0,013*
Объем хлеба, см ³	267±16	286±23	291±21	284±16	297±22
Качество мякиша, балл	4,5±0,06	3,6±0,04*	3,8±0,05*	3,7±0,04*	3,6±0,03*
Содержание белка, %	11,6±0,51	11,3±0,54	11,2±0,51	11,1±0,39	11,1±0,41
Содержание крахмала, %	52,3±1,40	52,8±1,27	52,8±1,47	53,1±0,83	53,3±1,07

*различие с популяцией ГК-494/15вв достоверно на 5 %-ном уровне значимости.

В эти годы полегание посевов было незначительным, а в период налива зерна преобладала умеренно сухая погода с высокой (на 2...3 °С больше многолетней нормы) среднесуточной температурой воздуха.

Результаты и обсуждение. Под влиянием генотипических и средовых факторов изучаемые сорта озимой ржи сильно варьировали по урожайности и многим другим признакам. Однако достоверные различия (см. табл., рис. 1) между популяцией ГК-494/15вв и сортами сравнения отмечены только по вязкости водного экстракта (на 4,8...5,3 сП), высоте растений (на 7...14 см), высоте амилограммы (на 108...164 е.а.), формоустойчивости подового хлеба (отношение h/d больше на 0,05...0,08 ед.) и качеству мякиша формового хлеба (на 0,7...0,9 балла).

По другим признакам просматривались как положительные (число падения, температура клейстеризации крахмала), так и отрицательные (урожайность, устойчивость к полеганию, число зерен в колосе, масса 1000 зерен, натура зерна, объем формового хлеба) тенденции. По некоторым признакам (зимостойкость, содержание белка и крахмала) изменения были разнонаправленными. Объясняется это тем, что в процессе селекции популяции ГК-494/15вв отбору подвергались генотипы преимущественно с высокой экспрессией селективируемого признака, то есть ВВЭ, а по другим признакам интенсивность отбора была очень низкой. В результате изменились только те признаки, которые коррелировали с уровнем ВВЭ. По этой причине популяция ГК-494/15вв требует интенсивного селекционного улучшения, особенно по признакам короткостебельности, крупнозерности и более высокой натуры зерна.

Следует подчеркнуть сходный характер реакции отдельных признаков на изменяющиеся метеоусловия года. Прежде всего обращают на себя внимание такие показатели, как высота амилограммы, температура клейстеризации крахмала и число падения, которые реагируют сходным образом (рис. 2, 3). Анализ коэффициентов корреляции между величинами этих признаков у высоковязкой популяции ГК-494/15вв и средними их значениями у 4-х низковязких сортов, взятых в качестве стандарта, свидетельствует, что по большинству показателей степень сопряженной изменчивости по годам была очень высокой, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции ($r=0,66\pm0,23 \dots 0,98\pm0,02$). Единственный признак, по которому такая корреляция была недостоверной, – урожайность ($r=0,43\pm0,33$), что указывает на необходимость селекционного улучшения в этом направлении.

В селекционном отношении важно знать корреляционную зависимость между различными признаками. В наших исследованиях коэффициент корреляции

между высотой амилограммы и числом падения составил $r=0,87\pm0,10$, а между высотой амилограммы и температурой клейстеризации – $r=0,77\pm0,17$, то есть они изменялись почти синхронно. Что касается ВВЭ, то она достоверно коррелировала только с температурой клейстеризации – $r=0,71\pm0,20$. Логично допустить, что эта синхронность была обусловлена сходной динамикой содержания таких основных компонентов набухания, как крахмал и белки. Причиной подобного сходства в годовой динамике признаков было полегание посевов в период налива и созревания зерна, которое в 2019 г. было ранним и продолжительным (3...4 балла), а в 2021–2022 гг. – более поздним и слабым (7...8 баллов). Общее заключение из этого сводится к тому, что высокая устойчивость к полеганию должна быть непременным атрибутом сорта ржи, селективируемого на высокое качество зерна.

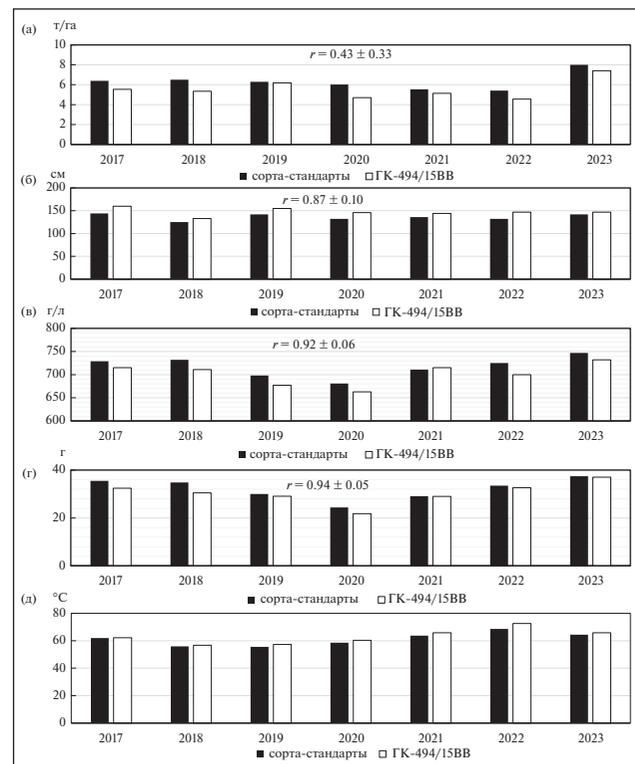


Рис. 2. Оценка степени сопряженной изменчивости морфо-биологических признаков у изучаемых сортов ржи под влиянием погодных условий года: а – урожайность, т/га; б – высота растений, см; в – натура зерна, г/л; г – масса 1000 зерен, г; д – температура клейстеризации, °С.

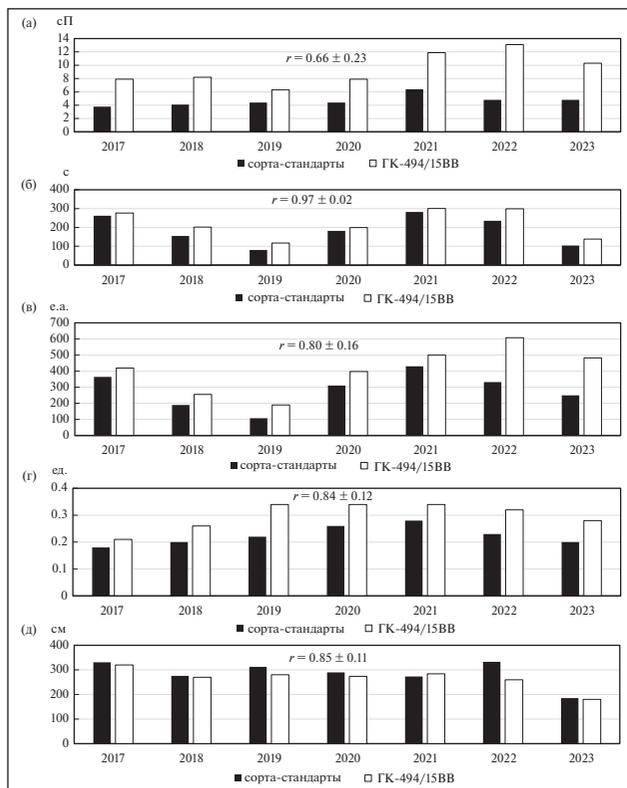


Рис. 3. Оценка степени сопряженной изменчивости хлебопекарных признаков у изучаемых сортов ржи под влиянием погодных условий года: а – вязкость водного экстракта, сП; б – число падения, с; в – высота амилограммы, е. а.; г – отношение h/d, ед.; д – объем хлеба, см.

Высоковязкая популяция GK-494/15вв устойчиво превосходила сравниваемые сорта по температуре клейстеризации крахмала (в среднем на 1,7 °С). Этот признак, как известно, считают лучшим критерием оценки активности фермента альфа-амилазы, чем высота амилограммы, так как он учитывает влияние количества и качества самого крахмала [1]. Годовая динамика этого признака была сходна с изменением высоты амилограммы ($r=0,77 \pm 0,17$) и числа падения ($r=0,68 \pm 0,21$), что указывает на возможность их комплексного улучшения.

Кроме того, замечены различия в варьировании некоторых признаков по годам. По величине показателя ВВЭ популяция GK-494/15вв отличалась большей вариабельностью ($CV=25,0\%$), чем контрольные сорта ($CV=16,9...19,3\%$). При этом высокий уровень ВВЭ способствовал более устойчивому проявлению таких признаков, как число падения ($CV=34,0\%$ против $39,1...49,0\%$) и объемный выход хлеба ($CV=16,0\%$ против $19,5...23,1\%$).

Характерная особенность высоковязкой популяции GK-494/15вв – относительно низкий объем формового хлеба (в среднем на 8,4 %, по сравнению с контрольными сортами). Высокий потенциал ВВЭ снижал величину этого показателя, что обусловлено влиянием водорастворимых пентозанов, сильно удерживающих влагу. Однако формовой хлеб из высоковязкого теста имел лучшие структурно-механические свойства мякиша и отличался меньшей его пористостью. Благодаря высокой вязкости тесто способно связывать большое количество воды и лучше удерживает форму, но испеченный хлеб имеет меньший объем. Сходная особенность была отмечена и ранее [8].

Выводы. Высоковязкая популяция GK-494/15вв, в сравнении с сортами Татьяна, Московская 12, Московская 15 и Московская 18, отличается более высоким стеблем (147 см против 133...140 см), достоверно превосходит их по высоте амилограммы (407 ед. против 243...299 ед.), формоустойчивости подового хлеба (0,29 против 0,21...0,24) и качеству мякиша формового хлеба (4,5 балла против 3,6...3,8 балла). По урожайности и другим признакам различия были недостоверными, но по числу падения и температуре клейстеризации крахмала наблюдалась устойчивая тенденция в положительном направлении, а по объему формового хлеба – в сторону его снижения. По зимостойкости, содержанию белка и крахмала в зерне коррелятивной зависимости с признаком ВВЭ не выявлено. Обнаружено сходное влияние метеоусловий года на динамику ВВЭ, высоту амилограммы, число падения и температуру клейстеризации крахмала, что указывает на возможность их комплексного улучшения методами селекции. Непременным атрибутом сорта ржи, селекционируемого на высокое качество зерна, должна быть высокая устойчивость к полеганию, а изучаемая популяция GK-494/15вв требует селекционного улучшения по признакам короткостебельности, устойчивости к полеганию, массе 1000 зерен и натуре зерна.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального исследовательского центра «Немчиновка». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Weipert D. Pentosans as selection traits in rye breeding // *Vortr. Pflanzenzuchtung*, 1996. Vol. 35. P. 109–119.
2. Weipert D. A contribution to estimation of the processing value of rye // *Getreide Mehl und Brot*. 1983. Vol. 37. No. 8. P. 229–234.
3. Brummer J. M. Neue rheologische Methoden für die Mullerei // *Getreide Mehl und Brot*. 2002. Vol. 56. No. 2. P. 74–80.
4. Nutrient and lignan content, dough properties and baking performance of rye samples used in Scandinavia / M. Nilsson, P. Aman, H. Harkonen, et al. // *Acta Agric. Scand. Select B*. 1997. Vol. 47. P. 26–34.
5. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н. Оптимизация параметров качества зерна для селекции озимой ржи // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019. Т. 23. № 3. С. 320–327. doi: 10.18699/vj19/96.
6. Влияние водорастворимых пентозанов на хлебопекарные свойства озимой ржи / Е. Н. Шаболкина, А. А. Бишарев, Н. В. Анисимкина и др. // *Зерновое хозяйство России*. 2019. № 1. С. 49–51. doi: 10.31367/2079-8725-2019-61-1-49-51.
7. Кобылянский В. Д., Солодухина О. В., Никонорова И. М. Морфологические особенности низкопентозанового зерна озимой ржи // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021. Т. 182. № 2. С. 123–130. doi: 10.30901/2227-8834-2021-2-123-130.
8. Boros D., Marquardt R. R., Slominski B. A., et al. Extract viscosity as an Indirect Assay for water-soluble Pentosan Content in Rye // *Cereal Chem*. 1993. Vol. 70. No. 5. P. 575–580.

9. Многопараметрическая оценка качества зерна популяций озимой ржи с различной вязкостью водного экстракта / А. А. Гончаренко, В. Я. Черных, А. В. Макаров и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 1. С. 33–37.
10. Показатели качества и фракционный состав зерна сортов озимой ржи по крупности в условиях Нижнего Поволжья / Н. Н. Нуждина, Д. А. Жиганов, Т. Я. Ермолаева и др. // *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023. Т. 184. № 4. С. 153–162. doi: 10.30901/2227-8834-2023-4-153-162.
11. Тимощенко А. С., Гончаренко А. А. Адаптация ротного вискозиметра VT5L/R к определению относительной вязкости водного экстракта зернового шрота озимой ржи // *Сельскохозяйственная биология*. 2008. № 5. С. 110–115.
12. Многократный дивергентный отбор по вязкости водного экстракта у озимой ржи / А. А. Гончаренко, С. А. Ермаков, А. В. Макаров и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2016. № 4. С. 3–8.
13. Вольф В. Г. *Статистическая обработка опытных данных*. М.: Колос, 1966. 254 с.

Поступила в редакцию 31.03.2024
После доработки 19.04.2024
Принята к публикации 07.05.2024