

УДК 573.6

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

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОРТОВ И ДН-ЛИНИЙ ОЗИМОГО ТРИТИКАЛЕ К ПРЕДУБОРОЧНОМУ ПРОРАСТАНИЮ ЗЕРНА

Акинина Виктория Николаевна
кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
<https://orcid.org/0000-0003-3661-9246>
SPIN-код: 8214-4177, AuthorID:819864
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока», Россия, Саратов, 410010, Тулайкова, 7

Дьячук Таисия Ивановна
доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
<https://orcid.org/0000-0001-7420-0521>
SPIN-код: 9680-9522, AuthorID:151311
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока», Россия, Саратов, 410010, Тулайкова, 7

Жилин Степан Владимирович
научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
<https://orcid.org/0000-0001-0001-6181-5279>
SPIN-код:3519-2504, AuthorID:1128275
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока», Россия, Саратов, 410010, Тулайкова, 7

Хомякова Олеся Викторовна
кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
<https://orcid.org/0000-0002-5218-6076>
SPIN-код:2422-7804, AuthorID:780902
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока», Россия, Саратов, 410010, Тулайкова, 7

Генералова Ольга Александровна
лаборант-исследователь
<https://orcid.org/0009-0007-0146-5001>
SPIN-код:8203-6449, AuthorID:1268281
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока», Россия, Саратов, 410010, Тулайкова, 7

Калашникова Элла Вячеславовна
научный сотрудник лаборатории клеточной селекции
<https://orcid.org/0000-0002-3870-0542>
SPIN-код:8553-5195, AuthorID:1023593
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока», Россия, Саратов, 410010,

UDC 573.6

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

COMPLEX EVALUATION OF THE VARIETIES AND DH LINES OF WINTER TRITICALE FOR PRE-HARVEST GRAIN SPROUTING

Akinina Viktoriya Nikolaevna
Cand. Biol. Sci., leading researcher, lab. cell selection,
<https://orcid.org/0000-0003-3661-9246>
RSCI SPIN-code: 8214-4177, AuthorID: 819864
Federal State Budgetary Scientific Organization
«Federal Center of Agricultural Research of the South-East Region», 7, Toulaiikova, 410010, Saratov, Russia

Dyachuk Taisiya Ivanovna
Dr.Sci.Biol., main researcher, lab. cell selection
<https://orcid.org/0000-0001-7420-0521>
RSCI SPIN-code: 9680-9522, AuthorID: 151311
Federal State Budgetary Scientific Organization
«Federal Center of Agricultural Research of the South-East Region»
7, Toulaiikova, 410010, Saratov, Russia

Zhilin Stepan Vladimirovich
research worker, lab. cell selection
<https://orcid.org/0000-0001-0001-6181-5279>
RSCI SPIN-code:3519-2504, AuthorID:1128275
Federal State Budgetary Scientific Organization
«Federal Center of Agricultural Research of the South-East Region», 7, Toulaiikova, 410010, Saratov, Russia

Khomyakova Olesya Viktorovna
Cand. Biol. Sci., leading researcher, lab. cell selection
<https://orcid.org/0000-0002-5218-6076>
RSCI SPIN-code: 2422-7804, AuthorID:780902
Federal State Budgetary Scientific Organization
«Federal Center of Agricultural Research of the South-East Region», 7, Toulaiikova, 410010, Saratov, Russia

Generalova Olga Aleksandrovna
Research Assistant, lab. cell selection
<https://orcid.org/0009-0007-0146-5001>
RSCI SPIN-код:8203-6449, AuthorID:1268281
Federal State Budgetary Scientific Organization
«Federal Center of Agricultural Research of the South-East Region», 7, Toulaiikova, 410010, Saratov, Russia

Kalashnikova Ella Vyacheslavovna
research worker, lab. cell selection
<https://orcid.org/0000-0002-3870-0542>
RSCI SPIN-code:8553-5195, AuthorID:1023593
Federal State Budgetary Scientific Organization
«Federal Center of Agricultural Research of the South-East Region», 7, Toulaiikova, 410010, Saratov, Russia

Тулайкова, 7

Куликова Вероника Павловна
младший научный сотрудник лаборатории
клеточной селекции
<https://orcid.org/0000-0003-3071-0188>
SPIN-код:4115-7291, AuthorID:1181780
cell-selection@list.ru
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр
Юго-Востока», Россия, Саратов, 410010,
Тулайкова, 7

Селекция на устойчивость к предуборочному прорастанию зерна является приоритетным направлением в различных селекционных лабораториях. При прорастании зерна снижается урожай, ухудшаются физические и технологические свойства зерна, что приводит к значительным экономическим потерям. В настоящем исследовании проведена комплексная оценка 3 сортов и 31 ДН-линии озимого тритикале к предуборочному прорастанию зерна. Установлено, что при искусственной провокации прорастания зерна в чашках Петри 8 образцов (23,5%) были устойчивыми с индексом прорастания от 0 до 0,2; 21 (61,8%) обладали средней устойчивостью с индексом прорастания 0,2-0,5 и 5 (14,7%) были неустойчивыми. Связь индекса прорастания зерна с числом падения не была однозначной. У некоторых ДН-линий (№№ 4, 6, 34) высокие значения числа падения (ЧП) соответствовали низкому значению индекса прорастания (ИП), и они характеризовались как устойчивые. В то же время ДН-линии №№24 и 25 имели низкие значения индекса прорастания при низких показателях числа падения. Для более надежной оценки устойчивости к предуборочному прорастанию зерна показатель «число падения» может применяться только в комплексе с другими методами. Применение молекулярных STS-маркеров на аллельное состояние гена *Vp-1* показало, что большая часть изученных образцов имела аллель *Vp-1Bc* – 64,7%. При сопоставлении аллеля гена *Vp-1* и ИП было выявлено, что из 22 образцов, несущих *Vp-1Bc*, 7 были устойчивыми, 14 – среднеустойчивыми и 1 неустойчивым. В тоже время, среди генотипов, несущих аллель *Vp-1Ba*, 1 был устойчивым, 7 – среднеустойчивыми и 4 – неустойчивыми. Устойчивые ДН-линии (№№ 4, 6, 21, 25, 26, 34 и 40) имели аллельный вариант *Vp-1Bc* и одна линия (№24) – *VP-1Ba*. Выявлена статистически значимая отрицательная корреляция аллельного состояния гена *Vp-1* и ИП (-0,46*) и статистически не значимая связь с ЧП

Ключевые слова: ТРИТИКАЛЕ, СЕЛЕКЦИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ К ПРЕДУБОРОЧНОМУ ПРОРАСТАНИЮ ЗЕРНА, МЕТОДЫ

Kulikova Veronika Pavlovna
junior researcher, lab. cell selection
<https://orcid.org/0003-3071-0188>
RSCI SPIN-code:4115-7291, AuthorID:1181780
cell-selection@list.ru
Federal State Budgetary Scientific Organization
«Federal Center of Agricultural Research of the South-East Region», 7, Toulaiikova, 410010, Saratov, Russia

Breeding for resistance to pre-harvest grain sprouting is a priority in various breeding laboratories. The grain sprouting causes serious economic losses due to reduction in both grain yield as well as end-use quality. In this study, a comparative analysis of 3 varieties and 31 DH lines of winter triticale for pre-harvest grain sprouting was carried out. It was found that with artificial provocation of grain germination in Petri dishes, 8 samples (23,5%) were resistant with a germination index from 0 to 0.2; 21 (61,8%) had average resistant with a germination index of 0.2-0.5 and 5 (14,7%) were susceptible. The relationship between the grain germination index and the falling number was not unambiguous. In some DH lines (Nos. 4, 6, 34), high values of the falling number corresponded to a low value of the germination index, and they were characterized as resistant. At the same time, DH lines Nos.24 and 25 had low germination index values with low falling number rates. For a more reliable assessment of the resistance to pre-harvest grain sprouting, the falling number indicator can only be used in combination with other methods. The use of molecular STS markers on the allelic state of the *Vp-1* gene showed that the majority of the studied samples had the *Vp-1Bc* allele (64,7%). By comparing the *Vp-1* gene alleles and germination index, out of 22 samples carrying *Vp-1Bc*, 7 samples were resistant, 14 - medium-resistant, and 1 - susceptible. At the same time, among the genotypes carrying the *Vp-1Ba* allele, 1 was resistant, 7 - medium-resistant, and 4 samples were susceptible. Resistant DH lines (№№ 4, 6, 21, 25, 26, 34 and 40) had the *Vp-1Bc* allele variant and one line (№24) – *VP-1Ba*. A weak statistically significant negative correlation (-0.46*) of the allelic state of the *Vp-1* gene and germination index and a statistically insignificant association with falling number was revealed

Keywords: TRITICALE, BREEDING, PRE-HARVEST SPROUTING, METHODS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-211-043>

<http://ej.kubagro.ru/2025/07/pdf/43.pdf>

Введение. Тритикале ($\times$ *Triticosecale* Wittmack) – искусственный гибрид злака, полученный от скрещивания пшеницы с рожью, который сочетает высокий урожай и питательную ценность пшеницы с адаптивностью ржи. В условиях нарастания аридизации и континентальности климата проявилась высокая конкурентная способность этого вида по сравнению с другими злаками, культура приспособлена к возделыванию в различных климатических и других абиотических стрессовых условиях, включая разные типы почв (Blum, 2014; Arseniuk, 2015). На современном этапе благодаря комплексным исследованиям генетиков, цитологов и селекционеров тритикале является коммерческой культурой многоцелевого назначения, обладающей огромным потенциалом в качестве продукта питания человека и корма для животных (Blum, 2014; Грабовец и Крохмаль, 2019; Mergoum, 2019; Ковтуненко и др., 2022). Посевные площади под новой зерновой культурой в мире достигают 4 млн га, производство зерна – около 14 млн т.

Недостатком культуры является самая высокая среди зерновых культур способность к прорастанию зерна на корню. Селекция на устойчивость к предуборочному прорастанию зерна (ППЗ) является одним из приоритетных направлений во многих селекционных центрах. При прорастании зерна разрушается крахмал, деградируют белки, ухудшаются физические и технологические свойства зерна, что приводит к большим экономическим потерям (Singh et al., 2021; Moullet et al., 2022). В связи с глобальным изменением климата риски ППЗ увеличиваются (Singh и др, 2021). Сохранение состояния покоя является основным фактором, влияющим на устойчивость к ППЗ. Покой семян регулируется различными генами и их взаимодействием с факторами окружающей среды. К таким факторам относятся продолжительные дожди, повышенная влажность воздуха, температура ниже нормы, засуха и высокие температуры, а также морфологические особенности колоса (Singh и др, 2021; Федяева и др.,

2023). Наличие остей, плотность колоса, проницаемость семенной оболочки, цвет семенной оболочки зерна – все эти факторы оказывают влияние на устойчивость к ППЗ. Сорты пшеницы, имеющие красный цвет зерна, более устойчивы к ППЗ, чем белозерные. Структура воска, а не его количество, является важным фактором для отталкивания воды в колосе (Singh et al., 2021). Растительные гормоны, такие как абсцизовая кислота (АБК) и гибберелловая (ГК) играют важную роль в регуляции покоя семян и прорастания зерна. Абсцизовая кислота определяет покой, а ГК стимулирует прорастание семян.

Определяющую роль в устойчивости к ППЗ играют специфические гены, которые находятся в локусах QTL/QphsR (Quantitative preharvest sprouting Resistance). Полногеномные ассоциативные исследования (Genome wide association studies, GWAS) подтвердили, что QTL и гены к признакам, контролирующим покой семян и ППЗ, обнаружены почти на всех хромосомах.

Важную роль в устойчивости к предуборочному прорастанию играют *Vp*-гены, контролирующие развитие зародыша и покой семян. Гомеологичные гены *Vp-1A* и *Vp-1B* расположены на длинных плечах хромосомы 3A и 3B. Для каждого из них выявлено несколько аллельных вариантов. Полиморфизм по генам *Vp-1A* и *Vp-1B* позволил идентифицировать аллели, связанные с устойчивостью к ППЗ и разработать для них STS-маркеры (Yang et al;2007;Chang et al., 2010). Показано наличие зависимости между аллельным состоянием гена *Vp-1B* и интенсивностью окрашивания зерновки у тритикале. Образцы с темно-красным зерном имели аллель *Vp-1Bc*, со светло-красным - аллель *Vp-1a*. Однако, по мнению авторов, вопрос о влиянии окраски зерна и гена *Vp-1* на устойчивость к предуборочному прорастанию зерна является дискуссионным (Divashuk et al., 2012).

Для оценки образцов к предуборочному прорастанию зерна используют различные методы: перестоя растений на корню, искусственная провокация прорастания и молекулярно-генетические методы.. Достоинством метода провокации прорастания во влажной камере является максимальное приближение искусственных условий к естественным. Преимуществами метода провокации прорастания свежееубранного зерна в чашках Петри являются простота исполнения, одинаковая влажность и одинаковая возможность поглощения воды зерном. По мнению некоторых авторов, эта оценка является наиболее надежной для дифференциации сортов по их устойчивости к ППЗ (Biddulph, 2008; De Laethauwer et al., 2013).

Показатель «число падения», также называемый числом Хагберга-Пертена, как косвенный метод оценки ППЗ – международный стандартизированный и наиболее популярный метод (Радченко и др., 2018). Этот показатель используется для оценки активности фермента альфа-амилазы и отражает состояние углеводно-амилазного комплекса: чем выше активность альфа-амилазы, тем быстрее будет гидролизироваться крахмал и тем ниже будет число падения. Начиная от стадии молочной спелости и все последующие стадии созревания зерновки, альфа амилаза проявляет более высокую активность у тритикале в сравнении с пшеницей и рожью. В конце созревания активность этого фермента в 3-4 раза выше у тритикале в сравнении с родительскими формами (De Laethauwer et al., 2013).

Применение молекулярно-генетических методов, которые дифференцируют исходный материал по устойчивости, позволяет идентифицировать не только целые гены, но и их аллельные варианты, что крайне важно на всех этапах селекционного процесса.

Целью настоящего исследования было комплексное изучение сортов и ДН линий озимого гексаплоидного тритикале на устойчивость к

прорастанию зерна на корню, а также анализ корреляционных связей между индексом прорастания, числом падения и аллельным статусом гена *Vp-1*.

Материал и методы. Материалом для анализа служил набор из 31 ДН линии, а также сортов озимого гексаплоидного тритикале Зубр, Георг и Валентин 90, допущенных к возделыванию в Нижневолжском регионе. Растения выращивали в полевых условиях селекционного севооборота ФАНЦ Юго-Востока (г. Саратов).

Для оценки линий озимого тритикале на устойчивость к ППЗ применяли искусственную провокацию прорастания путем проращивания зерна в чашках Петри. Зерновки, отобранные в фазу полной спелости, стерилизовали коммерческим препаратом «Белизна» в течение 8-10 мин. с последующей трехкратной промывкой дистиллированной водой. Лабораторная повторность опытов двухкратная. В каждой чашке Петри находилось по 25 зерен. Индекс прорастания (ИП) определяли по формуле:
$$\text{ИП} = \frac{7n_1 + 6n_2 + 5n_3 + 4n_4 + 3n_5 + 2n_6 + n_7}{\text{количество дней проращивания}}$$
 где n_1 - n_7 число проросших зерен на 1-й, 2-й и последующие дни. Индекс прорастания варьирует от 0 до 1. Генотипы с ИП до 0,2 считаются устойчивыми к ППЗ; ИП от 0,2 до 0,5 – среднеустойчивыми, способными прорасти при благоприятных условиях; ИП от 0,5 до 1 – восприимчивые к прорастанию зерна на корню (Biddulph, 2008).

Число падения (ЧП) определяли на приборе Falling Number 1700 по методу Хагберга-Пертена.

Молекулярно-генетический анализ проведен для выявления аллельных вариантов гена *Vp-1*. ДНК выделяли с помощью коммерческого набора Экстран 3 ЗАО «Синтол» (Москва) из листьев молодых проростков. Анализ образцов на выявления аллелей гена *Vp-1B* проводили с использованием STS маркера *Vp-1B3* (*Vp-1B3F/R* 5'-TGCTCCTTTCCCAATTGG-3'; 5'-ACCCTCCTGCAGCTCATT G-3').

Условия ПЦР реакции: 94 °С 5минут; 36 циклов 94°С 1 минута, 61 °С 1 минута, 72 °С 1 минута; финальная элонгация 72°С 10 минут [17]. Продукты ПЦР реакции визуализировали в 1,5% агарозном геле (18).

Результаты исследований

В ходе эксперимента было проанализировано 34 генотипа (3 сорта и 31 ДН-линия), из которых высокой устойчивостью к ППЗ (ИП до 0,2) отличались 8 (23,5%) образцов, средней устойчивостью (ИП от 0,2 до 0,5) наблюдалось у 21 (61,8%) и неустойчивыми (ИП более 0,5) оказались 5 линий(14,7%). Значения ИП варьировали от 0 до 0,8 (табл.1).

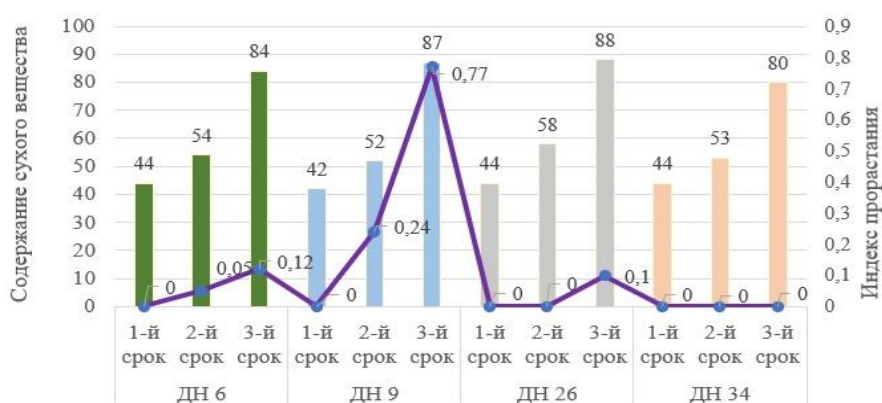
Таблица 1 – Показатели устойчивости сортов и ДН-линий тритикале к предуборочному прорастанию зерна и аллельный статус гена *Vp- 1B*

ДН линия, сорт	ИП	ЧП, сек	Аллель гена <i>Vp- 1B</i>
Зубр	0,5	66	<i>Vp-1Ba</i>
Георг	0,6	166	<i>Vp-1Bc</i>
Валентин 90	0,5	77	<i>Vp-1Bc</i>
1	0,5	87	<i>Vp-1Bc</i>
2	0,5	105	<i>Vp-1Ba</i>
3	0,5	133	<i>Vp-1Bc</i>
4	0,1	218	<i>Vp-1Bc</i>
6	0,1	153	<i>Vp-1Bc</i>
7	0,5	78	<i>Vp-1Ba</i>
9	0,7	62	<i>Vp-1Ba</i>
10	0,5	78	<i>Vp-1Ba</i>
11	0,6	67	<i>Vp-1Bc</i>
12	0,4	167	<i>Vp-1Ba</i>
13	0,5	117	<i>Vp-1Ba</i>
17	0,3	63	<i>Vp-1Ba</i>
18	0,4	106	<i>Vp-1Bc</i>
19	0,5	124	<i>Vp-1Ba</i>
20	0,4	106	<i>Vp-1Bc</i>
21	0,2	92	<i>Vp-1Bc</i>
22	0,4	67	<i>Vp-1Ba</i>
23	0,5	86	<i>Vp-1Bc</i>
24	0,2	110	<i>Vp-1Ba</i>
25	0,1	107	<i>Vp-1Bc</i>
26	0,1	196	<i>Vp-1Bc</i>
28	0,5	90	<i>Vp-1Bc</i>
29	0,5	100	<i>Vp-1Bc</i>
30	0,5	65	<i>Vp-1Bc</i>
31	0,4	106	<i>Vp-1Bc</i>
32	0,8	87	<i>Vp-1Ba</i>
33	0,5	139	<i>Vp-1Bc</i>
34	0	156	<i>Vp-1Bc</i>
39	0,7	102	<i>Vp-1Ba</i>
40	0,1	116	<i>Vp-1Bc</i>
44	0,6	87	<i>Vp-1Bc</i>
НСР ₀₅	0,21	79	-

Большинство изучаемых генотипов отличались средней устойчивостью к ППЗ. ЧП у линий и сортов озимого тритикале изменялось от 62 до 218с. Высокое ЧП (свыше 150 сек) отмечалось у 6 образцов, к числу которых относился и сорт Георг. Значения ЧП у устойчивых линий (№№4,6,21,24,25,26,34 и 40) варьировали от 107 до 196с. Для некоторых

ДН-линий (№4,6,34) высокие (для тритикале) значения ЧП соответствуют низкому значению ИП, т.е. характеризуются как устойчивые. В то же время ДН-линии №24 и №25 имеют низкие показатели ИП при значениях ЧП 110 и 107с, а ДН №33 при значениях ЧП равном 139с характеризуется как среднеустойчивая (ИП-0,5). Таким образом, связь числа падения с индексом прорастания не была однозначной, т.к. показатель «число падения» не всегда отражал отзывчивость линий на провоцирование прорастания зерна. Нельзя проводить оценку одного признака по значениям другого. Для более надежной оценки устойчивости к ППЗ показатель «число падения» необходимо использовать в комплексе с другими методами.

Зерновки неустойчивых к ППЗ линий (ИП 0,2 и выше) начинали прорастать при отборе проб в фазе молочно-восковой спелости (содержание сухого вещества 44-52%), что может свидетельствовать об отсутствии адекватного уровня покоя семян или его отсутствии. У устойчивых линий (ИП 0-0,2) только при 70% содержании сухого вещества



наблюдали единичные проросшие зерновки (рис. 1).

Рисунок 1 – Индекс прорастания и содержание сухого вещества у ДН-линий тритикале

Показано, что у пшеницы, тритикале, ячменя связь между уровнем покоя семян и активностью альфа-амилазы и ее отражением в показателе «число падения» слабая или даже отсутствует (Lin et al., 2008).

Применение стандартных методов оценки качества зерна у тритикале и пшеницы, включая вязкость крахмального клейстера, активность альфа-амилазы, содержание некрахмальных полисахаридов, сырой клетчатки показало большую изменчивость этих показателей у тритикале в отличие от пшеницы. При этом, значительные снижения в активности альфа-амилазы привели лишь к незначительному изменению числа падения. В отличие от пшеницы у тритикале обнаружена тесная отрицательная корреляция числа падения с содержанием клетчатки, нерастворимых полисахаридов, в т.ч. нерастворимых пентозанов, содержащихся во внешних слоях зерновки. Содержание сырой клетчатки у тритикале отрицательно коррелирует с активностью альфа-амилазы. Низкое число падения у тритикале не связано с высокой активностью альфа-амилазы (Dennet et al., 2013). По мнению авторов, необходимы исследования по активности и других ферментов, кроме альфа-амилазы, особенно ферментов, разлагающих некрахмальные полисахариды. У ржи активность ксиланазы проявляет более тесную корреляцию с числом падения, чем активность альфа-амилазы и может быть причиной низкой вязкости крахмального клейстера у тритикале. Как отмечают Грабовец и Крохмаль [2018], «Следует отметить самобытность тритикале как новой культуры. Видимо, нет никакой надобности как-то «причесывать» ее под пшеницу. У этой культуры свои биохимические особенности и с этим следует считаться».

Анализ аллельного состояния гена *Vp-1* у сортов и ДН линий озимого тритикале показал наличие аллелей *Vp-1Ba* (652 п.н.) и *Vp-1Bc* (569 п.н.) (рис.2).

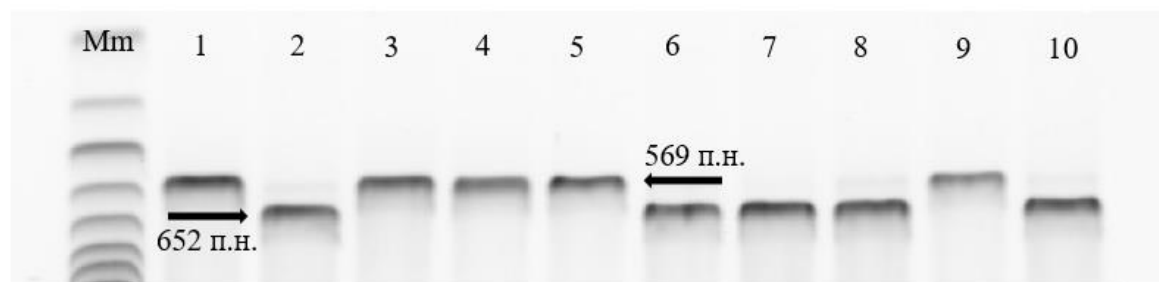


Рисунок 2 - Электрофорез продуктов ПЦР для аллельного состояния генов *Vp- 1*. Дорожки с 1 по 10 – ДН линии озимого тритикале (№№1 – ДН-1, №2 - ДН-2, №3 - ДН-3, №4 - ДН-4, №5 - ДН-6, №6 - ДН-7, №7 - ДН-10, №8 - ДН-12, №9 - ДН-13, №10 - ДН-17)

Большая часть изученных образцов имела аллель *Vp-1Bc* – 64,7%. При сопоставлении аллеля гена *Vp- 1* и ИП было выявлено, что из 22 образцов, несущих *Vp-1Bc*, 7 были устойчивыми, 14 – среднеустойчивыми и 1 неустойчивым. В тоже время, среди генотипов, несущих аллель *Vp-1Ba*, 1 был устойчивым, 7 – среднеустойчивыми и 4 неустойчивых (табл. 2). Как следует из таблицы №1, устойчивые ДН-линии (№№ 4, 6, 24, 25, 26, 34 и 40) имели аллельный вариант *Vp-1Bc*. Исключение составила устойчивая ДН-24, несущая аллельный вариант *Vp-1Ba*

Таблица 2 - Распределение образцов озимого тритикале в зависимости от ИП и аллельного статуса гена *Vp- 1*

	Устойчивые (ИП от 0 до 0,2), шт.	Среднеустойчивые (ИП от 0,2 до 0,5), шт.	Неустойчивые (ИП от 0,5 до 1), шт.	Всего, шт.
<i>Vp-1Bc</i>	7	14	1	22(64,7%)
<i>Vp-1Ba</i>	1	7	4	12 (35,3%)
Всего	8 (23,5%)	21(61,8%)	5 (14,7%)	34

Проведенный корреляционный анализ позволил оценить уровень связи и ее направление для аллелей гена *Vp-1* и ИП, как показателя, непосредственно характеризующего степень устойчивости генотипов к

ППЗ. При анализе связи между показателями ИП и ЧП была выявлена статистически значимая отрицательная корреляция (-0,6**). Анализ корреляции между ИП и аллельными вариантами гена *Vp-1* выявил слабую отрицательную связь (-0,42*). Между ЧП и аллелями гена *Vp-1* обнаружена лишь слабая (положительная) статистически не достоверная связь.

Выводы.

1. Методом искусственной провокации прорастания зерна в чашках Петри и определения индекса прорастания выявлено 8 устойчивых ДН-линий с ИП 0-0,2. Большинство линий и сортов (61,8%) обладали средней устойчивостью (ИП 0,2-0,5).

2. Показатель «число падения» не всегда отражает отзывчивость линий на провоцирование прорастания зерна, т.к. связь числа падения с индексом прорастания не была однозначной. Нельзя проводить оценку одного признака по значениям другого. Для более надежной оценки устойчивости к ППЗ показатель «число падения» необходимо использовать в комплексе с другими методами.

3. Применение молекулярных STS-маркеров на аллельное состояние гена *Vp-1* показало, что большая часть изученных образцов имела аллель *Vp-1Bc* – 64,7%. При сопоставлении аллелей гена *Vp-1* и ИП было выявлено, что из 22 образцов, несущих *Vp-1Bc*, 7 были устойчивыми, 14 – среднеустойчивыми и 1 неустойчивым. В тоже время, среди генотипов, несущих аллель *Vp-1Ba*, 1 был устойчивым, 7 – среднеустойчивыми и 4- неустойчивыми. Устойчивые ДН-линии (№№ 4, 6, 21, 25, 26, 34 и 40) имели аллельный вариант *Vp-1Bc* и одна (№24) – *Vp-1Ba*.

4. Без применения комплексных современных методов оценки фенотипа и генотипа невозможно проводить скрещивания и отбор по устойчивости к ППЗ. ДНК-маркеры могут быть использованы для

генотипирования сортов и линий тритикале по генам, определяющим устойчивость к ППЗ и создания сортов методом маркер-ориентированной селекции. Применение молекулярно-генетических маркеров на тритикале открывает возможности практического повышения эффективности селекционных программ, сохранения биологического разнообразия и использования его компонентов, кроме того, позволяет получить новые фундаментальные знания по частной генетике культуры.

Список использованной литературы

1. Васильчук, Н.С. Селекция яровой твердой пшеницы /Н.С. Васильчук //Монография. - Саратов –2001. –124 с.
2. Грабовец, А.И., ТРИТИКАЛЕ / А.И. Грабовец, А.В. Крохмаль //монография – Ростов-на Дону: ООО Издательство «Юг». –2018. –440с.
3. Ковтуненко, В.Я. Этапы селекции тритикале в НЦЗ им. П.П. Лукьяненко /В.Я. Ковтуненко, В.В. Панченко, А.П. Калмыш //Тритикале: материалы междун. научно-практ. конф. конференции «Селекция, агротехника и технология использования зерна и кормов». (7-8 июня 2022г.). – Ростов-на-Дону, 2022. – С.29-41. DOI: 10.34924/FRARC.2022.44.62.011.
4. Радченко, А.Н. Влияние аллелей гена Vp-1B на устойчивость к предуборочному прорастанию у мягкой пшеницы / А. Н. Радченко, С. И. Михальская, М. О. Дыкун, Л. В. Сирант // Молекулярная и прикладная генетика. – 2018. – Т. 25. – С. 24-31.
5. Рубец, В.С. Сравнительное изучение различных методов оценки устойчивости к прорастанию на корню озимой тритикале / В.С. Рубец, В.В. Пыльнев, Н.Т.Т. Линь //Тритикале: материалы междун. научно-практ. конф. конференции «Генетика, селекция, агротехника, использование зерна и кормов». – Ростов-на-Дону, 2010. – С.146-151. DOI: 10.34924/FRARC.2022.44.62.011
6. Федяева, А. В. Факторы, влияющие на прорастание зерна на корню у мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), и методы их оценки / А. В. Федяева, Е. А. Салина, В. К. Шумный // Генетика. – 2023. – Т. 59, № 1. – С. 5-17. – DOI 10.31857/S0016675823010058.
7. Чახеева, Т. В. Устойчивость к предуборочному прорастанию зерна сортов твердой пшеницы по параметру "число падения" //Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 4(52). – С. 114-120. – DOI 10.18286/1816-4501-2020-4-114-120.
8. Biddulph, T.B. Seasonal conditions influence dormancy and preharvest sprouting tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) in the field /T.B. Biddulph, J.A. Plummer, T.L. Setter, D.J. Mares // Field. Crops Res. –2008. –Vol.107. – P.116-128.
9. Blum, A. The abiotic stress response and adaptation of triticale – a review /A. Blum // Cereal Res. Com. – 2014. –Vol. 42. – P. 359-375. DOI: 10.1556/CRC.42.2014.3.1.
10. Chang, C. Identifying alleles of *Viviparous-1B* associated with pre-harvest sprouting in micro-core collections of Chinese wheat germplasm /C. Chang, Y.P. Zhang, J.M. Feng [et al.] //Mol.Breeding. - 2010. -V.25.- P.481-490. DOI: 10.1007%2Fs11032-009-9346-z.

11. Dennet, A. Characteristics of Modern Triticale Quality: The Relationship Between Carbohydrate Properties, α -Amylase Activity, and Falling Number / A. Dennet, M. Wilkes, R. M. Trethowan // *Cereal Chem.*, - 2013. – 90 (6), P. 594-600. DOI: 10.1094/CCHEM-10-12-0129-R/
- 12.
13. Divashuk, M.G. The association between the allelic state of *Vp-1B* and pre-harvest sprouting tolerance in red seeded hexaploidy triticale / M.G. Divashuk, N. Mayer, P.Yu. Krupin, V.S. Rubets [et al] // *Open J. of Genetics*. 2012. Vol.2(1). P.51-55.
14. De Laethauwer, S. α -Amylase gene expression during kernel development in relation to pre-harvest sprouting in wheat and triticale / De Laethauwer S., De Rick J., Stals I., Reheul D., Haesaert G. // *Acta Physiol. Plant.* 2013. – V.35.- P.2927-2938. DOI: 10.1007/s11738-013-1323-9.
15. Lin, R. Associations between caryopsis dormancy, alpha-amylase activity, and pre-harvest sprouting in barley / R. Lin, R.D Horsley, P.B. Schwarz // *J. Cereal Sci.*, - 2008. - V.48 - P.446-456. DOI: 10.1016/j.jcs.2007.10.009.
16. Mergoum, M. Triticale ($\times$ Triticosecale Wittmack) Breeding / Mergoum, M., Sapkota S., ElFatih A., Naraghi S.M., Pirseyedi S., Alami M.S. and AbuHammad W. // *Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals* M. Al-Khayri et al (eds.): Springer Nature Switzerland. – 2019. – P. 405-451. DOI: 10.1007/978-3-030-23108-8_11.
17. Moullet, O. Pyramiding wheat-pre-harvest sprouting resistance genes in triticale breeding / O. Moullet, G.D Bermudez, D Fossati [et al.] // *Mol. Breeding*. - 2022. - V.42.- P.60.
18. Singh, G. Pre-harvest sprouting in wheat: current status and future prospects / C. Singh, U.R Kamble, V Gupta. [et al.] // *Journal of Cereal Research*. – 2021. – Vol.13 (Spl-1). – P.1-22. DOI:10.25174/2582-2675/2021/114484.
19. Yang, Y. Development and validation of a *Viviparous-1* STS marker for pre-harvest sprouting tolerance in Chinese wheats / Y. Yang., L. Zhao, Q. Xia [et al.] // *Theoretical and Applied Genetics (TAG)*. – 2007. – Vol. 115. - No. 7. – P. 971-980. DOI: 10.1007/s00122-007-0624-z.

References

1. Vasil'chuk, N.S. Selekcija yarovoj tvrdoj pshenicy /N.S. Vasil'chuk // *Monografiya*. - Saratov –2001. –124 s.
2. Grabovec, A.I., TRITIKALE / A.I. Grabovec, A.V. Krohmal' // *monografiya* – Rostov-na Donu: OOO Izdatel'stvo «YUg». –2018. –440s.
3. Kovtunenکو, V.YA. Etapy selekcii tritikale v NCZ im. P.P. Luk'yanenko /V.YA. Kovtunenکو, V.V. Panchenko, A.P. Kalmysh // *Tritikale: materialy mezhdun. nauchno-prakt. konf. konferencii «Selekcija, agrotehnika i tekhnologiya ispol'zovaniya zerna i kormov»*. (7-8 iyunya 2022g.). – Rostov-na-Donu, 2022. – S.29-41. DOI: 10.34924/FRARC.2022.44.62.011.
4. Radchenko, A.N. Vliyanie allelej gena *Vp-1B* na ustojchivost' k preduborochnomu prorastaniyu u myagkoj pshenicy / A. N. Radchenko, S. I. Mihal'skaya, M. O. Dykun, L. V. Sirant // *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika*. – 2018. – T. 25. – S. 24-31.
5. Rubec, V.S. Sravnitel'noe izuchenie razlichnyh metodov ocenki ustojchivosti k prorastaniyu na kornyu ozimoi tritikale / V.S. Rubec, V.V. Pyl'nev, N.T.T. Lin' // *Tritikale: materialy mezhdun. nauchno-prakt. konf. konferencii «Genetika, selekcija, agrotehnika, ispol'zovanie zerna i kormov»*. – Rostov-na-Donu, 2010. –S.146-151. DOI: 10.34924/FRARC.2022.44.62.011

6. Fedyaeva, A. V, Faktory, vliyayushchie na prorastanie zerna na kornyu u myagkoj pshenicy (*Triticum aestivum* L.), i metody ih ocenki / A. V. Fedyaeva, E. A. Salina, V. K. SHumnyj // Genetika. – 2023. – T. 59, № 1. – S. 5-17. – DOI 10.31857/S0016675823010058.
7. CHaheeva, T. V. Ustojchivost' k preduborochnomu prorastaniyu zerna sortov tverdoj pshenicy po parametru "chislo padeniya" //Vestnik Ul'yanovskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. – 2020. – № 4(52). – S. 114-120. – DOI 10.18286/1816-4501-2020-4-114-120.
8. Biddulph, T.B. Seasonal conditions influence dormancy and preharvest sprouting tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) in the field /T.B. Biddulph, J.A. Plummer, T.L. Setter, D.J. Mares // Field. Crops Res. –2008. –Vol.107. – P.116-128.
9. Blum, A. The abiotic stress response and adaptation of triticale – a review /A. Blum // Cereal Res. Com. – 2014. –Vol. 42. – P. 359-375. DOI: 10.1556/CRC.42.2014.3.1.
10. Chang, C. Identifying alleles of Viviparous-1B associated with pre-harvest sprouting in micro-core collections of Chinese wheat germplasm /C. Chang, Y.P. Zhang, J.M. Feng, Yin B. [et al.] //Mol.Breeding.- 2010. -V.25.- P.481-490. DOI: 10.1007/s11032-009-9346-z.
11. Denet, A. Characteristics of Modern Triticale Quality: The Relationship Between Carbohydrate Properties, α -Amylase Activity, and Falling Number / A. Denet, M. Wilkes, R. M. Trethowan // Cereal Chem., - 2013. – 90 (6), P. 594-600. DOI: 10.1094/ CCHEM-10-12-0129-R/
12. Divashuk, M.G. The association between the allelic state of *Vp-1B* and pre-harvest sprouting tolerance in red seeded hexaploidy triticale / M.G. Divashuk, N. Mayer, P.Yu. Krupin, V.S. Rubets [et al.] // Open J. of Genetics. 2012. Vol.2(1). P.51-55.
13. De Laethauwer, S. α -Amylase gene expression during kernel development in relation to pre-harvest sprouting in wheat and triticale / De Laethauwer S., De Rick J., Stals I., Reheul D., Haesaert G. //Acta Physiol. Plant. 2013. – V.35.- P.2927-2938. DOI: 10.1007/s11738-013-1323-9.
14. Lin, R. Associations between caryopsis dormancy, alpha-amylase activity, and pre-harvest sprouting in barley / R. Lin, R.D Horsley, P.B. Schwarz //J. Cereal Sci., - 2008. - V.48 - P.446-456. DOI: 10.1016/j.jcs.2007.10.009.
15. Mergoum, M. Triticale ($\times$ Triticosecale Wittmack) Breeding / Mergoum, M., Sapkota S., ElFatih A., Naraghi S.M. [et al.] //Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals M. Al-Khayri et al (eds.): Springer Nature Switzerland. – 2019. – P. 405-451. DOI: 10.1007/978-3-030-23108-8_11.
16. Moullet, O. Pyramiding wheat-pre-harvest sprouting resistance genes in triticale breeding / O. Moullet, G.D Bermudez, D. Fossati, Brabant C. [et al.] //Mol. Breeding. - 2022. - V.42.- P.60.
17. Singh, G. Pre-harvest sprouting in wheat: current status and future prospects / C. Singh, U.R Kamble, V Gupta, Singh G. [et al.] // Journal of Cereal Research. – 2021. – Vol.13 (Spl-1). – P.1-22. DOI:10.25174/2582-2675/2021/114484.
18. Yang, Y. Development and validation of a *Viviparous-1* STS marker for pre-harvest sprouting tolerance in Chinese wheats / Y. Yang., L. Zhao, Q. Xia //Theoretical and Applied Genetics (TAG). – 2007. – Vol. 115. - No. 7. – P. 971-980. DOI: 10.1007/s00122-007-0624-z.