

Обзорная статья/Review article

УДК 633.14:631.52

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-74-90

Вадим Игоревич Полонский

Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

vadim.polonskiy@mail.ru

ТРИТОРДЕУМ – ПЕРСПЕКТИВНАЯ ЗЕРНОВАЯ КУЛЬТУРА

*Цель исследования – привлечение внимания селекционеров, агрономов, технологов-пищевиков к созданному новому виду зернового злака тритордеум. Последний представляет собой гибрид дикого ячменя (*Hordeum chilense* Roem. et Schultz.) и твердой пшеницы (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* Desf.). В кратком обзоре современной литературы представлена разносторонняя характеристика данной зерновой культуры, приводятся результаты анализа особенностей ее химического состава. На основе результатов изучения физиолого-биохимических и потребительских свойств данного инновационного злака продемонстрирована его повышенная способность адаптироваться к экстремальным условиям окружающей среды и возможность успешного применения зерна в пищевой промышленности, в частности при выпечке хлеба и производстве макаронных изделий. Морфологически и агрономически тритордеум похож на пшеницу, но по сравнению со своим предшественником он обладает более высокой способностью усваивать из почвы азот, лучше растет в более жарких и сухих условиях, отличается повышенной засухоустойчивостью и эффективностью использования воды. Кроме того, в зерне новой культуры содержится существенно больше белка, каротиноидов, глицин бетаина, пищевых волокон и минеральных элементов, чем в мягкой и твердой пшенице. Белок тритордеума обладает более высокой усвояемостью в организме человека, что связано с меньшим содержанием в нем глютенов, которые способны вызывать аллергию на глютен и провоцировать целиакию. Поскольку новый гибридный злак обладает высокой питательной и функциональной ценностью, его можно успешно использовать в производстве пищевых продуктов, предназначенных для здорового питания населения. Предлагаемый обзор современной научной литературы может служить ценным источником информации для исследователей, агрономов и производителей продуктов питания из зернового сырья, заинтересованных в изучении потенциала новой культуры тритордеума.*

Ключевые слова: дикий ячмень, твердая пшеница, зерно, засухоустойчивость, белок, каротиноиды, пищевые волокна, глицин бетаин, макроэлементы, хлебобулочные изделия

Для цитирования: Полонский В.И. Тритордеум – перспективная зерновая культура // Вестник КрасГАУ. 2025. № 5. С. 74–90. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-74-90.

Vadim Igorevich Polonskiy

Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia

vadim.polonskiy@mail.ru

TRITORDEUM – A PROMISING GRAIN CROP

*The objective of the study is to attract the attention of breeders, agronomists, and food technologists to the newly created species of grain cereal tritordeum. The latter is a hybrid of wild barley (*Hordeum chilense* Roem. et Schultz.) and durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* Desf.). A brief review of modern literature presents a comprehensive description of this grain crop and provides the results of an analysis of its chemical composition. Based on the results of studying the physiological, biochemical, and consumer properties of this innovative cereal, its increased ability to adapt to extreme environmental con-*

ditions and the possibility of successful use of grain in the food industry, in particular in baking bread and producing pasta, are demonstrated. Morphologically and agronomically, tritordeum is similar to wheat, but compared to its predecessor, it has a higher ability to absorb nitrogen from the soil, grows better in hotter and drier conditions, and is characterized by increased drought resistance and water use efficiency. In addition, the grain of the new crop contains significantly more protein, carotenoids, glycine betaine, dietary fiber and mineral elements than soft and hard wheat. Tritordeum protein has a higher digestibility in the human body, which is associated with a lower content of gliadins, which can cause allergies to gluten and provoke celiac disease. Since the new hybrid cereal has high nutritional and functional value, it can be successfully used in the production of food products intended for healthy nutrition of the population. The proposed review of modern scientific literature can serve as a valuable source of information for researchers, agronomists and producers of food products from grain raw materials interested in studying the potential of the new Tritordeum crop.

Keywords: wild barley, durum wheat, grain, drought resistance, protein, carotenoids, dietary fiber, glycine betaine, macronutrients, bakery products

For citation: Polonskiy VI. Tritordeum – a promising grain crop. *Bulletin of KSAU*. 2025;(5):74-90. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-74-90.

Введение. На протяжении многих тысячелетий зерновые злаки являются основным продуктом питания населения планеты, и их решающая роль в рационе человека в ближайшем будущем вряд ли изменится [1]. Как известно, почвенная засуха является ведущим фактором, снижающим величину урожайности зерновых культур, в частности твердой пшеницы – одной из важнейших культур для продовольственной безопасности [2]. При этом наблюдаемое в настоящее время глобальное изменение климата может значительно усугубить последствия указанного стресс-фактора, существенно повысив степень аридности многих территорий на планете. К основным стратегиям смягчения воздействия дефицита влаги на производство зерновых культур относится выведение засухоустойчивых форм либо путем использования местных адаптированных сортов, либо с помощью создания новых генотипов (например, межвидовых гибридов).

С начала двадцатого века селекционеры зерновых культур сосредоточили свои усилия на создании гибридов пшеницы с целью получения новых форм злаков с улучшенными агрономическими характеристиками и технологическими свойствами, а также повышенным содержанием функциональных химических веществ в зерне. Первой из таких культур выступила тритикале (*Triticosecale*), которая представляет собой гибрид пшеницы (*Triticum*) с рожью (*Secale*) и была получено путем естественной селекции более 100 лет назад. К следующей новой в этом плане зерновой культуре, созданной сравнительно недавно, относится тритордеум, гибрид

твердой пшеницы (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* Desf.) и дикого ячменя (*Hordeum chilense* Roem. et Schultz.) [3–5].

Сегодня интерес к практическому использованию зерна тритордеума растет из-за его хороших питательных свойств, более высокого содержания в нем ценных химических веществ по сравнению с широко используемыми генотипами пшеницы, а также его универсальности при производстве пищевых продуктов, таких как хлеб, макароны и другие хлебобулочные изделия [6–9]. В этой связи в последнее десятилетие в ряде западных стран проводятся всесторонние научные исследования биохимического и пищевого потенциала тритордеума. Следует отметить, что в России публикации, отражающие характеристики этой перспективной зерновой культуры и посвященные исследованиям возможностей применения тритордеума в здоровом питании населения, практически полностью отсутствуют.

Цель исследования – привлечение внимания, в первую очередь отечественных, селекционеров, генетиков, агрономов, физиологов и биохимиков растений к особенностям новой перспективной зерновой культуры.

Общая характеристика культуры. Эволюция зернового растениеводства привела к увеличению числа видов, которые в настоящее время массово выращиваются человеком. Это произошло за счет включения в перечень используемых зерновых культур дополнительных видов или даже создания новых форм, которых ранее вовсе не существовало. В 1977 г. профессор Антонио Мартин из Национального ис-

следовательского совета Испании вывел первую линию тритордеума, а спустя 4 года селекционная программа по созданию будущей продовольственной культуры была успешно продолжена [10]. Название вновь созданного злака представляет собой комбинацию латинских имен родительских растений. Приставка происходит от *Triticum durum* (твердая пшеница), тогда как последняя часть слова происходит от *Hordeum chilense* (дикий ячмень). Таким образом, новое растение стало известно как Tritordeum [11].

Цель выполненной учеными гибридизации заключалась в том, чтобы объединить хорошие технологические качества пшеницы с превосходными свойствами ячменя, такими как повышенная устойчивость к ряду экологических стрессоров. Тритордеум унаследовал от *Hordeum chilense* хорошую устойчивость к неблагоприятным абиотическим факторам (засуха, засоление, экстремально высокие температуры) [12] и некоторым болезням, например фузариозу [13]. Таким образом, тритордеум является «связующим звеном» между желательными генетическими признаками своих родительских форм [14], но его конечное применение вполне сопоставимо с использованием мягкой пшеницы. Следует отметить, что созданный новый вид злака, как и ячмень, формирует меньшую урожайность зерна, чем пшеница [15, 16]. При этом рассматриваемую культуру возможно включить в систему возделывания зерновых, поскольку она имеет сходный с пшеницей цикл выращивания и аналогичные агротехнические требования [16].

Десять лет назад тритордеум был выпущен на рынок компанией Agrasys, созданной под эгидой университета Барселоны для коммерциализации зерновых культур. Данный злак выращивают примерно на 1300 га в Испании, Португалии, Италии, Франции и Турции. Установлено, что он лучше растет в более жарких и сухих условиях, чем пшеница, и требует меньше воды. Благодаря такой водосберегающей функции в 2018 г. тритордеум получил первую премию как экологически чистый ингредиент в конкурсе наград «За устойчивое производство продуктов питания» [4, 17]. Если в перспективе селекционеры смогут предложить сорта тритордеума с меньшим разрывом в урожайности с родительскими видами, это может стать интересной и

весьма ценной альтернативой пшенице в цепочке поставок хлебобулочных изделий [16].

Агрономические особенности культуры. Тритордеум хорошо отзывается на увлажнение почвы, возделывание во влажных Средиземноморских регионах рассматриваемой культуры привело к формированию урожая зерна, примерно вдвое превышающего тот, который наблюдался в регионах, характеризующихся повышенным уровнем засухи [12]. Отметим, что в распоряжении селекционеров сегодня имеются линии тритордеума, почти не уступающие в благоприятных условиях по некоторым агрономическим показателям твердой пшенице. Так, в результате трехлетних экспериментов, проведенных в Южной Италии, был продемонстрирован достаточно высокий потенциал линий JB1, HT444 и HT621 этого злака по большинству параметров зерна, включая индекс урожая и массу 1000 зерен [18].

Все же в обычных, близких к оптимальным условиям тритордеум характеризуется меньшей величиной урожая зерна по сравнению со своими родителями. Показано, что потенциал урожайности 11 селекционных линий тритордеума, выращенных в условиях Центральной Европы, составил около половины от такового трех современных сортов твердой пшеницы [3]. Масса 1000 зерен у исследованных линий тритордеума была ниже на 23 и 18 %, чем у твердой пшеницы и голозерного ячменя соответственно [1]. Средние абсолютные показатели крупности зерна тритордеума и твердой пшеницы выразились величинами: 39,9 и 50,4 г [19]. Установлено, что более низкая величина урожайности линий тритордеума, по сравнению с мягкой и твердой пшеницей, была обусловлена главным образом меньшим значением массы 1000 зерен [17].

Благодаря уникальному геному, унаследованному от *Hordeum chilense*, зарегистрирована высокая устойчивость тритордеума к сухим и жарким климатическим условиям. В полевых экспериментах в стрессовых условиях дефицита влаги в почве оценивали урожайность современных сортов твердой пшеницы и ячменя, а также местных сортов ячменя и линий тритордеума. В результате выполненного сравнения было показано, что местные образцы ячменя (SBCC010) и генотипы тритордеума (Coique) проявили более устойчивый рост зерна и более эффективное распределение пластических веществ в колосьях, а также повышенную интен-

сивность фотосинтеза и термостабильность колосьев, чем современные сорта [6, 12]. Как известно, в неблагоприятных условиях в репродуктивной стадии колосья зерновых культур демонстрируют лучшую способность сохранения зеленой массы и устойчивость к стрессорам, чем флаговые листья, что в значительной степени способствует более эффективному наливу зерна [20–22].

Продемонстрировано, что в условиях богары (Тунис) урожайность тритордеума была выше, чем таковая пшеницы, а в более благоприятных условиях выращивания (Испания) наблюдалась противоположная картина. Интересно, что при нехватке воды в период, предшествующий созреванию, разница в урожайности тритордеума и пшеницы была выше, чем при наличии водного дефицита во время налива зерна. Эти различия были объяснены тем, что масса 1000 зерен выступала ограничивающим фактором продуктивности тритордеума, а задержка сроков созревания, возможно, была этой причиной в условиях засухи. В итоге было установлено, что тритордеум вполне можно выращивать в засушливых условиях в качестве новой продовольственной культуры, поскольку он по своим технологическим показателям довольно близок к пшенице [12].

Тритордеум унаследовал от *Hordeum chilense* хорошую устойчивость не только к засухе и засолению, но и к некоторым болезням, например фузариозу. Реакции на искусственную прививку колосьев *Fusarium culmorum* сравнивали у 11 линий тритордеума, двух сортов твердой пшеницы и одного сорта голозерного ячменя. Инокуляция колосьев тритордеума сопровождалась снижением массы зерен в колосе на 28 %, тогда как твердая пшеница, которая сильнее реагировала на этот прием, уменьшила массу зерен в колосе на 53 %. Исследование показало, что зерно тритордеума накапливает значительно меньшее количество микотоксинов, чем зерно твердой пшеницы и ячменя. При этом проанализированные линии тритордеума по-разному реагировали на инокуляцию, что позволяет предположить, что из существующего генофонда могут быть отобраны образцы с низкой склонностью к накоплению фузариозных токсинов в зерне [13]. Другими авторами [23] были зафиксированы противоположные результаты. Зерно 32 сортов мягкой и твердой пшеницы, ячменя и тритордеума, собранное в течение

двух лет, исследовали на наличие микотоксинов, обусловленных фузариозом. Авторы установили, что в бессимптомных растениях в среднем за оба года сбора урожая наиболее загрязненным был тритордеум, а наименее всего – ячмень. Полученные данные подтвердили факт наличия фузариозных микотоксинов как в зерне, так и соломке, в том числе из бессимптомных растений. Собранные информация свидетельствует о существовании проблемы, связанной с безопасностью продовольственного и фуражного сырья, а восприимчивость тритордеума говорит о том, что при выращивании этой новой культуры следует применять тщательные меры в плане мониторинга и селекции [23]. В другой работе 24 новые линии тритордеума проверяли на восприимчивость растений к ряду болезней. На основании зарегистрированных результатов авторы пришли к выводу, что в программу селекции тритордеума должны быть включены гены устойчивости к стеблевой ржавчине из геномов пшеницы А и В [24].

В экспериментах изучали зараженность и рост популяции нескольких основных видов жуков-вредителей при хранении зерна, чтобы определить его восприимчивость у тритордеума по сравнению с родительскими видами – пшеницей и ячменем. Результаты исследования продемонстрировали, что зерно тритордеума легко поражается жуками-вредителями, при этом характер заражения был аналогичен описанным для пшеницы и ячменя [15].

С целью получения данных о другой агрономической характеристике и выявления различий между генотипами в активности фермента нитратредуктазы исследовали свойства физиологической системы поглощения нитратов у двух линий тритордеума (НТ8 и НТ31) и их родительской пшеницы. Показано, что линии тритордеума, и особенно НТ31, поглощают нитраты более эффективно, чем твердая пшеница. При этом восстановление нитратов до нитритов, по-видимому, является этапом, ограничивающим скорость усвоения данной окисленной формы азота. Линия тритордеума НТ8, содержание белка в зерне которой было значительно больше, чем у образца НТ31, проявляла повышенную активность нитратредуктазы как в корнях, так и в листьях, но более низкую эффективность поглощения нитратов, чем тритордеум НТ31 [25].

Содержание каротиноидов в зерне. Известно, что каротиноиды относятся к антиокси-

дантам, которые защищают клетки от активных форм кислорода и свободных радикалов, обладающая существенной пользой для здоровья человека, а оранжевый пигмент β -каротин еще является жизненно важным провитамином А. Установлено, что диета, включающая продукты, богатые каротиноидами, связана с более низким риском развития ряда хронических заболеваний. Кроме того, каротиноиды играют важную роль в придании пищевым продуктам, в частности макаронным изделиям, характерной желтой окраски [9].

Найдено, что тритордеум содержит ценный ингредиент лютеин, которого в его зерне находится в несколько раз больше, чем в мягкой и твердой пшенице [1, 26, 27]. Высокое содержание указанного ксантофилла в зерне – это особенность, которая выгодно отличает тритордеум от других мелкозернистых злаков, включая твердую пшеницу [3]. Показано, что содержание лютеина в зерне тритордеума в 2,5 раза выше, чем в мягкой пшенице и ячмене, и на 30 % превосходит таковое в твердой пшенице [9, 19, 28]. Доля лютеина в общем количестве каротиноидов составляет 86 %, за ним следует зеаксантин (7 %), далее α - и β -каротин (соответственно 0,5 и 0,3 %) [29]. Количественное определение перечисленных соединений методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) в зерне 14 генотипов пшеницы, ячменя и тритордеума, собранного в Чехии, позволило обнаружить наибольшее содержание пигментов в желтозернистом тритордеуме линии НТ 439 (12,2 мкг/г) [29].

Как известно, этерификация – распространенный способ связывания каротиноидов. Большинство злаков содержит значительное количество этерифицированных форм химических соединений (до 60 %), среди которых преобладают сложные эфиры лютеина. Установлено, что соотношение свободных и этерифицированных форм определяет главным образом генотип злаков [29]. В литературе описана положительная роль этерификации каротиноидов в сохранении последних в зерне твердой пшеницы и тритордеума [9, 27, 30]. Так, экспериментально показано, что значительная часть каротиноидов при созревании зерна тритордеума этерифицируется жирными кислотами, и этот химический процесс может быть важным механизмом накопления пигментов в зерне данной культуры. Предполагается связь между образо-

ванием сложных эфиров лютеина, действующих как метаболический поглотитель на ранних стадиях развития зерна, и высоким содержанием каротиноидов в тритордеуме. Кроме того, присутствие сложных эфиров лютеина на поздних стадиях развития зерна может играть дополнительную роль в накоплении каротиноидов, снижая и/или противодействуя их катаболизму [9]. Итак, отмеченный факт повышенного содержания лютеина в зерне тритордеума по сравнению с пшеницей, по-видимому, связан, во-первых, с синтезом большего количества каротиноидов в зерне [24] и, во-вторых, обусловлен различиями в этерификации лютеина между зерновыми культурами [9].

На основе анализа содержания каротиноидов в зерне у 20 новых линий тритордеума авторы исследования пришли к выводу, что отбор на повышенный уровень желтых пигментов (являющийся основным фактором коммерциализации тритордеума) должен быть усилен не только за счет использования разнообразия *H. chilense*, но и за счет включения полезных аллелей твердой пшеницы [24]. Сравнение содержания каротиноидов в зерне 11 селекционных линий тритордеума и двух современных сортов твердой пшеницы выявило значительные различия в уровнях этих метаболитов в зерне, что позволяет предположить возможность селективного выведения генотипов тритордеума с более высоким содержанием каротиноидов [19], в частности на основе существования разнообразия ферментов ксантофиллацилтрансфераз [9].

Содержание фенольных соединений в зерне. Кроме каротиноидов в плане улучшения здоровья человека среди антиоксидантных соединений огромным потенциалом обладают фенольные кислоты. На 27 линиях гексаплоидного тритордеума с помощью ВЭЖХ оценивали влияние экологических и генетических факторов на содержание указанных химических веществ в зерне. Во-первых, было найдено, что, как и в пшенице, преобладающим фенольным соединением в зерне тритордеума выступает феруловая кислота. Во-вторых, результаты показали большую роль генотипа в высокой вариабельности содержания фенольных соединений, что предполагает наличие значительного потенциала для дальнейшего роста их количества и улучшения качества в зерне тритордеума [31]. В другой работе в течение трех лет анализировали содержание фенольных соединений в пяти

сортах тритордеума, выращенных в Южной Италии. В результате для всех генотипов удалось идентифицировать 12 фенольных кислот. Образцы тритордеума превзошли твердую пшеницу по количеству галловой, п-гидроксибензойной, хлорогеновой и гентизиновой кислот в зерне. Более того, в зерне тритордеума впервые были обнаружены коричневая и гентизиновая кислоты. По заключению авторов, тритордеум обладает хорошим потенциалом для производства функциональных пищевых продуктов, богатых фенольными соединениями [18]. В следующем исследовании линий тритордеума и других злаков, выращенных на одном и том же экспериментальном участке, сравнивали содержание фенольных соединений в различных частях зерновки. Установлено, что внутренние слои зерна рассматриваемого гибрида характеризуются в среднем повышенным уровнем фенольных кислот (32,0 мг/кг растворимых и 518 мг/кг связанных с клеточной стенкой соответственно), что делает тритордеум интересным продуктом для производства рафинированной муки, насыщенной биологически активными веществами [28].

Для изучения влияния генотипа, погодных условий и применения удобрений на содержание фенольных кислот и антиоксидантную способность зерна в ходе трех полевых экспериментов при различных нормах внесения азотных удобрений выращивали 14 генотипов тритордеума, твердой и мягкой пшеницы. В результате удалось зарегистрировать заметное увеличение содержания растворимых фенольных кислот (на 16 %) в вариантах с высоким содержанием азота в почве, в то время как содержание связанных фенольных кислот немного снизилось. По мнению авторов, среди изученных оказались перспективные образцы для производства функциональных продуктов питания, поскольку они обладали повышенной урожайностью и качеством, а также хорошими антиоксидантными свойствами [32].

В другой работе было проведено сравнение содержания связанных фенольных кислот, флавоноидов и каротиноидов в зерне одиннадцати селекционных линий тритордеума и двух сортов твердой пшеницы. Общий уровень связанных фенольных кислот в тритордеуме составил в среднем 2063 мг/кг, что было практически вдвое выше, чем таковой в твердой пшенице (1056 мг/кг). Как следствие, зерно анализируе-

мых линий тритордеума характеризовалось на 26 % более высокой антиоксидантной активностью, чем зерно пшеницы [19].

В зерне двух сравниваемых видов злаков тритордеума и твердой пшеницы было обнаружено восемь флавоноидов. При этом в зерне первого их было значительно больше (за исключением кверцетина), чем в зерне твердой пшеницы. Существенные различия удалось отметить и в содержании катехина и рутина: последний в зерне тритордеума более чем в 2,6 раза превосходил таковое у твердой пшеницы. Общий уровень всех обнаруженных в зерне флавоноидов в тритордеуме был примерно на 50 % выше, чем в твердой пшенице (223,5 и 143 мг/кг соответственно) [33].

Содержание других ценных веществ в зерне. Установлено, что зерно тритордеума отличается от такового мягкой пшеницы более высоким содержанием белков, свободных аминокислот, а также качественным составом запасных белков глиадинов [3, 25, 34]. При этом найдено, что белок имеет более ценный аминокислотный состав, поскольку характеризуется по сравнению с пшеницей повышенным уровнем незаменимого цистеина.

На основании проведенного сравнения содержания питательных веществ, а также морфологических и анатомических особенностей зерен у 11 селекционных линий тритордеума с таковыми трех сортов твердой пшеницы выявлено более высокое содержание в нем белка, жира и золы. Результаты показывают, что в условиях Центральной Европы в зерне тритордеума может накапливаться более 19 % белка [3]. В среднем содержание белка в зерне тритордеума колеблется от 17 до 21 %, по этому показателю он значительно превосходит пшеничное и ячменное зерно [35]. Высокое содержание белка и клетчатки в зерне тритордеума обусловлено низкими значениями показателей формы в поперечном сечении зерна и более высоким отношением площади околоплодника к объему зерна, чем у твердой пшеницы [3]. Большее содержание белка в зерне тритордеума, чем в пшенице, имеет важное значение для его питательной ценности.

Широко известна ощутимая польза для здоровья от включения в состав диеты пищевых волокон, которые входят главным образом в состав зерна ячменя и овса. С точки зрения снижения уровня холестерина в крови и риска

развития ишемической болезни сердца, а также профилактики излишнего веса официально подтверждены ценные свойства β -глюкана [36, 37]. Для сравнительной оценки уровня арабиноксилана и β -глюкана в цельнозерновой муке из твердой пшеницы, ячменя и тритордеума измеряли содержание этих пищевых волокон с помощью стандартного ферментативного анализа. Найдено, что содержание обоих полимеров, особенно арабиноксилана, в тритордеуме было выше, чем в пшенице [27, 34], но, как и следовало ожидать, уровень β -глюканов в зерне тритордеума и пшеницы значительно отставал от такового в культурном ячмене [28, 38]. Исследовали структурные особенности молекул арабиноксилана и β -глюкана в цельных зернах пяти селекционных линий тритордеума, восьми сортов тритикале и 20 сортов ячменя, выращенных в двух местах. Результаты показали, что указанные признаки пищевых волокон различаются между тремя видами злаков, а также внутри генотипов, что может быть важным фактором, определяющим качество зерна для конечного использования [38].

Как известно, токолы (витамин E) подразделяются на два типа: с насыщенными связями (токоферолы) и двойными (токотриенолы). Данные химические соединения (особенно ненасыщенные токотриенолы) обладают антиоксидантными свойствами, которые полезны в плане профилактики здоровья. Исследовали содержание токолов в различных сортах и селекционных линиях пшеницы в сравнении с тремя сортами ячменя и тремя образцами тритордеума. В результате в зерне пшеницы и тритордеума были идентифицированы четыре токола (β -токотриенол, α -токотриенол, β -токоферол и α -токоферол). Доминирующими соединениями в пшенице и тритордеуме были α -токоферол и β -токотриенол, тогда как сорта ярового ячменя отличались высоким содержанием α -токотриенола. На содержание токола в зерне в значительной степени влиял генотип, тогда как количество осадков и температура в течение года оказывали гораздо меньшее воздействие [33].

Сегодня население в некоторых регионах мира, особенно в Южной, Восточной и Юго-Восточной Азии и ряде стран Африки, испытывает хронический дефицит цинка и железа. По приблизительным оценкам, от подобного скрытого голода на планете страдают более двух миллиардов человек. Как известно, основ-

ной целью селекции зерновых культур является повышение урожайности, и масса 1000 зерен выступает одним из ключевых признаков, формирующих этот производственный показатель. Поскольку в зерновых культурах содержание минералов наиболее высоко в оболочке и нижележащем алейроновом слое, увеличение массы 1000 зерен снижает весовую долю семенной оболочки и, следовательно, концентрацию питательных микроэлементов в зерне. По всей вероятности, менее крупное зерно тритордеума по сравнению с другими злаками должно иметь более высокую массовую долю золы и, таким образом, содержать больше минеральных элементов. Данное предположение было экспериментально подтверждено на 14 образцах тритордеума, твердой пшеницы и голозерного ячменя. Зерно тритордеума характеризовалось меньшей (на 23 %) массой, более высоким содержанием калия и магния (на 16 и 6 % соответственно, чем в твердой пшенице, и на 27 и 17 % по сравнению с голозерным ячменем). Кроме того, по сравнению с эталонными сортами твердой пшеницы и ячменя тритордеум был более богат медью (на 24 и 62 %), цинком (на 11 и 17 %), а также кобальтом (на 24 и более чем на 30 % соответственно) [1]. Содержание железа в зерне тритордеума было также заметно выше [34].

Установлено, что глицин бетаин и его биосинтетический предшественник холин являются весьма полезными для здоровья человека, так как снижают риск сердечно-сосудистых заболеваний. Они действуют как доноры метила в цикле гомоцистеина, обеспечивая метильные группы для его повторного превращения в метионин. Недавно в зерне тритордеума впервые был обнаружен повышенный по сравнению с мягкой и твердой пшеницей уровень глицина бетаина [34], что существенно повысило его функциональный потенциал в плане здорового питания.

Доказано, что в зерне тритордеума по сравнению с пшеницей находится больше олеиновой кислоты и других моновенасыщенных жирных кислот, которые помогают снизить риск сердечно-сосудистых заболеваний. Кроме того, в нем содержится больше клетчатки, которая благотворно влияет на здоровье человека [27, 34].

Гипоаллергенность зерна. В последние годы все большее внимание уделяется негативной роли определенных продуктов питания, произведенных из зерна пшеницы и некоторых

других злаков [39]. В недавних публикациях описаны случаи, когда у пациентов с синдромом раздраженного кишечника (СРК) могут возникать желудочно-кишечные и внежелудочные симптомы, вызванные употреблением в пищу таких злаков [40]. Различные белки зерна пшеницы способны приводить у восприимчивых людей к возникновению повышенной чувствительности к глютену и целиакии. Отметим, что в современном мире все большую популярность приобретает безглютеновая диета [41–43].

Установлено, что в зерне тритордеума содержится гораздо меньше клейковины, и по составу глютен его зерно выгодно отличается от пшеничного, что обусловлено вкладом родительского вида *H. chilense* в протеом рассматриваемой культуры [39, 44–46]. При этом найдено, что белок тритордеума обладает более высокой усвояемостью в организме человека, что связано с меньшим содержанием глиадинов, которые способны вызывать аллергию на глютен и провоцировать целиакию [11]. Показано, что запасные белки, содержащиеся в зерне тритордеума, менее иммуногенны, чем белки пшеничного зерна, поэтому новый злак потенциально может быть более безопасным для потребителей, имеющих повышенную чувствительность к глютену [13]. В зерне тритордеума было обнаружено меньше аллергических эпитопов, чем у современной пшеницы, на основании чего предполагается, что более низкая частота встречаемости целиакических эпитопов у тритордеума по сравнению со стародавними и современными сортами пшеницы, вероятно, связана с отсутствием D-гена [47].

В следующих работах на добровольцах-испытуемых изучали реакцию организма на включение в диету хлеба, приготовленного из зерна тритордеума. В одной из них исследовали потенциал тритордеума в плане улучшения проницаемости кишечника и его иммунной функции – двух ключевых компонентов здоровья кишечника. В целом найденные результаты свидетельствовали о том, что при получении хлеба применяемая закваска на основе зерна тритордеума может положительно влиять на здоровье кишечника [48]. В другой работе было показано, что группа из десяти пациентов с синдромом раздраженного кишечника, смогла употреблять приготовленный из зерна тритордеума хлеб в течение недели без каких-либо негативных последствий для здоровья желу-

дочно-кишечного тракта. Анализ бактериальной микрофлоры кишечника испытуемых показал, что продукты, полученные из тритордеума, не изменяют общую структуру и состав кишечной микробиоты и могут быть переносимы группой людей, страдающих побочной реакцией на определенные компоненты пшеницы, которым не требуется строгое исключение глютена из своего рациона [46]. Еще одно исследование было направлено на изучение влияния 12-недельной диеты с использованием продуктов на основе тритордеума вместо иных злаков на симптомы со стороны желудочно-кишечного тракта и состояние желудочно-кишечного барьера у 16 пациентов с диареей с преобладающим синдромом раздраженного кишечника. Найдено, что диета с использованием продуктов, приготовленных на основе тритордеума (хлеб, хлебобулочные и макаронные изделия), значительно уменьшала болезненные симптомы у пациентов. Это улучшение самочувствия, по-видимому, происходит за счет поддержания барьерной функции и целостности эпителия, что может усилить защиту организма от проникновения и транслокации патогенных микроорганизмов, способствуя профилактике и лечению функциональных заболеваний желудочно-кишечного тракта. Об этом свидетельствуют снижение проницаемости кишечника и уменьшение уровней маркеров целостности слизистой оболочки кишечника, воспаления слизистой оболочки и ферментативного дисбактериоза [49, 50]. В эксперименте с участием 19 здоровых добровольцев оценивали усвояемость и возможные иммунотоксические свойства тритордеума. Для этого использовали различные хлебные диеты из тритордеума и пшеницы в сравнении с безглютеновым хлебом. Доказано, что у добровольцев не было никаких признаков желудочно-кишечных симптомов [44]. Наконец, еще в одном исследовании оценивали два официально зарегистрированных образца тритордеума Булель и Аукан в сравнении с сортом твердой пшеницы Провансаль. Результаты свидетельствовали, что оба генотипа тритордеума могут выступать потенциальными кандидатами для снижения иммунотоксичности пшеничной муки. Кроме того, в экспериментах была продемонстрирована возможность улучшения психологического статуса пациентов с синдромом раздраженного кишечника при помощи диеты, включающей тритордеум [51].

Перечисленные результаты свидетельствуют о том, что тритордеум, хотя и не является полностью безопасным зерном для больных целиакией, все же способен быть полезной малотоксичной зерновой культурой и источником функциональных компонентов в составе продуктов здорового питания. Он может представлять интерес для пищевой промышленности [52], особенно для потребителей, желающих снизить потребление глютена [53], так как хорошо подходит для выпечки хлеба с позиций подъема теста, его текстуры и вкуса, в чем он значительно превосходит безглютеновый хлеб [44].

Применение зерна в пищевой промышленности. Сегодня основным направлением выращивания тритордеума является использование его в пищевой промышленности. Зерно идет для производства печенья, сухих завтраков, бисквитов, макаронных изделий, а также пасты и пиццы [3, 4]. Поскольку по своим хлебопекарным свойствам тритордеум близок к мягкой пшенице, то он относительно больше подходит не для приготовления макаронных изделий, а для выпечки хлеба [4, 5]. Особенно он нашел применение при производстве хлебобулочных изделий, предназначенных для потребителей, предпочитающих полезный и высокопитательный хлеб [48]. Кроме того, по мнению авторов [27], возможными зерновыми продуктами, изготовленными на основе тритордеума, могут быть хлеб, каша из белой муки или цельного зерна.

Несколько линий тритордеума, а также некоторые сорта твердой и мягкой пшеницы и тритикале были проанализированы на качество получаемого хлеба с помощью обычно используемых тестов. Результаты показали, что тритордеум обладает качественными характеристиками, сходными с характеристиками мягкой пшеницы, и заметно отличающимися от свойств твердой пшеницы. При этом тритордеум продемонстрировал несколько худшие хлебопекарные свойства, чем пшеница [14, 26, 54].

В рафинированной муке двух широко распространенных сортов тритордеума (Aisan и Bull) оценивали различия в экспрессии белка, взяв в качестве эталона манную крупу и муку, полученную из мягкой пшеницы сорта Альтамира и твердой пшеницы сорта Анталис. В результате было показано, что биодоступность аминокислот и содержание редуцирующих сахаров в хлебе из тритордеума и пшеницы были сопос-

тавимы [39]. В другой работе анализировали хлебопекарные характеристики восьми линий гексаплоидного тритордеума, а также характеристики одного сорта мягкой пшеницы. Результаты показали, что в процессе грубого помола получалась мука по свойствам, сходным с пшеничной для выпечки хлеба, хотя ее реологические и хлебопекарные характеристики были немного хуже [55]. Исследования, проведенные П. Мартинекком и соавторами [35], продемонстрировали, что индекс клейковины в зерне тритордеума был значительно ниже, чем в пшенице, и объем буханки оказался меньше, чем в случае с пшеничным хлебом.

При рассмотрении хлебопекарных свойств тритордеума были подробно изучены физико-химические особенности крахмала в сравнении с таковыми у пшеницы и ячменя [56]. Установлено, что крахмал зерна тритордеума обладает уникальными свойствами: высокой температурой склеивания, низкой, но стабильной вязкостью горячей пасты. Гранулы крахмала тритордеума характеризовались относительно небольшим размером и самым высоким содержанием липидов и некрахмалистых веществ. При этом скорость процесса его перехода в трудноусвояемые соединения (ретроградации) была самой низкой по сравнению с крахмалом ячменя и пшеницы. Последнее, весьма ценное функциональное свойство тритордеума находится в согласии с данными авторов [57], которые зафиксировали эффект нарушения процесса ретроградации крахмала в присутствии липидов. Поскольку зерно тритордеума характеризовалось самым высоким содержанием липидов среди трех указанных злаков, то наименьшее значение этого показателя было обнаружено и для муки, изготовленной из него [56].

Еще одно практическое применение зерна тритордеума относится к пивоварению. Использование нового сырья имеет ряд преимуществ, так как позволяет получать оригинальные сорта пива с интересными вкусами и ароматами. Результаты изучения потенциала тритордеума для производства пива не выявили существенных различий между ним и ячменным солодом в расчете на массу 1000 зерен. Анализ влияния различных пропорций солода тритордеума в смеси (от 0 до 100 %) на ход последующих стадий производства сусла показал, что время осахаривания и замачивания, а также цвет и мутность были сопоставимы с таковыми для яч-

менного солода. Полученные результаты доказывают высокий потенциал солода из нового сырья для пивоваренной промышленности [9]. Основной побочный продукт пивоваренной промышленности – пивная дробина – может быть использована в качестве функционального ингредиента для повышения питательной ценности продуктов на основе злаков. В работе были охарактеризованы рецептуры макаронных изделий, обогащенных микронизированной крупой из пивной дробины тритордеума в различных соотношениях. Найдено, что в образцах макаронных изделий из твердой пшеницы, обогащенных 10 % пивной дробинкой от тритордеума, содержание β -глюкана и показатели общей антиоксидантной способности продукта значительно увеличились, при этом добавка в минимальной степени повлияла на вкусовые качества готовых макаронных изделий [58, 59].

Таким образом, в качестве ингредиента для производства функциональных продуктов питания тритордеум обладает значительным потенциалом, а его полезные свойства могут быть дополнительно усилены путем ферментации [60].

Заключение. В настоящем кратком обзоре литературы представлена характеристика новой гибридной зерновой культуры тритордеум (\times *Tritordeum martini* AABBHchHch) с многообещающим питательным и функциональным потенциалом. Приведены результаты анализа агрономических, биохимических и технологических особенностей этого амфиплоидного вида, полученного путем скрещивания южноамериканского дикого ячменя (*Hordeum chilense* Roem. et Schultz.) и твердой пшеницы (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum* Desf.).

На основе результатов всестороннего изучения свойств данного инновационного злака показана его повышенная способность к адаптации в экстремальных условиях окружающей

среды и реальная возможность успешного применения зерна в пищевой промышленности, в частности при выпечке хлеба и производстве макаронных изделий. Показано, что по сравнению со своим предшественником пшеницей новая культура характеризуется лучшим биохимическим составом зерна. В тритордеуме содержится значительно больше белка, свободных аминокислот, каротиноидов, фенольных кислот, глицина бетаина, арабиноксилана и β -глюкана, ненасыщенных жирных кислот, а также ряда минеральных элементов.

Морфологически и агрономически тритордеум похож на пшеницу, но по сравнению со своим предшественником он обладает более высокой способностью усваивать азот, лучше растет в более жарких и сухих условиях, отличается более высокой эффективностью использования воды. Реологические и хлебопекарные характеристики муки из тритордеума также весьма схожи с таковыми у пшеничных хлебобулочных изделий, что указывает на то, что геном Hchh может, по крайней мере частично, заменить геном D. На основе результатов предварительного изучения агрономических, физиолого-биохимических и потребительских свойств нового злака сделано заключение о его высокой питательной и функциональной ценности. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что тритордеум можно успешно использовать в производстве функциональных пищевых продуктов, предназначенных для здорового питания.

Предлагаемый обзор современной иностранной научной литературы может служить ценным источником информации для исследователей, селекционеров, агрономов, производителей продуктов питания и управленцев, заинтересованных в изучении потенциала нового зернового вида тритордеума.

Список источников

1. Suchowilska E., Kandler W., Wiwart M., et al. Is Tritordeum (\times *Tritordeum martini* A. Pujadas, nothosp. nov.) grain a potentially useful source of essential minerals in the human diet? // Journal of Food Composition and Analysis. 2023. Vol. 115. 104874. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.104874. EDN: IUZKKY.
2. Maghrebi M., Marín-Sanz M., Begona M., et al. The drought-induced plasticity of mineral nutrients contributes to drought tolerance discrimination in durum wheat // Plant Physiology and Biochemistry. 2024. Vol. 215. 109077. DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.109077. EDN: JONREV.

3. Avila C.M., Rodríguez-Suarez C., Atienza S.G. Tritordeum: creating a new crop species — the successful use of plant genetic resources // *Plants*. 2021. Vol. 10. 1029. DOI: 10.3390/plants10051029. EDN: PKUVNS.
4. Marín A., Alvarez J.B., Marín L.M., et al. The Development of Tritordeum: A Novel Cereal for Food Processing // *Journal of Cereal Science*. 1999. Vol. 30, № 2. P. 85–95. DOI: 10.1006/jcrs.1998.0235.
5. Papadopoulos G., Mavroeidis A., Stavropoulos P., et al. Tritordeum: a versatile and resilient cereal for Mediterranean agriculture and sustainable food production // *Cereal Research Communications*. 2023. № 6. P. 401–406. DOI: 10.1007/s42976-023-00401-6. EDN: GEAKIS.
6. Yoldi-Achalandabaso A., Agirresarobe A., Katamadze A., et al. Tritordeum, barley landraces and ear photosynthesis are key players in cereal resilience under future extreme drought conditions // *Plant Stress*. 2025. Vol. 15, № 3. 100765. DOI: 10.1016/j.stress.2025.100765 t.
7. Ballesteros J., Ramírez M., Martínez C., et al. Bread-making quality in hexaploid tritordeum with substitutions involving chromosome 1D // *Plant Breeding*. 2003. Vol. 122, № 1. P. 89–91. DOI: 10.1046/j.1439-0523.2003.00806.x. EDN: BFCMQD.
8. Polonskiy V., Loskutov I., Sumina A. Biological role and health benefits of antioxidant compounds in cereal // *Biological Communications*. 2020. Vol. 65, № 1. P. 53–67. DOI: 10.21638/spbu03.2020.105. EDN: UCFLXQ.
9. Mattera M., Hornero-Méndez D., Atienza S.G. Carotenoid content in tritordeum is not primarily associated with esterification during grain development // *Food Chemistry*. 2020. Vol. 310, № 4. 125847. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125847t. EDN: AAHHMZ.
10. Martín A., Sanchez-Mongelaguna E. Cytology and morphology of the amphiploid *Hordeum chilense* × *Triticum turgidum* conv. *durum* // *Euphytica*. 1981. Vol. 31. P. 261–267.
11. Różewicz M., Wzyńska M. Characteristics of Tritordeum and evaluation of its potential for cultivation in Poland, with considerations for the nutritional and fodder value of the grains // *Polish Journal of Agronomy*. 2021. Vol. 44. P. 15–21. DOI: 10.1007/978-94-009-0329-6_106.
12. Villegas D., Casadesús J., Atienza S.G., et al. Tritordeum, wheat and triticale yield components under multi-local mediterranean drought conditions // *Field Crop Research*. 2010. Vol. 116, № 1-2. P. 68–74. DOI: 10.1016/j.fcr.2009.11.012.
13. Suchowilska E., Wiwart M., Sulyok M., et al. Mycotoxin profiles and plumpness of Tritordeum grain after artificial spike inoculation with *Fusarium culmorum* W.G. Smith // *International Journal of Food Microbiology*. 2025. Vol. 427, № 16. 110963. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110963. EDN: FKAHHS.
14. Martín L.M., Alvarez J.B. Use of interspecific hybridisation in quality improvement of cereals. In: *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges*. Zaragoza: CIHEAM; 2000. P. 447–454.
15. Kyrgiakis C., Sakka M.K., Athanassiou C.G. Population growth of different stored product species on wheat, barley, and tritordeum // *Food Bioscience*. 2024. Vol. 61, № 10. 104698. DOI: 10.1016/j.fbio.2024.104698. EDN: QPVXUN.
16. Landolfi V., Blandino M. Minor Cereals and New Crops: Tritordeum // *Sustainable Food Science – A Comprehensive Approach*. 2023. Vol. 2. P. 83–103. DOI: 10.1016/B978-0-12-823960-5.00023-8.
17. Gallardo M., Fereres E. Growth, grain yield and water use efficiency of tritordeum in relation to wheat // *European Journal of Agronomy*. 1993. Vol. 2, № 2. P. 83–91. DOI: 10.1016/S1161-0301(14)80137-8.
18. Montesano V., Negro D., De Lisi A., et al. Agronomic performance and phenolic profile of Tritordeum (× *Tritordeum martini* A. Pujadas) lines // *Cereal Chemistry*. 2021. Vol. 98, № 2. P. 382–391. DOI: 10.1007/978-94-009-0329-6_10610.1002/cche.10378. EDN: CWHZGR.
19. Suchowilska E., Wiwart M., Przybylska-Balcerek A. The profile of bioactive compounds in the grain of various *Tritordeum* genotypes // *Journal of Cereal Science*. 2021. Vol. 102, № 11. 103352. DOI: 10.1016/j.jcs.2021.103352. EDN: DNIQAQ.
20. Martínez-Peña R., Schleret A., Höhne M., et al. Source-sink dynamics in field-grown durum wheat under contrasting nitrogen supplies: key role of non-foliar organs during grain filling // *Frontiers of Plant Science*. 2022. Vol. 22. 869680. DOI: 10.3389/fpls.2022.869680. EDN: AQQZFI.

21. Molero G., Reynolds M.P. Spike photosynthesis measured at high throughput indicates genetic variation independent of flag leaf photosynthesis // *Field Crops Research*. 2020. Vol. 255, № 6. 107866. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107866. EDN: NKSXNX.
22. Sanchez-Bragado R., Vicente R., Molero G., et al. New avenues for increasing yield and stability in C3 cereals: exploring ear photosynthesis // *Current Opinion of Plant Biology*. 2020. Vol. 56. P. 223–234. DOI: 10.1016/j.pbi.2020.01.001. EDN: RDZIDU.
23. Gozzi M., Blandino M., Bruni R., et al. Mycotoxin occurrence in kernels and straws of wheat, barley, and tritordeum // *Mycotoxin Research*. 2024. Vol. 40. P. 203–210. DOI: 10.1007/s12550-024-00521-w. EDN: HIELRI.
24. Rodríguez-Suárez C., Dolores M., Requena-Ramírez E., et al. Prospects for tritordeum (*x Tritordeum martinii* A. Pujadas, Nothosp. Nov.) cereal breeding: Key points for future challenges // *Plant Breeding*. 2024. № 7. P. 1–10. DOI: 10.1111/pbr.13207.
25. Barro F., Fontes A.G., Maldonado J.M. Nitrate Uptake and Reduction by Durum Wheat (*Triticum turgidum*) and Tritordeum (*Hordeum chilense x Triticum turgidum*) // *Journal of Plant Physiology*. 1994. Vol. 143, № 3. P. 313–317. DOI: 10.1016/S0176-1617(11)81637-8.
26. Alvarez J.B., Martin L.M. Breadmaking Quality in Tritordeum: The Use-Possibilities of a New Cereal. In: Güedes-Pinto H., Darvey N., Carnide V.P., editors. *Triticale: today and tomorrow*. Publisher: Kluwer Academic Publishers, 1996. P. 799–805. DOI: 10.1007/978-94-009-0329-6_106.
27. Erlandsson A. Tritordeum. Evaluation of a new food cereal. In: Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2010. Available at: <https://www.slu.se/en/departments/plant-breeding/education/msc-projects>. Accessed: 12 Nov 2024.
28. Giordano D., Reyneri A., Locatelli M., et al. Distribution of bioactive compounds in pearled fractions of tritordeum // *Food Chemistry*. 2019. Vol. 15, № 301. 125228. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125228.
29. Paznocht L., Kotíková Z., Šulc M., et al. Free and esterified carotenoids in pigmented wheat, tritordeum and barley grains // *Food Chemistry*. 2018. Vol. 240, № 1. P. 670–678. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.151.
30. Requena-Ramírez M.D., Rodríguez-Suarez C., Hornero-Mendez D., et al. // Lutein esterification increases carotenoid retention in durum wheat grain. A step further in breeding and improving the commercial and nutritional quality during grain storage // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 435. 137660. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137660. EDN: MFAKUZ.
31. Navas-Lopez J.F., Ostos-Garrido F.J., Castillo A., et al. Phenolic content variability and its chromosome location in tritordeum // *Frontiers in Plant Science*. 2014. Vol. 5, № 1. P. 1–10. DOI: 10.3389/fpls.2014.00010.
32. Sardella C., Burešová B., Kotíková Z., et al. Influence of Agronomic Practices on the Antioxidant Compounds of Pigmented Wheat (*Triticum aestivum* spp. *Aestivum* L.) and Tritordeum (*x Tritordeum martinii* A. Pujadas, nothosp. nov.) Genotype // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2023. Vol. 71, № 36. P. 13220–13233. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c02592. EDN: FEXWCP.
33. Lachman J., Hejtmánková A., Orsák M., et al. Tocotrienols and tocopherols in colored-grain wheat, tritordeum and barley // *Food Chemistry*. 2018. Vol. 240, № 1. P. 725–735. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.123.
34. Shewry P.R., Brouns F., Dunn J., et al. Comparative compositions of grain of tritordeum, durum wheat and bread wheat grown in multi-environment trials // *Food Chemistry*. 2023. Vol. 423. 136312. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136312. EDN: SWGKJU.
35. Martinek P., Ohnoutková L., Vyhnánek T., et al. Characteristics of wheat-barley hybrids (*x Tritordeum* Ascherson et Graebner) under Central-European climatic conditions. // *Biuletyn IHAR*. 2003. Vol. 226/227. P. 87–95.
36. Wood P.J. Cereal β -glucans in diet and health // *Journal of Cereal Science*. 2007. Vol. 46. P. 230–238.
37. Lukinac J., Juki M. Barley in the Production of Cereal-Based Products // *Plants*. 2022. Vol. 11. P. 3519. DOI: 10.3390/plants11243519. EDN: KVZVAV.

38. Rakha A., Saulnier L., Aman P., et al. Enzymatic fingerprinting of arabinoxylan and β -glucan in triticale, barley and tritordeum grains // *Carbohydrate Polymers*. 2012. Vol. 90, № 3. P. 1226–1234. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.06.054.
39. Nitride C., D'Auria G., Dente A., et al. Tritordeum as an Innovative Alternative to Wheat: A Comparative Digestion Study on Bread. // *Molecules*. 2022. Vol. 27. P. 1308. DOI: 10.3390/molecules27041308. EDN: PJKFIG.
40. Mamone G., Iacomino G. Comparison of the in vitro toxicity of ancient *Triticum monococcum* varieties ID331 and Monlis // *International Journal of Food Science Nutrition*. 2018. Vol. 69. P. 954–962. DOI: 10.1080/09637486.2018.1444019.
41. Singla D., Malik T., Singh A., et al. Advances in understanding wheat-related disorders: A comprehensive review on gluten-free products with emphasis on wheat allergy, celiac and non-celiac gluten sensitivity // *Food Chemistry Advances*. 2024. Vol. 4, № 6. 100627. DOI: 10.1016/j.focha.2024.100627. EDN: IQFBOM.
42. Kakabouki I., Beslemes D.F., Tigka E.L., et al. Performance of Six Genotypes of Tritordeum Compare to Bread Wheat under East Mediterranean Condition // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. 9700. DOI: 10.3390/su12229700. EDN: GSIZPP.
43. Shewry P.R., Hey S.J. Do we need to worry about eating wheat? // *Nutrition Bulletin*. 2016. Vol. 41. P. 6–13. DOI: 10.1111/nbu.12186.
44. Vaquero L., Comino I., Vivas S., et al. Tritordeum: A novel cereal for food processing with good acceptability and significant reduction in gluten immunogenic peptides in comparison with wheat // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018. Vol. 98, № 6. P. 2201–2209. DOI: 10.1002/jsfa.8705.
45. Dingo C., Difonzo G., Paradiso V.M., et al. Type-I Sourdough to Produce Gluten-Free Muffin // *Microorganisms*. 2020. Vol. 8, № 8. 1149. DOI: 10.3390/microorganisms8081149. EDN: SCDSKB.
46. Susana Sánchez-León S., Haro C., Villatoro M., et al. Tritordeum breads are well tolerated with preference over gluten-free breads in non-celiac wheat-sensitive patients and its consumption induce changes in gut bacteria // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 101. P. 3508–3517.
47. Landolfi V., Giovanni D., Nicolai M.A., et al. The effect of nitrogen fertilization on the expression of protein in wheat and tritordeum varieties using a proteomic approach // *Food Research International*. 2021. Vol. 148, № 10. 110617. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110617. EDN: PQSALM.
48. Arora K., Gaudio G., Solovyev P., et al. *In vitro* faecal fermentation of Tritordeum breads and its effect on the human gut health // *Current Research in Microbial Sciences*. 2024. Vol. 6. 100214. DOI: 10.1016/j.crmicr.2023.100214. EDN: DDFBJV.
49. Russo F., Riezzo G., Orlando A., et al. A Comparison of the Low-FODMAPs Diet and a Tritordeum-Based Diet on the Gastrointestinal Symptom Profile of Patients Suffering from Irritable Bowel Syndrome-Diarrhea Variant (IBS-D): A Randomized Controlled Trial // *Nutrients*. 2022. Vol. 14, № 8. P. 1544. DOI: 10.3390/nu14081544. EDN: RMSGWY.
50. Russo F., Riezzo G., Linsalata M., et al. Managing Symptom Profile of IBS-D Patients With Tritordeum-Based Foods: Results From a Pilot Study // *Frontiers of Nutrition*. 2022. Vol. 9. 797192. DOI: 10.3389/fnut.2022.797192. EDN: NNMQS.
51. Riezzo G., Prospero L., Orlando A., et al. A Tritordeum-Based Diet for Female Patients with Diarrhea-Predominant Irritable Bowel Syndrome: Effects on Abdominal Bloating and Psychological Symptoms // *Nutrients*. 2023. Vol. 15. 1361. DOI: 10.3390/nu15061361. EDN: QTVGPG.
52. Visioli G., Lauro M., Vamerli T., et al. Comparative Study of Organic and Conventional Management on the Rhizosphere Microbiome, Growth and Grain Quality Traits of Tritordeum // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. 1717. DOI: 10.3390/agronomy10111717. EDN: JYIBTJ.
53. De Caro S., Antonella Venezia A., Di Stasio L., et al. Tritordeum: Promising Cultivars to Improve Health // *Foods*. 2024. Vol. 13, № 5. P. 661–669. DOI: 10.3390/foods13050661. EDN: LHTENQ.
54. Alvarez J.B., Ballesteros J., Sillero J.A. et al. Tritordeum: a new crop of potential importance in the food industry // *Heredity*. 1992. Vol. 116. P. 193–197.

55. Alvarez J.B., Ballesteros J., Arriaga H.O., et al. The Rheological Properties and Baking Performances of Flours from Hexaploid Tritordeums // *Journal of Cereal Science*. 1995. Vol. 21, № 3. P. 291–299. DOI: 10.1006/jcrs.1995.0032.
56. Berski W., Zdaniewicz M., Sabat R., et al. Technological Properties of Tritordeum Starch // *Applied Science*. 2024. Vol. 14, 4999. DOI: 10.3390/app14124999. EDN: OSOBOM.
57. Wang S., Li C., Copeland L., et al. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2015. Vol. 14, № 5. P. 568–585. DOI: 10.1111/1541-4337.12143.
58. Zdaniewicz M., Pater A., Hrabia O., et al. Tritordeum malt: An innovative raw material for beer production // *Journal of Cereal Science*. 2020. Vol. 96, N11. 103095. DOI: 10.1016/j.jcs.2020.103095. EDN: JYSRZS.
59. Nocente F., Natale C., Galassi E., et al. Using Einkorn and Tritordeum Brewers' Spent Grain to Increase the Nutritional Potential of Durum Wheat Pasta // *Foods*. 2021. Vol. 10, № 3. 502. DOI: 10.3390/foods10030502. EDN: OJVARM.
60. Gobbetti M., De Angelis M., Di Cagno R., et al. The sourdough fermentation is the powerful process to exploit the potential of legumes, pseudo-cereals and milling by-products in baking industry // *Critical Reviews of Food Science Nutrition*. 2020. Vol. 60. P. 2158–2173. DOI: 10.1080/10408398.2019.1631753. EDN: ORZEBP.

References

1. Suchowilska E, Kandler W, Wiwart M, et al. Is Tritordeum (*×Tritordeum martinii* A. Pujadas, nothosp. nov.) grain a potentially useful source of essential minerals in the human diet? *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023;115:104874. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.104874. EDN: IUZKKY.
2. Maghrebi M, Marín-Sanz M, Begona M, et al. The drought-induced plasticity of mineral nutrients contributes to drought tolerance discrimination in durum wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2024;215:109077. DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.109077. EDN: JONREV.
3. Avila CM, Rodríguez-Suarez C, Atienza SG. Tritordeum: creating a new crop species — the successful use of plant genetic resources. *Plants*. 2021;10:1029. DOI: 10.3390/plants10051029. EDN: PKUVNS.
4. Marín A, Alvarez JB, Marín LM, et al. The Development of Tritordeum: A Novel Cereal for Food Processing. *Journal of Cereal Science*. 1999;30(2):85-95. DOI: 10.1006/jcrs.1998.0235.
5. Papadopoulos G, Mavroeidis A, Stavropoulos P, et al. Tritordeum: a versatile and resilient cereal for Mediterranean agriculture and sustainable food production. *Cereal Research Communications*. 2023;6:401-6. DOI: 10.1007/s42976-023-00401-6. EDN: GEAKIS.
6. Yoldi-Achalandabaso A, Agirresarobe A, Katamadze A, et al. Tritordeum, barley landraces and ear photosynthesis are key players in cereal resilience under future extreme drought conditions. *Plant Stress*. 2025;15(3):100765. DOI: 10.1016/j.stress.2025.100765 t.
7. Ballesteros J, Ramírez M, Martínez C, et al. Bread-making quality in hexaploid tritordeum with substitutions involving chromosome 1D. *Plant Breeding*. 2003;122(1):89-91. DOI: 10.1046/j.1439-0523.2003.00806.x. EDN: BFCMQD.
8. Polonskiy V, Loskutov I, Sumina A. Biological role and health benefits of antioxidant compounds in cereal. *Biological Communications*. 2020;65(1):53-67. DOI: 10.21638/spbu03.2020.105. EDN: UCFLXQ.
9. Mattera M, Hornero-Méndez D, Atienza SG. Carotenoid content in tritordeum is not primarily associated with esterification during grain development. *Food Chemistry*. 2020;310(4):125847. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125847t. EDN: AAHHMZ.
10. Martín A, Sanchez-Mongelaguna E. Cytology and morphology of the amphiploid *Hordeum chilense* × *Triticum turgidum* conv. *durum*. *Euphytica*. 1981;31:261-267.
11. Różewicz M, Wyzińska M. Characteristics of Tritordeum and evaluation of its potential for cultivation in Poland, with considerations for the nutritional and fodder value of the grains. *Polish Journal of Agronomy*. 2021;44:15-21. DOI: 10.1007/978-94-009-0329-6_106.

12. Villegas D, Casadesús J, Atienza SG, et al. Tritordeum, wheat and triticale yield components under multi-local mediterranean drought conditions. *Field Crop Research*. 2010;116(1-2):68-74. DOI: 10.1016/j.fcr.2009.11.012.
13. Suchowilska E, Wiwart M, Sulyok M, et al. Mycotoxin profiles and plumpness of Tritordeum grain after artificial spike inoculation with *Fusarium culmorum* W.G. Smith. *International Journal of Food Microbiology*. 2025;427(16):110963. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110963. EDN: FKAHHS.
14. Martín LM, Alvarez JB. Use of interspecific hybridisation in quality improvement of cereals. In: *Durum wheat improvement in the Mediterranean region: New challenges*. Zaragoza: CIHEAM. 2000:447-454.
15. Kyrgiakos C, Sakka MK, Athanassiou CG. Population growth of different stored product species on wheat, barley, and tritordeum. *Food Bioscience*. 2024;61(10):104698. DOI: 10.1016/j.fbio.2024.104698. EDN: QPVXUN.
16. Landolfi V, Blandino M. Minor Cereals and New Crops: Tritordeum. *Sustainable Food Science – A Comprehensive Approach*. 2023;2:83-103. DOI: 10.1016/B978-0-12-823960-5.00023-8.
17. Gallardo M, Fereres E. Growth, grain yield and water use efficiency of tritordeum in relation to wheat. *European Journal of Agronomy*. 1993;2(2):83-91. DOI: 10.1016/S1161-0301(14)80137-8.
18. Montesano V, Negro D, De Lisi A, et al. Agronomic performance and phenolic profile of Tritordeum (*x Tritordeum martini* A. Pujadas) lines. *Cereal Chemistry*. 2021;98(2):382-391. DOI: 10.1007/978-94-009-0329-6_10610.1002/cche.10378. EDN: CWHZGR.
19. Suchowilska E, Wiwart M, Przybylska-Balcerek A. The profile of bioactive compounds in the grain of various Tritordeum genotypes. *Journal of Cereal Science*. 2021;102(11):103352. DOI: 10.1016/j.jcs.2021.103352. EDN: DNIQAQ.
20. Martínez-Peña R, Schleret A, Höhne M, et al. Source-sink dynamics in field-grown durum wheat under contrasting nitrogen supplies: key role of non-foliar organs during grain filling. *Frontiers of Plant Science*. 2022;22:869680. DOI: 10.3389/fpls.2022.869680. EDN: AQQZFI.
21. Molero G, Reynolds MP. Spike photosynthesis measured at high throughput indicates genetic variation independent of flag leaf photosynthesis. *Field Crops Research*. 2020;255(6):107866. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107866. EDN: NKSXN.
22. Sanchez-Bragado R, Vicente R, Molero G, et al. New avenues for increasing yield and stability in C3 cereals: exploring ear photosynthesis. *Current Opinion of Plant Biology*. 2020;56:223-234. DOI: 10.1016/j.pbi.2020.01.001. EDN: RDZIDU.
23. Gozzi M, Blandino M, Bruni R, et al. Mycotoxin occurrence in kernels and straws of wheat, barley, and tritordeum. *Mycotoxin Research*. 2024;40:203-210. DOI: 10.1007/s12550-024-00521-w. EDN: HIELRI.
24. Rodríguez-Suárez C, Dolores M, Requena-Ramírez E, et al. Prospects for tritordeum (*x Tritordeum martinii* A. Pujadas, Nothosp. Nov.) cereal breeding: Key points for future challenges. *Plant Breeding*. 2024;(7):1-10. DOI: 10.1111/pbr.13207.
25. Barro F, Fontes AG, Maldonado JM. Nitrate Uptake and Reduction by Durum Wheat (*Triticum turgidum*) and Tritordeum (*Hordeum chilense x Triticum turgidum*). *Journal of Plant Physiology*. 1994;143(3):313-317. DOI:10.1016/S0176-1617(11)81637-8.
26. Alvarez JB, Martín LM. Breadmaking Quality in Tritordeum: The Use-Possibilities of a New Cereal. In book: *Triticale: today and tomorrow*. Kluwer Academic Publishers. 1996:799-805. DOI: 10.1007/978-94-009-0329-6_106.
27. Erlandsson A. Tritordeum. Evaluation of a new food cereal. In: Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 2010. Available at: <https://www.slu.se/en/departments/plant-breeding/education/msc-projects>. Accessed: 12 Nov 2024.
28. Giordano D, Reyneri A, Locatelli M, et al. Distribution of bioactive compounds in pearled fractions of tritordeum. *Food Chemistry*. 2019;15(301):125228. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125228.
29. Paznocht L, Kotíková Z, Šulc M, et al. Free and esterified carotenoids in pigmented wheat, tritordeum and barley grains. *Food Chemistry*. 2018;240(1):670-8. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.151.
30. Requena-Ramírez MD, Rodríguez-Suarez C, Hornero-Mendez D, et al. Lutein esterification increases carotenoid retention in durum wheat grain. A step further in breeding and improving the commercial

- and nutritional quality during grain storage. *Food Chemistry*. 2024;435:137660. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137660. EDN: MFAKUZ.
31. Navas-Lopez JF, Ostos-Garrido FJ, Castillo A, et al. Phenolic content variability and its chromosome location in tritordeum. *Frontiers in Plant Science*. 2014;5(1):1-10. DOI: 10.3389/fpls.2014.00010.
 32. Sardella C, Burešová B, Kotíková Z, et al. Influence of Agronomic Practices on the Antioxidant Compounds of Pigmented Wheat (*Triticum aestivum* spp. *Aestivum* L.) and Tritordeum (\times *Tritordeum martini* A. Pujadas, nothosp. nov.) Genotype. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2023;71(36):13220-13233. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c02592. EDN: FEXWCP.
 33. Lachman J, Hejtmánková A, Orsák M, et al. Tocotrienols and tocopherols in colored-grain wheat, tritordeum and barley. *Food Chemistry*. 2018;240(1):725-735. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.123.
 34. Shewry PR, Brouns F, Dunn J, et al. Comparative compositions of grain of tritordeum, durum wheat and bread wheat grown in multi-environment trials. *Food Chemistry*. 2023;423:136312. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136312. EDN: SWGKJU.
 35. Martinek P, Ohnoutková L, Vyhnánek T, et al. Characteristics of wheat-barley hybrids (\times *Tritordeum* Ascherson et Graebner) under Central-European climatic conditions. *Biuletyn IHAR*. 2003;226/227:87-95.
 36. Wood PJ. Cereal β -glucans in diet and health. *Journal of Cereal Science*. 2007;46:230-8.
 37. Lukinac J, Juki M. Barley in the Production of Cereal-Based Products. *Plants*. 2022;11:3519. DOI: 10.3390/plants11243519. EDN: KVZVAV.
 38. Rakha A, Saulnier L, Aman P, et al. Enzymatic fingerprinting of arabinoxylan and β -glucan in triticale, barley and tritordeum grains. *Carbohydrate Polymers*. 2012;90(3):1226-1234. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.06.054.
 39. Nitride C, D'Auria G, Dente A, et al. Tritordeum as an Innovative Alternative to Wheat: A Comparative Digestion Study on Bread. *Molecules*. 2022;27:1308. DOI: 10.3390/molecules27041308. EDN: PJKFIG.
 40. Mamone G, Iacomino G. Comparison of the in vitro toxicity of ancient *Triticum monococcum* varieties ID331 and Monlis. *International Journal of Food Science Nutrition*. 2018;69:954-962. DOI: 10.1080/09637486.2018.1444019.
 41. Singla D, Malik T, Singh A, et al. Advances in understanding wheat-related disorders: A comprehensive review on gluten-free products with emphasis on wheat allergy, celiac and non-celiac gluten sensitivity. *Food Chemistry Advances*. 2024;4(6):100627. DOI: 10.1016/j.focha.2024.100627. EDN: IQFBOM.
 42. Kakabouki I, Beslemes DF, Tigka EL, et al. Performance of Six Genotypes of Tritordeum Compare to Bread Wheat under East Mediterranean Condition. *Sustainability*. 2020;12:9700. DOI: 10.3390/su12229700. EDN: GSIZPP.
 43. Shewry PR, Hey SJ. Do we need to worry about eating wheat? *Nutrition Bulletin*. 2016;41:6-13. DOI: 10.1111/nbu.12186.
 44. Vaquero L, Comino I, Vivas S, et al. Tritordeum: A novel cereal for food processing with good acceptability and significant reduction in gluten immunogenic peptides in comparison with wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018;98(6):2201-09. DOI:10.1002/jsfa.8705.
 45. Dingeo C, Difonzo G, Paradiso VM, et al. Type-I Sourdough to Produce Gluten-Free Muffin. *Microorganisms*. 2020;8(8):1149. DOI: 10.3390/microorganisms8081149. EDN: SCDSKB.
 46. Sánchez-León S, Haro C, Villatoro M, et al. Tritordeum breads are well tolerated with preference over gluten-free breads in non-celiac wheat-sensitive patients and its consumption induce changes in gut bacteria. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021;101:3508-17.
 47. Landolfi V, Giovanni D, Nicolai M-A, et al. The effect of nitrogen fertilization on the expression of protein in wheat and tritordeum varieties using a proteomic approach. *Food Research International*. 2021;148(10):110617. DOI: 10.1016/j.foodres.2021.110617. EDN: PQSALM.
 48. Arora K, Gaudio G, Solovyev P, et al. *In vitro* faecal fermentation of *Tritordeum* breads and its effect on the human gut health. *Current Research in Microbial Sciences*. 2024;6:100214. DOI: 10.1016/j.crmicr.2023.100214. EDN: DDFBJV.

49. Russo F, Riezzo G, Orlando A, et al. A Comparison of the Low-FODMAPs Diet and a Triticum-Based Diet on the Gastrointestinal Symptom Profile of Patients Suffering from Irritable Bowel Syndrome-Diarrhea Variant (IBS-D): A Randomized Controlled Trial. *Nutrients*. 2022;14(8):1544. DOI: 10.3390/nu14081544. EDN: RMSGWY.
50. Russo F, Riezzo G, Linsalata M, et al. Managing Symptom Profile of IBS-D Patients With Triticum-Based Foods: Results From a Pilot Study. *Frontiers of Nutrition*. 2022;9:797192. DOI: 10.3389/fnut.2022.797192. EDN: NNCMQS.
51. Riezzo G, Prospero L, Orlando A, et al. A Triticum-Based Diet for Female Patients with Diarrhea-Predominant Irritable Bowel Syndrome: Effects on Abdominal Bloating and Psychological Symptoms. *Nutrients*. 2023;15:1361. DOI: 10.3390/nu15061361. EDN: QTVGPG.
52. Visioli G, Lauro M, Vamerli T, et al. Comparative Study of Organic and Conventional Management on the Rhizosphere Microbiome, Growth and Grain Quality Traits of Triticum. *Agronomy*. 2020;10:1717. DOI: 10.3390/agronomy10111717. EDN: JYBTJ.
53. De Caro S, Antonella Venezia A, Di Stasio L, et al. Triticum: Promising Cultivars to Improve Health. *Foods*. 2024;13(5):661-9. DOI: 10.3390/foods13050661. EDN: LHTENQ.
54. Alvarez JB, Ballesteros J, Sillero JA, et al. Triticum: a new crop of potential importance in the food industry. *Hereditas*. 1992;116:193-197.
55. Alvarez JB, Ballesteros J, Arriaga HO, et al. The Rheological Properties and Baking Performances of Flours from Hexaploid Triticums. *Journal of Cereal Science*. 1995;21(3):291-9. DOI: 10.1006/jcrs.1995.0032.
56. Berski W, Zdaniewicz M, Sabat R, et al. Technological Properties of Triticum Starch. *Applied Science*. 2024;14:4999. DOI: 10.3390/app14124999. EDN: OSOBOM.
57. Wang S, Li C, Copeland L, et al. Starch Retrogradation: A Comprehensive Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2015;14(5):568-585. DOI: 10.1111/1541-4337.12143.
58. Zdaniewicz M, Pater A, Hrabia O, et al. Triticum malt: An innovative raw material for beer production. *Journal of Cereal Science*. 2020;96(11):103095. DOI: 10.1016/j.jcs.2020.103095. EDN: JYSRZS.
59. Nocente F, Natale C, Galassi E, et al. Using Einkorn and Triticum Brewers' Spent Grain to Increase the Nutritional Potential of Durum Wheat Pasta. *Foods*. 2021;10:502. DOI: 10.3390/foods10030502. EDN: OJVARM.
60. Gobbetti M, De Angelis M, Di Cagno R, et al. The sourdough fermentation is the powerful process to exploit the potential of legumes, pseudo-cereals and milling by-products in baking industry. *Critical Reviews of Food Science Nutrition*. 2020;60:2158-2173. DOI: 10.1080/10408398.2019.1631753. EDN: ORZEBP.

Статья принята к публикации 26.03.2025 / The article accepted for publication 26.03.2025.

Информация об авторах:

Вадим Игоревич Полонский, профессор-консультант кафедры ландшафтной архитектуры и ботаники, доктор биологических наук, профессор

Information about the authors:

Vadim Igorevich Polonskiy, Professor-Consultant at the Department of Landscape Architecture and Botany, Doctor of Biological Sciences, Professor

