УДК 633.112.9:631.527:577.112

4.1.2. Селекция, семеноводство и биотехнология растений (биологические науки)

ХАРАКТЕРИСТИКА СОРТОВ И ЛИНИЙ ОЗИМОГО ТРИТИКАЛЕ ПО АЛЛЕЛЬНОМУ СОСТАВУ ЛОКУСОВ *GLU-1* И ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА ЗЕРНА

Акинина Виктория Николаевна
канд. биол. наук
ведущий научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
ORCID: 0000-0003-3661-9246
SPIN-код: 8214-4177
e-mail: akinina_victoria@mail.ru

Дьячук Таисия Ивановна
д-р биол. наук
главный научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
ORCID: 0000-0001-7420-0521
SPIN-код: 9680-9522

Хомякова Олеся Викторовна
канд. биол. наук
ведущий научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
ORCID: 0000-0002-5218-6076
SPIN-код: 2422-7804

Жилин Степан Владимирович
научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
ORCID: 0000-0001-6181-5279
SPIN-код: 3519-2504

Калашникова Элла Вячеславовна
научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
ORCID: 0000-0002-3870-0542
SPIN-код: 8553-5195

Куликова Вероника Павловна
младший научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
ORCID: 0000-0003-3071-0188
SPIN-код: 4115-7291

Генералова Ольга Александровна
младший научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
ORCID: 0009-0007-0146-5001
SPIN-код: 8203-6449

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный

UDC 633.112.9:631.527:577.112

4.1.2. Plant breeding, seed production and biotechnology (biological sciences)

CHARACTERIZATION OF WINTER TRITICALE CULTIVARS AND LINES BY ALLELIC COMPOSITION OF GLU-1 LOCI AND GRAIN QUALITY TRAITS

Akinina Victoria Nikolaevna
Cand.Biol.Sci., Leading Researcher, Laboratory of Cell Selection
ORCID: 0000-0003-3661-9246
RSCI SPIN-code: 8214-4177
e-mail: akinina_victoria@mail.ru

Dyachuk Taisiya Ivanovna
Dr.Sci.Biol.
Chief Researcher, Laboratory of Cell Selection
ORCID: 0000-0001-7420-0521
RSCI SPIN-code: 9680-9522

Khomyakova Olesya Viktorovna
Cand.Biol.Sci.
Leading Researcher, Laboratory of Cell Selection
ORCID: 0000-0002-5218-6076
RSCI SPIN-code: 2422-7804

Zhilin Stepan Vladimirovich
Researcher, Laboratory of Cell Selection
ORCID: 0000-0001-6181-5279
RSCI SPIN-code: 3519-2504

Kalashnikova Ella Vyacheslavovna
Researcher, Laboratory of Cell Selection
ORCID: 0000-0002-3870-0542
RSCI SPIN-code: 8553-5195

Kulikova Veronika Pavlovna
Junior Researcher, Laboratory of Cell Selection
ORCID: 0000-0003-3071-0188
RSCI SPIN-code: 4115-7291

Generalova Olga Aleksandrovna
Junior Researcher, Laboratory of Cell Selection
ORCID: 0009-0007-0146-5001
RSCI SPIN-code: 8203-6449

Federal State Budgetary Scientific Organization «Federal Center of Agriculture Research of the South-

научный центр Юго-Востока», Саратов, Российская Федерация
ул. Тулайкова, 7, 410010 Саратов, Российская Федерация

У 12 сортов и линий озимого гексаплоидного тритикале селекции ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока» изучен аллельный состав локусов высокомолекулярных глютенинов и секалинов (*Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-R1*) в связи с показателями качества зерна. Электрофорезом в полиакриламидном геле по локусу *Glu-A1* идентифицированы все три возможных аллеля: субъединица 1 у сорта Георг, субъединица 2* у семи образцов, нулевой аллель у четырех. По локусу *Glu-B1* установлены два аллеля, *a* (субъединица 7) и *b* (7+8), по локусу *Glu-R1* выявлено пять аллельных вариантов. У изученных генотипов зафиксировано семь сочетаний аллелей по трем локусам. Линия № 19 гетерогенна по составу биотипов. Величина осадка SDS-седиментации за 2022–2025 гг. изменялась от 18 до 50 мм. Генотипы, несущие субъединицы локуса *Glu-A1*, достоверно превышали образцы с нулевым аллелем на 4,5–7,0 мм в зависимости от года. По локусам *Glu-B1* и *Glu-R1* различий между группами не выявлено. На долю года в общей изменчивости признака приходится 63,6 %, на долю генотипа – 23,8 %, в том числе на аллельный состав локуса *Glu-A1* – 17,0 %, на взаимодействие генотип × год – 9,3 %. Связь аллельного состава с реологическими свойствами теста и хлебопекарной оценкой не установлена. Величина осадка SDS-седиментации пригодна для сравнения генотипов только в пределах одного года и при сопоставлении со стандартами. Аллельный состав локуса *Glu-A1* следует рассматривать как один из факторов, влияющих на состояние белкового полимера

Ключевые слова: ОЗИМОЕ ТРИТИКАЛЕ, ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГЛЮТЕНИНЫ, *GLU-A1*, *GLU-B1*, ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СЕКАЛИНЫ, *GLU-R1*, SDS-СЕДИМЕНТАЦИЯ, КАЧЕСТВО ЗЕРНА, ЭЛЕКТРОФОРЕЗ

East Region», Saratov, Russian Federation
7 Tulaikova, 410010 Saratov, Russian Federation

The allelic composition of high-molecular-weight glutenin and secalin loci (*Glu-A1*, *Glu-B1*, *Glu-R1*) was studied in relation to grain quality traits in 12 winter hexaploid triticale cultivars and lines bred at the Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region. SDS-PAGE identified all three possible alleles at the *Glu-A1* locus: subunit 1 in cultivar Georg, subunit 2* in seven entries and the null allele in four. Two alleles were found at *Glu-B1*, *a* (subunit 7) and *b* (7+8), and five allelic variants at *Glu-R1*. Seven allele combinations across the three loci were recorded among the genotypes studied. Line No. 19 was heterogeneous in biotype composition. SDS sedimentation volume ranged from 18 to 50 mm over 2022–2025. Genotypes carrying *Glu-A1* subunits significantly exceeded those with the null allele by 4.5–7.0 mm depending on the year. No differences between groups were found for *Glu-B1* or *Glu-R1*. Year accounted for 63.6 % of the total variance of the trait, genotype for 23.8 % (including 17.0 % attributable to *Glu-A1* allelic composition) and genotype × year interaction for 9.3 %. No relationship was established between allelic composition and dough rheological properties or bread-making score. SDS sedimentation volume is informative for comparing genotypes only within a single year and relative to check cultivars. The allelic composition of the *Glu-A1* locus should be regarded as one of the factors affecting the state of the protein polymer

Keywords: WINTER TRITICALE, HIGH-MOLECULAR-WEIGHT GLUTENINS, *GLU-A1*, *GLU-B1*, HIGH-MOLECULAR-WEIGHT SECALINS, *GLU-R1*, SDS SEDIMENTATION, GRAIN QUALITY, ELECTROPHORESIS

http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-222-001

Введение.

Тритикале характеризуется высокой продуктивностью и экологической пластичностью, полученными от пшеницы и ржи. Лимитирующим признаком остаются хлебопекарные качества культуры. К основным причинам их снижения относят пониженное содержание

клейковины, ее меньшую прочность вследствие отсутствия генома D, присутствие генома R и высокую активность α-амилазы [Camerlengo, Kiszonas, 2023; Spetsov, Daskalova, 2024].

Для улучшения хлебопекарных качеств в основном использовали стратегию интрогрессии хромосомы 1D мягкой пшеницы или ее отдельных локусов и цитогенетическую реконструкцию хромосомы 1R [Lukaszewski, 2006]. Вместе с тем существует мнение, что улучшение хлебопекарных качеств возможно и без R/D замещений [Грабовец, Крохмаль, 2018].

У мягкой пшеницы связь аллельного состава локусов *Glu-1* с хлебопекарными качествами установлена надежно, вследствие чего балльная шкала оценки вошла в селекционную практику [Payne, Lawrence, 1983]. У тритикале использование такого метода оценки ограничено. Отсутствие генома D исключает влияние локуса *Glu-D1*, вносящего у мягкой пшеницы наибольший вклад в оценку, а присутствие секалинов, имеющих отрицательную поправку, приводит к резкому снижению суммарного балла [Vyhnánek et al., 2013].

Аллельный состав запасных белков тритикале описан достаточно полно. В исследовании европейских сортов были выявлены аллельные варианты по шести локусам. Наибольший полиморфизм отмечен у *Glu-B1* и *Glu-B3*. По локусу *Glu-R1* (*Sec-3*), расположенному на хромосоме 1R и содержащему два гена, кодирующих по одной субъединице x- и y-типа, установлено пять аллельных вариантов [Camerlengo, Kiszonas, 2023; Amiour et al., 2002]. Спектр высокомолекулярных субъединиц у гексаплоидного тритикале обычно включает от трех до пяти субъединиц: *Glu-A1* кодирует одну субъединицу либо не кодирует ни одной, *Glu-B1* одну или две, а *Glu-R1*, как правило, две [Spetsov, Daskalova, 2024]. Исследования о связи конкретных аллелей с показателями качества у тритикале редки, а для отечественного селекционного материала практически отсутствуют.

Среди методов оценки качества зерна определение величины осадка SDS-седиментации отличается простотой, высокой производительностью и малой величиной навески образца. Значения этого показателя значительно изменяются у сортов и линий тритикале разного эколого-географического происхождения. Кроме того, обнаружена его связь с показателями качества и хлебопекарной оценкой, что делает его использование эффективным на ранних этапах селекции [Кибкало и др., 2013].

Цель работы – изучить аллельное разнообразие состава высокомолекулярных глютенинов и секалинов у набора сортов и линий озимого гексаплоидного тритикале селекции ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока» и оценить связь выявленных аллелей с показателями качества зерна.

Материалы и методы.

Растительный материал выращивали с 2022 по 2025 гг. на опытном поле ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока» (г. Саратов). Изучены 12 сортов и линий озимого гексаплоидного тритикале: сорта-стандарты Зубр, Валентин 90 и Георг, сорта КС 1 и Тайча, линия DH-53, полученная методом культуры пыльников, и шесть селекционных линий поколений от F_8 до F_{16}.

Экстракцию глютенинов проводили по методу [Singh et al., 1991] с модификациями. При анализе на одну дорожку приходилась одна зерновка. Для каждого образца анализировали три или четыре зерновки, отобранные из отдельных типичных колосьев, что исключало попадание в анализ механической примеси.

Размолотую зерновку трижды обрабатывали 250 мкл 50 % изопропанола (по 30 мин при перемешивании с последующим центрифугированием 15 мин при 10 000 g) для удаления глиадинов и секалинов. Для экстракции глютенинов к осадку добавляли 250 мкл

буфера, содержащего 50 % изопропанола, 50 мМ Tris-HCl (pH 7,5) и 1 % меркаптоэтанола. Экстракцию проводили при 60 °C в течение 60 мин с периодическим перемешиванием, затем центрифугировали 10 мин при 10 000 g и отбирали супернатант.

Экстракт смешивали с буфером для нанесения (62,5 мМ Tris-HCl, pH 6,8; 2 % SDS; 10 % глицерина; 2 % меркаптоэтанола; 0,02 % бромфенолового синего) в соотношении 1:1 и прогревали 5 мин при 95 °C. На дорожку наносили от 10 до 20 мкл пробы.

Разделение проводили методом SDS-ПААГ в дискретной буферной системе [Laemmli, 1970]. Использовали акриламид и бисакриламид в соотношении 29:1. Концентрирующий гель содержал 6 % акриламида в Tris-HCl (pH 6,8), разделяющий гель 10 % акриламида в 0,375 М Tris-HCl (pH 8,8). Электродный буфер Tris-глицин-SDS (25 мМ Tris, 192 мМ глицин, 0,1 % SDS), pH 8,3. Вход пробы в гель проводили при 50 В, разделение при 100 В в течение около 2 ч до достижения красителем нижнего края геля. Гели окрашивали в течение 12 ч раствором 0,25 % Кумасси R-250 в 45 % метаноле и 10 % уксусной кислоте и отмывали в течение нескольких часов раствором 30 % метанола и 10 % уксусной кислоты. Визуализацию проводили в гель-документирующей системе Gel Doc Go (Bio-Rad, США).

В качестве сорта-анализатора на каждый гель наносили Безостую 1 (*Glu-A1b*, субъединица 2*; *Glu-B1c*, 7+9; *Glu-D1d*, 5+10). Субъединицы локусов *Glu-A1* и *Glu-B1* обозначали согласно [Payne, Lawrence, 1983]. Субъединицы локуса *Glu-R1* (*Sec-3*) и его аллельные варианты маркировали согласно [Amiour et al., 2002], где обозначения даны по относительной электрофоретической подвижности с индексом r.

Реологические свойства теста (разжижение теста и число валориметра) оценивали на фариографе Brabender (Германия) по ГОСТ

ISO 5530-1-2013: навеска муки 50 г в пересчете на влажность 14 %, температура 30 °С, консистенция теста 500 ед. ф.

Лабораторную выпечку проводили безопарным способом из 100 г муки. Объем хлеба измеряли на объемомере. Пористость мякиша оценивали по шкале пористости Н. Н. Иванова.

Величину осадка SDS-седиментации определяли в лаборатории качества зерна ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока» по модифицированной методике [Бебякин и др., 1987]. Навеску шрота цельного зерна массой 1 г помещали в пробирку, приливали 4 мл воды и выдерживали 15 мин, периодически встряхивая. Затем вносили 12 мл рабочего раствора, содержащего SDS и уксусную кислоту, перемешивали и после 10 мин отстаивания измеряли высоту осадка в миллиметрах [Кибкало и др., 2013].

Статистическую обработку проводили методами дисперсионного анализа. Для величины осадка SDS-седиментации проведен двухфакторный дисперсионный анализ (факторы: генотип и год), в сумме квадратов генотипа выделена доля, приходящаяся на аллельный состав локуса *Glu-A1*. Вклад факторов рассчитывали как долю суммы квадратов фактора в общей сумме квадратов. Различия между группами по локусам *Glu-1* в пределах года и различия между генотипами по показателям качества оценивали однофакторным дисперсионным анализом; разницу считали достоверной, если она превышала $НСР_{05}$. Изменчивость оценивали по коэффициенту вариации. Расчеты выполняли в программе Agros.

Результаты исследований.

Определены аллельные варианты локусов сортов и линий озимого тритикале (таблица 1). У изученных генотипов по локусу *Glu-A1* были выявлены все три аллеля: *Glu-A1a* (субъединица Ax1) у сорта Георг, *Glu-A1b* (Ax2*) у семи образцов и нулевой аллель *Glu-A1c* у четырех. По локусу *Glu-B1* определены два аллеля: *Glu-B1a* (субъединица Bx7) у

восьми образцов и *Glu-B1b* (Bx7+By8) у четырех. По локусу *Glu-R1* найдены все пять описанных аллельных вариантов. Высокое разнообразие аллельных комбинаций согласуется с литературными данными [Amiour et al., 2002]. Двенадцать изученных генотипов дали семь вариантов сочетаний по трем локусам. Разнообразие аллельного состава при небольшой выборке генотипов, вероятно, связано с широтой эколого-географического происхождения родительских форм, которые представлены в том числе европейскими и североамериканскими сортами.

Таблица 1 – АЛЛЕЛЬНЫЙ СОСТАВ ЛОКУСОВ *GLU-1* У СОРТОВ И ЛИНИЙ ОЗИМОГО ТРИТИКАЛЕ

Образец	Происхождение	*Glu-A1*	*Glu-B1*	*Glu-R1*
Георг (st)	Водолей / АДП-2 // Modus	a (1)	a (7)	c (6r+13r)
Зубр (st)	Стрелец / Студент	c (null)	b (7+8)	a (1r+4r)
Валентин 90 (st)	1865t9 / НАД 10	b (2*)	a (7)	b (2r+6,5r)
КС 1	Саргау / Полесский 7	c (null)	a (7)	e (6,5r)
Тайча	МАГ / Корнет	c (null)	a (7)	e (6,5r)
DH-53	МАГ / Водолей	b (2*)	a (7)	c (6r+13r)
Л. № 5	Валентин 90 / Губерния	b (2*)	a (7)	b (2r+6,5r)
Л. № 19	МАГ / Эллада	c (null)	a (7)	a (1r+4r) / d (2r+9r)
Л. № 35	Валентин 90 / Жемчужина Поволжья	b (2*)	b (7+8)	b (2r+6,5r)
Л. № 36	Студент / Союз // Modus	b (2*)	a (7)	b (2r+6,5r)
Л. № 38	Newton / Саргау // KS88T-142 /// Корнет	b (2*)	b (7+8)	b (2r+6,5r)
Л. № 39	Newton / Саргау // KS88T-142 /// Корнет	b (2*)	b (7+8)	b (2r+6,5r)

У линии № 19 при анализе в разных дорожках выявлены аллельные варианты локуса *Glu-R1* – *a* (1r+4r) и *d* (2r+9r), что указывает на гетерогенность линии по составу биотипов.

Высокомолекулярные глютенины определяют способность белкового комплекса к образованию полимерной сети. Они характеризуют качество клейковины, но не определяют ее количество. Для оценки связи с аллельным составом необходимо подобрать показатель, отражающий

свойства полимера и не зависящий от содержания белковых веществ. Таким критериям отвечает величина осадка SDS-седиментации. Она отражает набухание белка в кислой среде в присутствии додецилсульфата натрия. Показатель определяется без отмывания клейковины и не зависит от учета ее количества. Дополнительным преимуществом для выбора являются небольшая навеска и высокая производительность метода, что делает возможным его использование даже на ранних этапах селекции [Кибкало и др., 2013].

Величина осадка SDS-седиментации у генотипов изменялась от 18 до 50 мм. Изменчивость между образцами в пределах года была умеренная: коэффициент вариации в 2022 г. – 15,3 %, 2023 г. – 17,8 %, 2024 г. – 9,4 %, 2025 г. – 16,6 %. Изменчивость одного и того же генотипа по годам была значительно выше – в среднем 22,8 % (от 7,1 % у линии № 19 до 38,3 % у линии № 36).

Проведена сравнительная оценка величины осадка SDS-седиментации по годам исследования в группах, выделенных по локусам глютенинов. У генотипов, имеющих субъединицы локуса *Glu-A1,* величина показателя достоверно превышала значения образцов, несущих нулевой аллель, по всем годам исследований (таблица 2). Разница между группами варьировала от 4,5 до 7,0 мм.

Различий по величине осадка между группами, выделенными по локусам *Glu-B1* и *Glu-R1,* не обнаружено.

Таблица 2 – ВЕЛИЧИНА ОСАДКА SDS-СЕДИМЕНТАЦИИ В ГРУППАХ ПО ЛОКУСУ *Glu-A1*

Год	Величина осадка SDS-седиментации, мм			$НСР_{05}$
	Субъединица *Glu-A1* (1 или 2*)	Нулевой аллель *Glu-A1*	Превышение	
2022	30,0	23,0	+7,0	2,2
2023	26,0	19,0	+7,0	1,8
2024	26,8	22,3	+4,5	1,5
2025	38,7	32,7	+6,0	1,8

Средняя величина осадка SDS-седиментации у генотипов составила 27,7 мм в 2022 г., 23,7 мм в 2023 г., 25,3 мм в 2024 г., 36,7 мм в 2025 г. Анализ общей изменчивости признака показал, что на долю года приходится 63,6 %, на долю генотипа – 23,8 % (в том числе на долю локуса *Glu-A1* – 17,0 %), на взаимодействие генотип × год – 9,3 %.

Таким образом, условия года определяют уровень признака в большей степени, чем аллельный состав, но распределение образцов по группам сохраняется. Это означает, что значения показателя между годами несопоставимы и селекционную оценку материала необходимо проводить только относительно стандартов внутри одного года.

Величина осадка SDS-седиментации показывает количество гелеобразующего глютенина и используется как косвенный метод определения силы клейковины и хлебопекарных качеств [Tian et al., 2021]. У тритикале связь этого показателя с характеристиками качества зерна и хлебопекарной оценкой на выборке из 98 сортов и линий была изучена нами ранее [Кибкало и др., 2013].

Показатели качества зерна изученных сортов и линий в 2024 г. приведены в таблице 3. У сорта КС 1 в этом году определена только величина осадка SDS-седиментации. Фаринографический анализ и лабораторная выпечка не проводились.

Таблица 3 – ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЗЕРНА ИЗУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ, 2024 г.

Генотип	Величина осадка SDS-седиментации, мм	Число валориметра, ед. вал.	Разжижение теста, ед. ф.	Объем хлеба, см³	Пористость мякиша, балл
Георг (st)	28	49	125	640	3,7
Зубр (st)	23	37	150	640	4,2
Валентин 90 (st)	25	43	120	720	4,8
КС 1	22	—	—	—	—
Тайча	22	40	125	570	2,8
DH-53	28	31	135	620	4,3
Л. № 5	27	31	140	650	4,5
Л. № 19	22	40	150	640	4,4
Л. № 35	27	27	160	660	4,3
Л. № 36	27	33	140	710	4,8
Л. № 38	26	26	175	650	3,0
Л. № 39	26	31	165	620	4,5
$НСР_{05}$	1,3	5,1	14	—	0,4

По числу валориметра лидером стал сорт Георг (49), минимальное значение было у Л. № 38 (26). Сорта-стандарты Георг и Валентин 90 (43) достоверно превышали большинство генотипов. По показателю разжижения теста наилучшие результаты показали сорт Валентин 90 (120 ед. ф.), а также сорта Георг и Тайча (по 125 ед. ф.), худший показатель зафиксирован у Л. № 38 (175 ед. ф.). Наибольшая пористость хлеба отмечена у сорта Валентин 90 и Л. № 36 (по 4,8 балла), наименьшая у сорта Тайча (2,8 балла) и Л. № 38 (3,0 балла). Остальные генотипы имели промежуточные значения от 3,7 до 4,5 балла.

Объем хлеба варьировал от 570 см³ у сорта Тайча до 720 см³ у сорта Валентин 90 (рисунок 1).

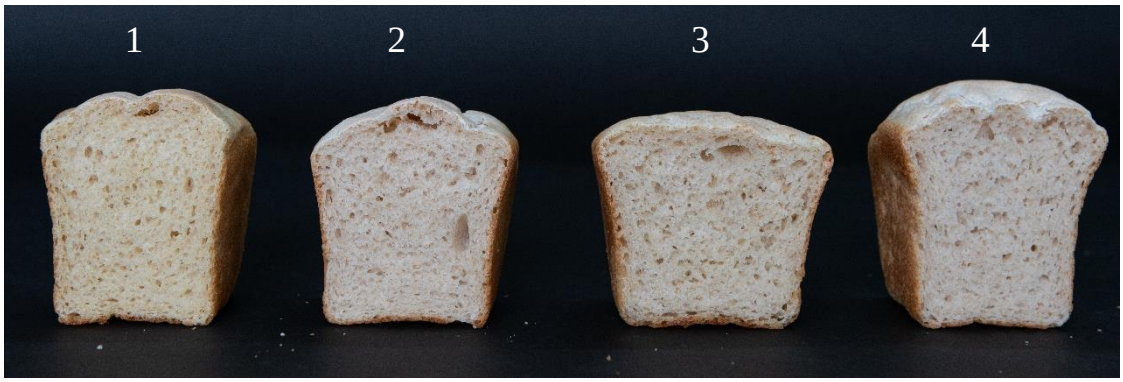


Рисунок 1 – Лабораторная выпечка сортов и линий озимого тритикале.

1 – линия № 36, 2 – Георг, 3 – Зубр, 4 – Валентин 90

Различий между группами, отличающимися по аллельному составу локуса *Glu-A1,* по числу валориметра, разжижению теста и пористости хлеба не выявлено. Из таблицы 3 видно, что распределение генотипов по показателям не всегда совпадает. Сорт Георг, имеющий самое большое число валориметра, уступал по пористости хлеба. Сорт Валентин 90 при высоком числе валориметра (43) и Л. № 36 при сравнительно невысоком (33) имели лучшие значения по пористости и максимальный объем хлеба. Это показывает, что отдельные показатели характеризуют лишь отдельную сторону качества зерна – состояние белкового полимера, реологические свойства теста или готовое изделие. Дополнительный вклад вносят условия года, доля которых в общей изменчивости признаков значительна. Поэтому анализ селекционного материала требует использования нескольких показателей, характеризующих разные стороны качества.

Обсуждение.

Описанный в литературе аллельный состав европейских сортов тритикале отличается от изученного нами материала. Аллель *Glu-A1b (2*)* встречается более чем в половине нашей выборки, тогда как в европейской он преобладает почти полностью. Доля нулевого аллеля в нашем материале значительно выше, чем показано другими исследователями

[Vyhnánek et al., 2013]. Кроме того, аллель e локуса *Glu-R1*, редко встречающийся в литературе, обнаружен у двух сортов тритикале селекции ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока». Возможно, это связано с тем, что изученные генотипы имеют иную селекционную базу (межвидовые гибриды и формы из североамериканских и восточноевропейских регионов) и формировались при совершенно других условиях отбора (суровые бесснежные зимы и жаркое сухое лето).

Отсутствие различий по локусу *Glu-B1*, вероятно, связано с малым объемом выборки. По локусу *Glu-R1* среди изученных генотипов носители аллеля *e* одновременно несут нулевой аллель *Glu-A1*. Вследствие этого выделить вклад каждого локуса отдельно не представляется возможным.

Связь аллельного состава наблюдается только с величиной осадка SDS-седиментации и не прослеживается с реологическими характеристиками теста и хлебопекарной оценкой, поскольку седиментация напрямую характеризует свойства белковой фракции, которую кодируют изучаемые локусы. Реологические показатели теста формируются под совокупным влиянием белкового и углеводного комплексов. У тритикале эта система устроена еще сложнее, чем у пшеницы. Активность α-амилазы существенно выше, а число падения зависит не только от нее, но и от концентрации некрахмальных полисахаридов и соотношения полимерной и мономерной фракций белка [Camerlengo, Kiszonas, 2023]. В таком сложном механизме выделить вклад отдельных локусов не представляется возможным.

Качество зерна, в том числе свойства самого белкового комплекса, определяется совместным действием множества локусов (высоко- и низкомолекулярных глютенинов, секалинов), соотношением белковых фракций и условиями формирования зерна, поэтому отдельный локус может закрыть лишь часть изменчивости. Полученный результат по локусу *Glu-A1* следует рассматривать не как маркер, прогнозирующий качество, а

как свидетельство того, что он входит в число факторов, влияющих на состояние белкового комплекса.

Полученные результаты имеют практическую значимость для организации оценки селекционного материала. Показатель величины осадка SDS-седиментации информативен для сравнения генотипов между собой, но только в пределах одного года. Браковка по фиксированному значению без пересчета относительно стандартов текущего года приведет к ошибкам. Малая навеска и высокая производительность подтверждают пригодность метода для массовой оценки материала на ранних этапах селекции [Clarke et al., 2010].

Отдельного внимания заслуживает вопрос об изменении экспрессии локусов запасных белков в аллополиплоидном геноме тритикале, для которого описано явление межгеномной супрессии, контролируемой метилированием ДНК [Feldman, Levy, 2012]. Относительно запасных белков отмечено, что субъединицы, кодируемые хромосомой 1A, могут не выявляться у некоторых линий при сохранении хромосомного состава. Это явление связывают с сайленсингом этих аллелей [Li et al., 2015]. Исходя из этого, электрофорез запасных белков характеризует фактически синтезированный состав субъединиц. Поскольку качество зерна определяется накопленным белком, анализ белкового профиля может быть информативным в селекционной оценке.

Перспектива дальнейшей работы в этом направлении связана с увеличением объема исследуемых линий, расширением анализа на низкомолекулярные фракции *Glu-A3* и *Glu-B3*, относящиеся к наиболее полиморфным [Amiour et al., 2002], и определением их вклада в формирование качества зерна.

Выводы.

У 12 изученных образцов озимого тритикале было выявлено семь различных сочетаний аллелей локусов *Glu-A1, Glu-B1 и Glu-R1*. Генотипы, несущие субъединицы *Glu-A1*, достоверно превышали по величине осадка SDS-седиментации образцы, имеющие нулевой аллель, на величину от 4,5 до 7,0 мм. По локусам *Glu-B1* и *Glu-R1* различий по величине осадка между группами выявлено не было. На долю влияния года в показателе седиментации приходится 63,6 %, на долю генотипа – 23,8 % (в том числе на долю аллельного состава локуса *Glu-A1* 17,0 %). Вследствие этого значения по этому показателю между годами несопоставимы и оценку селекционного материала следует проводить в пределах одного года относительно стандартов. Связи реологических характеристик теста и хлебопекарной оценки с аллельным составом не установлено.

Список литературы.

1. Бебякин, В. М. Информативность показателя ДСН-седиментации в связи с селекцией яровой твёрдой пшеницы / В. М. Бебякин, М. В. Бутина, Н. С. Васильчук // Доклады ВАСХНИЛ. – 1987. – № 3. – С. 3–5.

2. Грабовец, А. И. Тритикале : монография / А. И. Грабовец, А. В. Крохмаль. – Ростов-на-Дону : Юг, 2018. – 240 с.

3. Дифференциация сортов и линий тритикале по объёму осадка SDS-седиментации / И. А. Кибкало, Т. И. Дьячук, В. Н. Акинина, А. В. Поминов, Ю. В. Итальянская, Н. Ф. Сафронова, Л. П. Медведева // Зерновое хозяйство России. – 2013. – № 4. – С. 12–15.

4. Allelic variation of HMW and LMW glutenin subunits, HMW secalin subunits and 75K gamma-secalins of hexaploid triticale / N. Amiour, M. Dardevet, D. Khelifi, A. Bouguennec, G. Branlard // Euphytica. – 2002. – Vol. 123, № 2. – P. 179–186. – DOI: 10.1023/A:1014992525992.

5. Camerlengo, F. Genetic factors influencing triticale quality for food / F. Camerlengo, A. M. Kiszonas // Journal of Cereal Science. – 2023. – Vol. 113. – Art. 103744. – DOI: 10.1016/j.jcs.2023.103744.

6. Gluten index compared with SDS-sedimentation volume for early generation selection for gluten strength in durum wheat / F. R. Clarke, J. M. Clarke, N. A. Ames, R. E. Knox, R. J. Ross // Canadian Journal of Plant Science. – 2010. – Vol. 90, № 1. – P. 1–11. – DOI: 10.4141/CJPS09035.

7. Feldman, M. Genome evolution due to allopolyploidization in wheat / M. Feldman, A. A. Levy // Genetics. – 2012. – Vol. 192, № 3. – P. 763–774. – DOI: 10.1534/genetics.112.146316.

8. Laemmli, U. K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 / U. K. Laemmli // Nature. – 1970. – Vol. 227, № 5259. – P. 680–685. – DOI: 10.1038/227680a0.

9. Spontaneous and divergent hexaploid triticales derived from common wheat × rye by complete elimination of D-genome chromosomes / H. Li, X. Guo, C. Wang, W. Ji // PLoS ONE. – 2015. – Vol. 10, № 3. – e0120421. – DOI: 10.1371/journal.pone.0120421.

10. Lukaszewski, A. J. Cytogenetically engineered rye chromosomes 1R to improve bread-making quality of hexaploid triticale / A. J. Lukaszewski // Crop Science. – 2006. – Vol. 46, № 5. – P. 2183–2194. – DOI: 10.2135/cropsci2006.03.0135.

11. Payne, P. I. Catalogue of alleles for the complex gene loci Glu-A1, Glu-B1 and Glu-D1 which code for high-molecular-weight subunits of glutenin in hexaploid wheat / P. I. Payne, G. J. Lawrence // Cereal Research Communications. – 1983. – Vol. 11, № 1. – P. 29–35.

12. Singh, N. K. A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin / N. K. Singh, K. W. Shepherd, G. B. Cornish // Journal of Cereal Science. – 1991. – Vol. 14, № 3. – P. 203–208. – DOI: 10.1016/S0733-5210(09)80039-4.

13. Spetsov, P. Allelic variation of high-molecular-weight glutenin genes in Triticum species and triticale (× Triticosecale Wittmack) / P. Spetsov, N. Daskalova // OBM Genetics. – 2024. – Vol. 8, № 2. – Art. 225. – DOI: 10.21926/obm.genet.2402225.

14. Identification and validation of stable quantitative trait loci for SDS-sedimentation volume in common wheat (*Triticum aestivum* L.) / S. Tian, M. Zhang, J. Li, S. Wen, C. Bi, H. Zhao, C. Wei, Z. Chen, J. Yu, X. Shi, R. Liang, C. Xie, B. Li, Q. Sun, Y. Zhang, M. You // Frontiers in Plant Science. – 2021. – Vol. 12. – Art. 747775. – DOI: 10.3389/fpls.2021.747775.

15. Vyhnánek, T. Glu-1 alleles and prediction of bread-making quality traits in triticale / T. Vyhnánek, E. Halouzková, P. Martinek // Cereal Research Communications. – 2013. – Vol. 41, № 4. – P. 562–572. – DOI: 10.1556/CRC.2013.0025.

References

1. Bebjakin, V. M. Informativnost' pokazatelja DSN-sedimentacii v svjazi s selekciej jarovoj tvjordoj pshenicy / V. M. Bebjakin, M. V. Butina, N. S. Vasil'chuk // Doklady VASHNIL. – 1987. – № 3. – S. 3–5.

2. Grabovec, A. I. Tritikale : monografija / A. I. Grabovec, A. V. Krohmal'. – Rostov-na-Donu : Jug, 2018. – 240 s.

3. Differenciacija sortov i linij tritikale po ob#jomu osadka SDS-sedimentacii / I. A. Kibkalo, T. I. D'jachuk, V. N. Akinina, A. V. Pominov, Ju. V. Ital'janskaja, N. F. Safronova, L. P. Medvedeva // Zernovoe hozjajstvo Rossii. – 2013. – № 4. – S. 12–15.

4. Allelic variation of HMW and LMW glutenin subunits, HMW secalin subunits and 75K gamma-secalins of hexaploid triticale / N. Amiour, M. Dardevet, D. Khelifi, A. Bouguennec, G. Branlard // Euphytica. – 2002. – Vol. 123, № 2. – P. 179–186. – DOI: 10.1023/A:1014992525992.

5. Camerlengo, F. Genetic factors influencing triticale quality for food / F. Camerlengo, A. M. Kiszonas // Journal of Cereal Science. – 2023. – Vol. 113. – Art. 103744. – DOI: 10.1016/j.jcs.2023.103744.

6. Gluten index compared with SDS-sedimentation volume for early generation selection for gluten strength in durum wheat / F. R. Clarke, J. M. Clarke, N. A. Ames, R. E. Knox, R. J. Ross // Canadian Journal of Plant Science. – 2010. – Vol. 90, № 1. – P. 1–11. – DOI: 10.4141/CJPS09035.

7. Feldman, M. Genome evolution due to allopolyploidization in wheat / M. Feldman, A. A. Levy // Genetics. – 2012. – Vol. 192, № 3. – P. 763–774. – DOI: 10.1534/genetics.112.146316.

8. Laemmli, U. K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4 / U. K. Laemmli // Nature. – 1970. – Vol. 227, № 5259. – P. 680–685. – DOI: 10.1038/227680a0.

9. Spontaneous and divergent hexaploid triticales derived from common wheat × rye by complete elimination of D-genome chromosomes / H. Li, X. Guo, C. Wang, W. Ji // PLoS ONE. – 2015. – Vol. 10, № 3. – e0120421. – DOI: 10.1371/journal.pone.0120421.

10. Lukaszewski, A. J. Cytogenetically engineered rye chromosomes 1R to improve bread-making quality of hexaploid triticale / A. J. Lukaszewski // Crop Science. – 2006. – Vol. 46, № 5. – P. 2183–2194. – DOI: 10.2135/cropsci2006.03.0135.

11. Payne, P. I. Catalogue of alleles for the complex gene loci Glu-A1, Glu-B1 and Glu-D1 which code for high-molecular-weight subunits of glutenin in hexaploid wheat / P. I. Payne, G. J. Lawrence // Cereal Research Communications. – 1983. – Vol. 11, № 1. – P. 29–35.

12. Singh, N. K. A simplified SDS-PAGE procedure for separating LMW subunits of glutenin / N. K. Singh, K. W. Shepherd, G. B. Cornish // Journal of Cereal Science. – 1991. – Vol. 14, № 3. – P. 203–208. – DOI: 10.1016/S0733-5210(09)80039-4.

13. Spetsov, P. Allelic variation of high-molecular-weight glutenin genes in Triticum species and triticale (× Triticosecale Wittmack) / P. Spetsov, N. Daskalova // OBM Genetics. – 2024. – Vol. 8, № 2. – Art. 225. – DOI: 10.21926/obm.genet.2402225.

14. Identification and validation of stable quantitative trait loci for SDS-sedimentation volume in common wheat (*Triticum aestivum* L.) / S. Tian, M. Zhang, J. Li, S. Wen, C. Bi, H. Zhao, C. Wei, Z. Chen, J. Yu, X. Shi, R. Liang, C. Xie, B. Li, Q. Sun, Y. Zhang, M. You // Frontiers in Plant Science. – 2021. – Vol. 12. – Art. 747775. – DOI: 10.3389/fpls.2021.747775.

15. Vyhnánek, T. Glu-1 alleles and prediction of bread-making quality traits in triticale / T. Vyhnánek, E. Halouzková, P. Martinek // Cereal Research Communications. – 2013. – Vol. 41, № 4. – P. 562–572. – DOI: 10.1556/CRC.2013.0025.