

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СЕЛЕКЦИИ ЯЧМЕНЯ (*HORDEUM VULGARE*) В ВОЛГО-ВЯТСКОМ РЕГИОНЕ

DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-82-88

УДК 633.16:631.527.8

Поступление/Received: 27.12.2018

Принято/Accepted: 06.03.2019

О. Н. ШУПЛЕЦОВА^{1,2}, И. Н. ЩЕННИКОВА^{1,3}

GENETIC SOURCES FOR BARLEY (*HORDEUM VULGARE*) BREEDING IN THE VOLGA-VYATKA REGION

O. N. SHUPLETSOVA^{1,2}, I. N. SHCHENNIKOVA^{1,3}

¹ Федеральный аграрный научный центр (ФАНЦ) Северо-Востока, 610007 Россия, г. Киров, ул. Ленина, 166 а;

✉ olga.shuplecova@mail.ru

² Вятский государственный университет, 610000 Россия, г. Киров, ул. Московская, 36;

³ Вятская государственная сельскохозяйственная академия, 610017 г. Киров, Октябрьский проспект, 133;

✉ ischennikova@mail.ru

¹ Federal Agricultural Scientific Center (FASC) of the North-East, 166-a Lenina St., Kirov 610007, Russia;

✉ olga.shuplecova@mail.ru

² Vyatka State University, 36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia;

³ Vyatka State Agricultural Academy, 133 Oktyabrsky Ave., Kirov 610017, Russia;

✉ ischennikova@mail.ru

Актуальность. В условиях северо-востока Нечерноземной зоны России актуально создание сортов ячменя с устойчивостью к повышенной почвенной кислотности, засухе и болезням. Повышение урожайности на стрессовых фонах достигалось сочетанием различных селекционных методов, в т. ч. с привлечением клеточных технологий. **Материалы и методы.** Источником селекционно ценных признаков являлись образцы ячменя из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР). Коллекционные образцы ячменя изучали в полевых и лабораторных испытаниях ФАНЦ Северо-Востока по следующим целевым качествам вновь создаваемых сортов: урожайность зерна, продолжительность вегетационного периода, устойчивость к полеганию, болезням, почвенному стрессу. На искусственных питательных средах *in vitro* с добавлением селективных агентов, моделирующих воздействие природных стрессоров, осуществляли культивирование каллусной ткани ячменя и регенерацию растений. **Результаты и обсуждение.** Для дальнейшей селекционной работы выделены источники: скороспелости – ‘Дина’ (к-29216, Россия), ‘Андрей’ (к-30122, Россия) и др.; сочетающие урожайность со скороспелостью – ‘Белогорский 90’ (к-29770, Россия), ‘Сябра’ (к-29917, Беларусь) и др.; устойчивости к полеганию – ‘Муссон’ (к-30968, Россия), ‘Феникс’ (к-30835, Украина) и др.; болезням – ‘Дина’ (к-29216, Россия), ‘Медикум 33б’ (к-3096, Россия) и др.; почвенным стрессам – ‘Тандем’ (к-30883, Россия), ‘Новичок’ (к-30806, Россия) и др. Кроме того, выделены образцы, перспективные для проведения клеточной селекции – ‘Эколог’ (к-29417, Россия), ‘Conrad’ (к-30406, США) и др. Определены общие принципы подбора исходных генотипов для использования в культуре ткани ячменя. Практический интерес представляет применение клеточной селекции по отношению к чувствительным и среднеустойчивым к стрессорам сортам. С участием коллекционных образцов созданы сорта ярового ячменя, адаптивные к условиям возделывания в Волго-Вятском регионе: методом гибридизации и отбора – более тридцати сортов, с привлечением культуры ткани *in vitro* – шести сортов.

Ключевые слова: ячмень, генетический источник, коллекция, урожайность, устойчивость, алюмокислый стресс, засуха, скороспелость, полегание, болезни, культура *in vitro*, соматональные линии, регенерант

Background. The environmental conditions in the northeast of the Russian Non-Black-Soil zone require development of barley cultivars with resistance to higher soil acidity, drought and diseases. Increased productivity in stressful environments was achieved by combining different breeding techniques, including application of cell technologies. **Materials and methods.** Barley accessions from the unique collection of the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR) served as sources of useful traits. These accessions underwent field- and laboratory-based research at the FASC of the North-East, which was targeted at the main qualities of breeding value: grain yield, growing season duration, and resistance to lodging, diseases and soil stress. Cultivation of callus tissues and regeneration of barley plants were performed *in vitro* on artificial nutrient media modified by adding selective agents simulating the effect of natural stressors. **Results and discussion.** After studying the accessions from VIR for various traits of breeding value for the environments of the Volga-Vyatka region, the following breeding sources were selected: cvs. ‘Dina’ (k-29216, Russia), ‘Andrey’ (k-30122, Russia), etc. for their earliness; ‘Belogorsky 90’ (k-29770, Russia), ‘Syabra’ (k-29917, Belarus), etc. for combined high yield and earliness; ‘Musson’ (k-30968, Russia), ‘Fenix’ (k-30835, Ukraine), etc. for lodging resistance; ‘Dina’ (k-29216, Russia), ‘Medikum’ (k-30962, Russia), etc. for disease resistance; and ‘Tandem’ (k-30883, Russia), ‘Novichok’ (k-30806, Russia), etc. for soil stress resistance. Besides, cvs. ‘Ekolog’ (k-29417, Russia), ‘Conrad’ (k-30406, USA), etc. were identified as promising for cellular breeding. General principles regulating selection of initial genotypes for barley tissue culture were formulated. Of practical interest is application of cell-level breeding techniques to cultivars sensitive or moderately resistant to stressors. Accessions from VIR’s collection have been used to develop spring barley cultivars adapted to the cultivation conditions of the Volga-Vyatka region: more than 30 cultivars through hybridization and selection, and 6 cultivars with the use of *in vitro* tissue culture.

Key words: barley, genetic source, collection, yield, resistance, aluminum-induced oxidative stress, drought, earliness, lodging, diseases, *in vitro* culture, somaclonal lines, regenerant

Введение

Для почв северо-востока Нечерноземной зоны России в свете прогнозируемого изменения климата особую актуальность приобретает целенаправленное создание сортов с адаптивными реакциями, обеспечивающими комплексную устойчивость к повышенной почвенной кислотности, токсичности алюминия и засухе. Кроме того, серьезной проблемой для сельскохозяйственных культур была и остается сложная фитосанитарная обстановка на посевах, обусловленная наличием комплекса причин (Nettevich, 2008; Surin et al., 2014; Batalova et al., 2017). Среди значимых зерновых культур ячмень наиболее чувствителен к почвенным стрессам, что обусловлено слаборазвитой корневой системой растения и низкой способностью к хелатообразованию. Поэтому одним из резервов роста продуктивности ячменя является повышение стрессоустойчивости вновь создаваемых сортов (Kosareva, 2012).

Наиболее дешевым и экологически чистым путем, который обеспечивает высокую урожайность на стрессовых фонах при минимальных затратах энергии, является селекция (Rodina, 2006). Подходы в селекции ячменя, как и любой другой культуры, имеют свои особенности, что связано с требованиями сельхозтоваропроизводителей к производимой продукции. Несмотря на значительные достижения в селекции, широкая географическая и экологическая разнородность сельскохозяйственных угодий России указывает на необходимость создания набора географически и экологически специализированных сортов ячменя.

Начальным этапом селекционного процесса является подбор исходного материала, являющегося генетическим источником целевых качеств вновь создаваемых сортов. Богатейшим источником селекционно ценных признаков является уникальная коллекция Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова (ВИР), где представлено все мировое разнообразие местных и вновь созданных селекционных сортов ячменя (Loskutov, 2009).

В современном сельском хозяйстве повышение устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды достигается сочетанием различных подходов. Так, методами традиционной селекции (гибридизация и отбор) создаются пластичные сорта, обладающие повышенной устойчивостью к какому-либо стрессовому фактору. Преимущество гибридной селекции состоит в целенаправленном синтезе желательных для селекции свойств с использованием разнообразных компонентов. Гибридизация существенно расширяет творческие возможности отбора, благодаря возникающим рекомбинациям генов и трансгрессиям (Zaushintsena, 2009). Вовлечение в селекционный процесс коллекционных образцов позволяет получить гибридный материал, обладающий большим спектром различных качественных показателей для отбора среди них наиболее ценных форм (Rodina, 2006).

Одной из проблем традиционного направления селекции является длительный период выведения сорта, который, как правило, составляет не менее 10 лет. Дополнительным инструментом повышения эффективности селекционных методов является культивирование клеток и тканей растений *in vitro* на искусственных питательных средах с добавлением селективных агентов, имитирующих/моделирующих воздействие природных стрессов, что позволяет проводить целенаправленный отбор устойчивых каллусных культур (соматоклонов), а впоследствии – растений-регенерантов. Наличие полезных мутаций среди соматоклональных линий позволяет их использовать в селекции различной направленности.

В отличие от гибридизации, культивирование клеток *in vitro* не разрушает ценного сочетания генов, достигнутого в результате предыдущей селекции. Вариации затрагивают лишь отдельные участки генома. В основе этих изменений лежит соматоклональная изменчивость, которая обусловлена дестабилизацией генетической и эпигенетической программы растительной ткани при отсутствии онтогенетического (организменного) контроля (Dolgikh, 2005; Rozhanskaya, 2016). По этой причине соматоклональную изменчивость обычно используют для улучшения отдельных признаков у существующих сортов. Для агрономического применения соматоклональная изменчивость имеет важное преимущество в улучшении того или иного признака без изменения основного генетического фона (Vyrubalová et al., 2011).

Одним из лимитирующих факторов эффективности получения и отбора соматоклонов в каллусной культуре зерновых злаков является генетическая детерминация процессов каллусогенеза и морфогенеза и последующей регенерации растений-регенерантов. Для ячменя генотипические различия по регенерационной способности особенно значительны, вплоть до полного ее отсутствия (Sidorov et al., 2009; Hua et al., 2013).

В статье представлены анализ и описание коллекционных образцов с учетом проблем селекции ярового ячменя для условий Волго-Вятского региона, где основными лимитирующими факторами являются продолжительность вегетационного периода и его отдельных фаз, низкое естественное плодородие на фоне повышенной кислотности почв, весенне-летние засухи, а также многочисленные болезни. Кроме того, изучен биотехнологический потенциал некоторых коллекционных образцов.

Цель исследований – изучение коллекции ВИР для выявления источников селекционно ценных признаков, перспективных для создания сортов ячменя, адаптивных к условиям Волго-Вятского региона, как методами гибридизации, так и с использованием методов биотехнологии.

Материал и методы

Полевые исследования проводили на опытном поле Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (ФАНЦ Северо-Востока; г. Киров) в 2007–2018 гг. Объектами послужили 413 коллекционных образцов ячменя ярового (*Hordeum vulgare* L.) различного эколого-географического происхождения, представлявшие выборку из РФ, стран СНГ, Европы, Азии, Америки, Африки и Австралии.

Коллекционный материал оценивали по основным селекционно ценным признакам с учетом продолжительности вегетационного периода, устойчивости к полеганию и болезням, стрессовым абиотическим факторам, урожайности зерна согласно методикам (Diagnostics...1988; Lisitsyn, 2005; Loskutov et al., 2012). Исследования проводили в полевых, вегетационных и лабораторных условиях. В качестве стандартов использовали сорта ячменя, рекомендованные Госкомиссией по сортоиспытанию в Кировской области.

Культивирование каллусной ткани ячменя и последующий отбор устойчивых линий проводили по методикам, разработанным в лаборатории биотехнологии растений и микроорганизмов ФАНЦ Северо-Востока (Shupletsova et al., 2015).

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли методом дисперсионного анализа с использованием табличного редактора Excel (MS Office 2007) и селекционно-ориентированных программ AGROS, версия 2.07.

Результаты и обсуждения

Многолетнее изучение образцов ячменя из коллекции ВИР в почвенно-климатических условиях Волго-Вятского региона позволило объективно оценить их селекционно ценные признаки по следующим направлениям: скороспелость и продолжительность отдельных фаз вегетации, устойчивость к полеганию, засухе, болезням. Особую ценность генотипов представляет сочетание высокой урожайности с представленными качествами (Shchennikova, 2016).

Селекция только на основе сокращения продолжительности вегетационного периода встречает препятствие в виде низкой урожайности скороспелых ячменей. Анализ урожайности коллекционных образцов разных групп спелости показал преимущество среднеспелых по сравнению со скороспелыми как по отдельным элементам структуры продуктивности, так и по урожайности в целом. Образцы из группы скороспелых характеризовались относительно низким коэффициентом продуктивного кущения (в сред-

нем 2,0), мелким зерном (масса 1000 зерен в среднем 39,3 г) и устойчивостью к полеганию на уровне 7,2 баллов. Корреляционный анализ позволил установить, что урожайность изученных в опытах скороспелых образцов в условиях Волго-Вятского региона определялась продуктивностью колоса ($r = 0,63$) и растения ($r = 0,92$), а также их устойчивостью к полеганию ($r = 0,69$). Были определены генетические источники, сочетающие скороспелость и урожайность (табл. 1).

Оценку коллекционных образцов по устойчивости к полеганию проводили с учетом выявленной ранее достоверной отрицательной корреляции между устойчивостью к полеганию и высотой растения (в среднем $r = -0,55$).

Урожайность ячменя на кислых почвах изучали на опытном участке дерново-подзолистых среднесуглинистых почв с уровнем $pH_{\text{col}} = 3,92-4,44$ и содержанием ионов Al^{3+} 0,5–4,3 мг/100 г в почвенном растворе. Оценивали влияние развития отдельных признаков на формирование урожайности (рисунок).

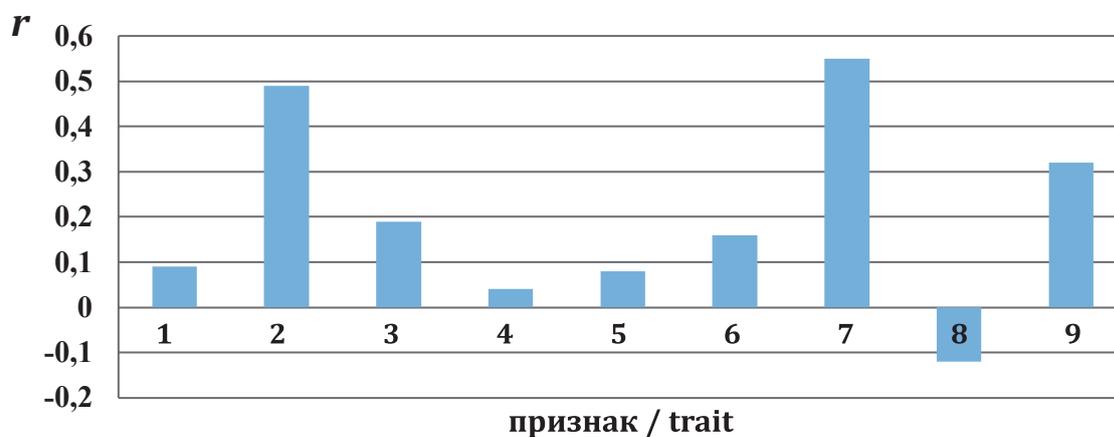


Рисунок. Коэффициенты (r) парных корреляций признаков с урожайностью сортов
Примечание: 1 – сохранность растений к уборке; 2 – продуктивная кустистость; 3 – длина колоса; 4 – число колосков в колосе; 5 – число зерен в колосе; 6 – масса зерна с колоса; 7 – масса зерна с растения; 8 – масса 1000 зерен; 9 – длина вегетационного периода на фоне алюмоокислого стресса

Figure. Pair correlation ratios (r) between various traits and yield in barley cultivars under aluminum-induced oxidative stress

Note: 1 – number of harvestable plants; 2 – productive tillering capacity; 3 – ear length; 4 – number of spikelets per ear; 5 – number of grains per ear; 6 – grain weight per ear; 7 – grain weight per plant; 8 – 1000 grain weight; 9 – growing season duration

На основании исследований установлено, что значительный вклад в формирование высокой урожайности в стрессовых условиях вносила продуктивная кустистость ($r = 0,49$), которая, в свою очередь, существенно влияла на формирование массы зерна с растения ($r = 0,80$). Не установлено достоверного влияния показателей «масса 1000 зерен» и «количество сохранившихся к уборке растений» на урожайность ($r = -0,12$ и $0,09$). Высокой продуктивной кустистостью характеризовались образцы с более продолжительным межфазным периодом всходы-кущение ($r = 0,88$). Таким образом, при отборе высокопродуктивных образцов на фоне почвенного стресса, определяемого низкой pH и наличием ионов Al^{3+} , особое внимание целесообразно уделять коллекционным образцам с высокой продуктивной кустистостью, тогда как параметры колоса в данном случае не имели большого значения.

Сравнительная оценка ячменя по устойчивости к дефициту влаги в полевых и лабораторных опытах показала достоверную корреляцию между устойчивостью образцов

и озерненностью ($r = 0,52$) в лабораторном эксперименте, а также продуктивностью ($r = 0,53$) колоса при изучении в полевых условиях.

Установлено, что все образцы с лабораторной устойчивостью к стрессовому фактору выше средней превысили по урожайности в полевых опытах стандарт 'Биос 1' (Россия) на $30-150$ г/м² (5,0–33,9%). У высокоустойчивых образцов 'Тандем' (к-30883, Россия) и 'Bonita' (к-35417, Аргентина) при урожайности 560 и 596 г/м², превышение над стандартом составляло 50 и 86 г/м² соответственно.

Устойчивость к болезням часто сцеплена с генами, несущими нежелательные признаки (мелкое зерно, позднеспелость и т. д.) (Sheshegova, 2014). Поэтому наибольшую селекционную ценность имеют источники, обладающие адаптивностью и высоким продукционным потенциалом, обеспеченным гомеостазом и благоприятным сочетанием хозяйственно ценных признаков. В то же время в селекции ячменя большой интерес представляют источники с комплексной устойчивостью к нескольким заболеваниям.

При оценке генофонда на искусственном инфекционном фоне выявлена восприимчивость большинства образцов к пыльной головне. Лишь образец 'Петр' (к-30888, Россия) за все годы исследований проявил стабильный иммунитет к болезни. В изучаемом генофонде за годы исследований выделены образцы, отличающиеся практическим иммунитетом к полосатой и сетчатой пятнистости. Обращает на себя внимание то, что при очень высоком поражении (60–80%) урожайность выделенных коллекционных образцов существенно не снижалась, что так же важно в селекции на неспецифическую устойчивость.

Таким образом, в результате проведенных многолетних исследований были выявлены генетические источники,

представляющие интерес для дальнейшей селекционной работы (табл. 1).

Линии, созданные с участием коллекционных образцов, изучаются на всех этапах селекционного процесса. Так, в 2018 г. при проведении гибридизации в качестве компонентов скрещивания было привлечено 10 коллекционных образцов, выделенных в результате предварительного изучения; среди них 'Казьминский' (к-30926, Россия), 'Феникс' (к-30835, Украина), 'Sultan' (к-19798, Нидерланды) и др. В конкурсном сортоиспытании изучались сорта, созданные с участием образцов: 'Петр' (к-30888), 'Ача' (к-30243), 'Челябинский 99' (к-30777, Россия), 'Annabel' (к-30821, Германия), 'NCK 95098' (к-35415, Аргентина) и др.

Таблица 1. Источники селекционно ценных признаков для селекции адаптивных сортов ячменя
Table 1. Sources of valuable traits for breeding adaptable barley cultivars

СЕЛЕКЦИОННО ЦЕННЫЕ ПРИЗНАКИ / TRAITS OF BREEDING VALUE	Источники / SOURCES
скороспелость	Россия: Дина (к-29216), Андрей (к-30122), Белогорский 90 (к-29770); Болгария: Веслец (к-30904); Индия: местный (к-18079); США: Missouri (к-15407), С.И. 13664 (к-26419); Эфиопия: Jet (к-18703), местный (к-3282), местный (к-8730).
сокращение продолжительности межфазных периодов	всходы-колошение – Россия: Стимул (к-30882), Ача (к-30243), Баган (к-29040); Украина: Сюрприз (к-30841), Адапт (к-30364); Чехия: Ditta (к-30938); Болгария: Веслец (к-30904); Индия: местный (к-18079); США: Missouri (к-15407); Эфиопия: местный (к-8730); колошение-созревание – Латвия: Malva (к-30925), Idumeja (к-30922); Польша: Korona Lashego (к-27471); Казахстан: Илек 34 (к-30949); Финляндия: Hja 87061 (к-30456), Botnia (к-30458); Канада: Paragon (к-20259), BT-666/NJEV1 (к-30611); Эфиопия: местный (к-8730).
скороспелость и урожайность	Россия: Дина (к-29216), Андрей (к-30122), Белогорский 90 (к-29770); Беларусь: Сябра (к-29917); Латвия: Druvis (к-30921), Malva (30925); Болгария: Веслец (30904); Германия: Danuta (к-30889), Франция: City (к-30741); Канада: Codac (к-30874).
скороспелость и устойчивость к болезням	Беларусь: Сябра (к-29917), Гонар (к-29914); Украина: Сюрприз (к-30841); Латвия: Druvis (к-30921); Польша: Korona Lashego (к-27471); Канада: Codac (к-30874).
устойчивость к полеганию	Россия: Муссон (к-30968), Казьминский (30926); Украина: Феникс (к-30835); Латвия: Kristaps (к-30964); Эстония: Delibes (к-30377); Польша: Rodos (к-30256); Чехия: Novum (к-29378), Amulet (к-30943); Германия: Orthega (к-30468), Brenda (к-30464); Нидерланды: Sultan (к-19798); Дания: Ментор (к-30873); Финляндия: Botnia (к-30458), Viivi (к-30461); Великобритания: Соопер (к-30375); Аргентина: NCK 95098 (к-35415); Индия: Karan 201 (к-28963); Чехия: Prosa (к-30928).
урожайность	Россия: Золотник (к-30845), Дуэт (к-30020), Бином (к-30985), МИК-1 (к-30593), Скок (к-30827); Беларусь: Бурштын (к-30566), Гонар (к-29914), Сябра (к-29917); Украина: Лотос (к-30826), Эдем (к-30363), Экзотик (ИА 0804751); Латвия: Malva (к-30925), Druvis (к-30921); Польша: Rodos (к-30256); Германия: Annabel (к-30821); Казахстан: Илек 34 (к-30949); Дания: 23007 (к-30440); США: Azure (к-27997); Чехия: Amulet (к-30943).
устойчивость к пыльной головне	Россия: Петр (к-30888), Лель (к-30804), Мураш (к-30822); Нидерланды: Sultan (к-19798); Эфиопия: местный (к-8430).
комплексная устойчивость к нескольким заболеваниям	Россия: Дина (к-29216), Медикум 336 (к-30962), Муссон (к-30968), Натали (к-30957); Украина: Эдем (к-30363), Сюрприз (к-30841), Мироновский 86 (к-30248), Гетьман (к-30965); Казахстан: Илек 34 (к-30949); Польша: Korona Lashego (к-27471); Германия: Margret (к-30966), Xanadu (к-30973), Orthega (к-30468); Канада: Buck (к-30173), Codac (30874).
устойчивость к алюминокислотному стрессу	Россия: Добрый (к-29215), Новичок (к-30806), Лель (к-30804), Тандем (к-30883), Виконт (к-30301), Партнер (к-30830), Приазовский 9 (к-30595), Черноградский 770 (к-30451), Сигнал (к-30846), Русь (к-29723), Лука (к-30899); Беларусь: Дзівосны (к-30213); Украина: Джерело (ИА 0804829), Бадьорый (ИА 0804830); Болгария: Веслец (к-30904); Канада: Kinkora (к-23988); США: Crest (к-30411).
устойчивость к дефициту влаги	Россия: Тандем (к-30883), Родник Прикамья (к-31077), Челябинский 96 (к-30562), Челябинский 99 (к-30777), Сонет (к-30448), Омский голозерный 1 (к-30919); Канада: Buck (к-30173); Аргентина: Bonita (к-35417); США: Azure (к-27997); Индия: местный (к-18079).
способность к каллусогенезу и регенерации в культуре ткани <i>in vitro</i>	Россия: Меркурий (к-30805), Новичок (к-30806), Джин (к-30021), Добрый (к-29215), Дуэт (к-30020), Ратник (к-30828), Дина (к-29216), Икар (к-26824), Абава (24724), Эколог (к-29417), Лель (к-30804), Зевс (к-30843), Челябинский 99 (к-30777), Тандем (к-30883), Родник Прикамья (31077), Омский голозерный 1 (к-30919), Петр (к-30888); Беларусь: Белорусский 18 (к-18329); Украина Симфония (к-30996); Великобритания: Valetta (22345), Lulu (25169); Германия: Volla (к-19375), Keystone (к-19304), Annabel (к-30821); США: Conrad (к-30406), Naxby (к-31053).

На протяжении ряда лет образцы коллекции активно использовались для введения в культуру *in vitro* и проведения клеточной селекции на устойчивость к токсичности алюминия и засухе. Широкому применению культуры ткани зерновых культур препятствует зачастую низкий уровень или отсутствие каллусогенной способности исходных генотипов, а также низкий выход регенерантов, сохраняющих целевой признак (Dolgikh, 2005; Nikitina et al., 2013). За годы исследований в культуру *in vitro* было введено более 150 генотипов ячменя из коллекции ВИР. Однако лишь 43 генотипа были способны индуцировать на искусственных питательных средах каллусные культуры со стабильным уровнем морфогенеза и регенерации (не менее 10%), достаточным для проведения клеточной селекции и получения стрессоустойчивых регенерантных линий. Следует отметить, что коллекционные образцы, обладающие способностью к каллусогенезу и морфогенезу, зачастую не являлись источниками стрессоустойчивости. Лишь в результате проявления соматоклональной изменчивости и отбора на селективных средах из них были получены генотипы с полезными признаками.

В настоящее время определены общие закономерности подбора исходных генотипов для использования в культуре ячменя. Реальные положительные результаты были достигнуты, прежде всего, при введении в культуру ткани *in vitro* гибридов первого или второго поколения с участием коллекционных генотипов, что, вероятно, обусловлено повышением частоты соматоклональной изменчивости в несбалансированном генетическом аппарате. Для сортов со стабильным генотипом получение соматоклонов в каллусной культуре с последующим отбором на селективных средах было малоэффективным.

Кроме того, установлен более низкий уровень регенерационной способности в группе раннеспелых сортов ячменя по сравнению с позднеспелыми. Например, при выращивании донорных растений ячменя в условиях жаркого лета часто наблюдали отсутствие растений-регенерантов в каллусной культуре зародышей. Известно, что ускоренное развитие зародышей сопровождается сокращением периода индукции первичного каллуса и быстрым прохождением оптимальной для регенерации растений в культуре *in vitro* фазы развития (Dunaeva et al., 2000).

Результаты оценки регенерантных линий были не всегда однозначны. Отсутствуют положительные результаты применения клеточной селекции на устойчивость к засухе или токсичности кислых почв по отношению к сортам, уже обладавшим устойчивостью к данным стрессорам. Например, урожайность регенерантных линий алюмоустойчивого сорта 'Новичок' на кислых почвенных фонах была значительно ниже урожайности самого 'Новичка', что, вероятно, связано с исчерпанием его потенциала адаптивной изменчивости в отношении токсического действия алюмокислотности. Практический интерес представляет применение клеточной селекции по отношению к чувствительным и среднеустойчивым к стрессу сортам.

В настоящее время на селективных средах *in vitro* получено более полутора тысяч каллусных линий, из которых регенерировано более тысячи регенерантных растений, семенное потомство которых послужило исходным материалом (легло в основу) создания стрессоустойчивых генотипов. В настоящий момент получено шесть алюмоустойчивых сортов (два из них запатентованы) и более десяти генетических источников стрессоустойчивости (табл. 2).

Таблица 2. Источники, созданные методом клеточной селекции ячменя

Table 2. Sources obtained by cellular breeding techniques in barley

Исходная форма (сорт, гибрид) / Initial form (cultivar, hybrid)	Выделено перспективных генотипов / Promising genotypes selected		Стрессоры / Stressors
	генетические источники* / Genetic sources*	сорта* / Cultivars*	
Джин	774-04; 775-04	–	токсичность алюминия
Абава × Икар	889-93	889-93	токсичность алюминия
Lulu × Conrad) × 2867-80	917-01; 780-04; 781-04	Форвард (917-01)	токсичность алюминия, засуха, болезни
Valetta × Lulu	173-85	530-98; 550-08	токсичность алюминия, болезни
(Lulu × Conrad) × Дуэт	552-98; 494-07; 507-07; 514-07; 515-07	Бионик (552-98)	токсичность алюминия, засуха, болезни
Фермер × Челябинский 99	362-02	484-09	токсичность алюминия, засуха

*включены в коллекцию ВИР в качестве генетических источников стрессоустойчивости

*are included in VIR's collection as genetic sources of stress resistance

В некоторых случаях селекционную ценность представляли несколько регенерантных линий, инициированных одним исходным сортом; так, например, генотип 552-98 являлся исходным для пяти регенерантных линий, 999-93 – для трех линий. Получены регенерантные линии ячменя, сочетающие устойчивость к абиотическим стрессам с устойчивостью к фитопатогенам. Перспективно вовлечение в селекционный процесс «двойных» и «тройных» регенерантов, неоднократно прошедших через отбор в культуре *in vitro*, например, регенерантные линии от 530-98 (Shupletsova, Shchennikova, 2016).

Лучшие генотипы ячменя, выделенные в процессе изучения мировой коллекции ВИР, широко вовлекаются в селекционный процесс. Линии, созданные с участием кол-

лекционных образцов, изучаются в лаборатории селекции и первичного семеноводства ячменя ФАНЦ Северо-Востока на всех этапах селекционного процесса (Shchennikova, 2016). В настоящее время создано и передано на государственные испытания более 30 сортов ярового ячменя, 12 из которых в разные годы были районированы на территории РФ. Так, один из первых в стране сортов ячменя интенсивного типа – сорт 'Луч' – создан методом отбора мутантной формы из образца к-18816 (Дания). В родословной скоропелого сорта 'Дина' присутствуют образцы к-20436 (Эфиопия) и к-19009 (Норвегия) высокоурожайного, с ценным по качеству зерном, устойчивого к поражению пыльной головней сорта 'Эколог' – к-19304 (Канада). Для селекции пивоваренного ячменя 'Джин' использовали образец к-19010

(Швеция). Алюмотолерантный сорт 'Новичок' создан с использованием сортообразцов из Швеции ('Birgitta', к-19658) и Нидерландов ('Effendi', к-21873). В родословной ячменя сорта 'Фермер' присутствует образец к-9427 (местный, Коми), многогранного ячменя 'Тандем' – к-29489 (Россия). Для создания высокоурожайного, включенного в список ценных по качеству сортов РФ сорта 'Памяти Родины' использовали образец к-30372 (Германия). Переданные на государственное испытание сорта регенерантного происхождения 'Форвард' и 'Бионик' (2014 г.), сочетающие высокую урожайность с устойчивостью к эдафическому стрессу, созданы с использованием образцов 'Lulu' (к-25169, Великобритания) и 'Conrad' (к-30406, США).

Заключение

Таким образом, созданная в результате многолетних исследований рабочая коллекция современных источников хозяйственно ценных признаков, нашла свое практическое и успешное использование в селекции ярового ячменя. С участием коллекционных образцов созданы с использованием гибридизации и методов биотехнологии новые районированные высокоурожайные, адаптивные к условиям возделывания в Волго-Вятском регионе линии и сорта ячменя, проходящие изучение на всех этапах селекционного процесса.

References/Литература

- Batalova G. A., Shevchenko S. N., Lisitsyn E. M., Tulyakova M. V., Rusakova I. I., Zheleznikova V. A., Gradoboyeva T. P. (2017) Methodology for the development of productive, environmentally sustainable cultivars of hulled oats (Metodologiya sozdaniya produktivnykh, ekologicheskii ustoychivyykh sortov ovsy plenchatogo). *Russian Agricultural Science (Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka)*, no. 6, pp. 3–8 [in Russian] (Баталова Г. А., Шевченко С. Н., Лисицын Е. М., Тулякова М. В., Русакова И. И., Железникова В. А., Градобоева Т. П. Методология создания продуктивных, экологически устойчивых сортов овса пленчатого // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 6. С. 3–8).
- Diagnostics of plant resistance to stressful effects: Methodical guidelines (Diagnostika ustoychivosti rasteniy k stressovym vozdeystviyam: metodicheskoye rukovodstvo) (1988) Ed.: G. V. Udovenko. Leningrad, 227 p. [in Russian] (Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: методическое руководство / под общ. ред. Г. В. Удовенко. Л., 1988. 227 с.).
- Dolgikh Y. I. (2005) Somaclonal variability in plants and possibilities of its practical use (case study of maize) (Somaklonalnaya izmenchivost rasteniy i vozmozhnosti yeye prakticheskogo ispolzovaniya (na primere kukuruzy). Author's synopsis of Dr. Biol. Sci. degree thesis. Moscow, 45 p. [in Russian]. (Долгих Ю. И. Соматональная изменчивость растений и возможности ее практического использования (на примере кукурузы) : автореф. дисс. ... докт. биол. наук, М., 2005. 45 с.).
- Dunaeva S. E., Lukyanova M. V., Kovaleva O. N., Kozyreva O. G. (2000) Ability of immature embryos to produce *in vitro* regenerant plants of early- and late-ripening barley varieties. 1. Regeneration of plants in the primary callus obtained from immature embryos (Sposobnost nezrelykh zarodyshey k obrazovaniyu rasteniy-regenerantov v kulture in vitro u ranne- i pozdnespelykh sortov yachmenya. 1. Regeneratsiya rasteniy v pervichnom kalluse, poluchennom ot nezrelykh zarodyshey). *Plant Physiology (Fiziologiya rasteniy)*, vol. 47, no. 1, pp. 53–57 [in Russian] (Дунаева С. Е., Лукьянова М. В., Ковалева О. Н., Козырева О. Г. Способность незрелых зародышей к образованию растений-регенерантов в культуре *in vitro* у ранне- и позднеспелых сортов ячменя. 1. Регенерация растений в первичном каллусе, полученном от незрелых зародышей // Физиология растений. 2000. Т. 47, № 1. С. 53–57.).
- Hua W., Zhu J., Shang Y., Wang J., Jia Q., Lin F., Yang J. (2013) Establishment of a highly efficient regeneration method from the scraped broken embryo of mature barley seed. *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 93, no. 6, pp. 1029–1035. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-109>
- Kosareva I. A. (2012) Studying the collection of crops and their wild relatives for the traits associated with resistance to toxic elements of acidic soils. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, vol. 170, pp. 148–159 [in Russian] (Косарева И. А. Изучение коллекции сельскохозяйственных культур и диких родичей по признакам устойчивости к токсическим элементам кислых почв // Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2012. Т. 170. С. 148–159).
- Lisitsyn E. M. (2005) Potential aluminum resistance of crops and its implementation in the environments of the European northeast of Russia (Potentsialnaya alyumoustoychivost selskokhozyaystvennykh rasteniy i yeye realizatsiya v usloviyakh yevropeyskogo severo-vostoka Rossii). Dr. Biol. Sci. degree thesis. Moscow, 365 p. [in Russian] (Лисицын Е. М. Потенциальная алюмоустойчивость сельскохозяйственных растений и ее реализация в условиях европейского северо-востока России : дисс. ... док. биол. наук. Москва, 2005. 365 с.).
- Loskutov I. G. (2009) Oat and barley genetic resources as a source of productive breeding in Russia (Geneticheskiye resursy ovsy i yachmenya – istochnik rezul'tativnoy selektsii v Rossii). In: Genetic Resources of Cultivated Plants in the 21st Century: Status, Problems, Prospects (Geneticheskiye resursy kulturnykh rasteniy v XXI veke: sostoyaniye, problemy, perspektivy), St. Petersburg: VIR, 2009, pp. 200–205 [in Russian] (Лоскутов И. Г. Генетические ресурсы овса и ячменя – источник результативной селекции в России // Генетические ресурсы культурных растений в XXI веке: состояние, проблемы, перспективы. СПб. : ВИР, 2009. С. 200–205).
- Loskutov I. G., Kovaleva O. N., Blinova E. V. (2012) Methodological guidelines for the study and conservation of the international barley and oat collection (Metodicheskiiye ukazaniya po izucheniyu i khraneniyu mezhdunarodnoy kolleksii yachmenya i ovsy). St. Petersburg: VIR, 63 p. [in Russian] (Лоскутов И. Г., Ковалева О. Н., Блинова Э. В. Методические указания по изучению и хранению международной коллекции ячменя и овса. СПб. : ВИР, 2012. 63 с.).
- Nettevich E. D. (2008) Selected articles: Breeding and seed production of spring cereal crops (Izbrannyye trudy. Selektsiya i semenovodstvo yarovykh zernovykh kultur). Moscow; Nemchinovka: NIISKH CRNZ, 348 p. [in Russian] (Неттевич Э. Д. Избранные труды. Селекция и семеноводство яровых зерновых культур. М. ; Немчиновка : НИИСХ ЦРНЗ. 2008. 348 с.).
- Nikitina E. D., Khlebova L. P., Sokolova G. G., Ereshchenko O. V. (2013) The development of stress-resistant stock of spring bread wheat by *in vitro* cell selection (Sozdaniye stressoustoychivogo materiala yarovoy myagkoj pshenitsy s ispolzovaniyem kletочноj selektsii in vitro) *Newsletter of Altai State University (Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta)*, no 3/2, pp. 95–98 [in Russian] (Никитина Е. Д., Хлебцова Л. П., Соколова Г. Г., Ерещенко О. В. Создание стрессоустойчивого материала яровой мягкой пшеницы с использованием клеточной селекции *in vitro* // Известия Алт. гос. ун-та. 2013. № 3/2. С. 95–98). DOI: 10.14258/izvasu(2013)3.2-20

- Rodina N. A. (2006) Barley breeding in the northeast of the Non-Black-Soil Region (Selektsiya yachmenya na Severo-Vostoke Nечерноземья). Kirov: Zonal Res. Inst. of the N.E., 488 p. [in Russian] (Родина Н. А. Селекция ячменя на Северо-Востоке Нечерноземья. Киров : Зональный НИИСХ Северо-Востока, 2006. 488 с.).
- Rozhanskaya O. A. (2016) About somaclonal variability of plants as a source of biodiversity for breeding (O somaklonalnoy izmenchivosti rasteniy kak istochnike bioraznoobraziya dlya selektsii) In: Plant Breeding: Past, Present and Future (Selektsiya rasteniy: proshloye, nastoyashcheye i budushcheye). Proceedings of the I All-Rus. Scient. and Pract. Conf. with Internat. Particip. dedicated to the 140th Anniversary of Belgorod State University, Belgorod, November 24–26. Belgorod, 152–156 pp. [in Russian] (Рожанская О. А. О соматклональной изменчивости растений как источнике биоразнообразия для селекции // Селекция растений: прошлое, настоящее и будущее. Сб. матер. I Всерос. науч.-практ. конфер. с междунар. уч., посв. 140-летию НИУ БелГУ. Белгород, 24–26 ноября 2016 г. Белгород, 2016. С. 152–156).
- Shchennikova I. N. (2016) Spring barley breeding for the environments of the Volga-Vyatka region (Selektsiya yarovogo yachmenya dlya usloviy Volgo-Vyatskogo regiona). Dr. Agric. Sci. degree thesis. Moscow, 349 p [in Russian] (Щенникова И. Н. Селекция ярового ячменя для условий Волго-Вятского региона : дисс ... докт. с.-х. наук. Москва, 2016. 349 с.).
- Sheshegova T. K. (2014) Methods of breeding cereal crops for disease resistance in the Northeast Breeding Center (Metody selektsii zernovykh kultur na ustoichivost k boleznyam v Severo-Vostochnom selektsentre). In: *Methods and Technologies in Plant Breeding (Metody i tekhnologii v selektsii rasteniy)*, Kirov: N.E. Res. Inst. of Agric., pp. 34–42 [in Russian] (Шешегова Т. К. Методы селекции зерновых культур на устойчивость к болезням в Северо-Восточном селекцентре // Методы и технологии в селекции растений. Киров : НИИСХ Северо-Востока. 2014. С. 34–42).
- Shupletsova O. N., Shchennikova I. N. (2016) Results of using cell technologies for creation of new barley varieties resistant against aluminum toxicity and drought. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, vol. 20, no. 5, pp. 623–628 [in Russian] (Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н. Результаты использования клеточных технологий в создании новых сортов ячменя, устойчивых к токсичности алюминия и засухе // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016. Т. 20, № 5. С. 623–628). DOI: 10.18699/VJ16.183
- Shupletsova O. N., Shchennikova I. N., Shirokikh I. G. (2015) Development of barley genotypes with complex resistance to edaphic stresses using cell breeding (Sozdaniye genotipov yachmenya s kompleksnoy ustoichivostyu k edaficheskim stressam metodami kletochnoy selektsii) In: *Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences (Doklady Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk)*, no. 1/2, pp. 16–20 [in Russian] (Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н., Широких И. Г. Создание генотипов ячменя с комплексной устойчивостью к эдафическим стрессам методами клеточной селекции // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2015. № 1/2. С. 16–20).
- Sidorov E. A., Chernobrovkina M. A., Nikolaeva A. N., Kharchenko P. N., Dolgov S. V. (2009) The induced morphogenesis and *in vitro* plant regeneration of domestic barley cultivars. *Agricultural Biology*, no. 3, pp. 73–78 [in Russian] (Сидоров Е. А., Чернобровкина М. А., Николаева А. Н., Харченко П. Н., Долгов С. В. Индуцированный морфогенез и регенерация *in vitro* растений ячменя отечественных сортов // С.-х. биология. 2009. № 3. С. 73–78).
- Surin N. A., Zobova N. V., Lyakhova N. E. (2014) Genetic capacity and breeding importance of Siberian barley. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, vol. 18, no. 2, pp. 378–386 [in Russian] (Сурин Н. А., Зобова Н. В., Ляхова Н. Е. Генетический потенциал и селекционная значимость ячменя Сибири // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2014. Т. 18, № 2. С. 378–386).
- Vyroubalová S., Šmehilová M., Galuszka P., Ohnoutková L. (2011) Genetic transformation of barley: limiting factors. *Biologia Plantarum*, no. 2, pp. 213–224. <https://doi.org/10.1007/s10535-011-0032-8>
- Zaushintsena A. V. (2009) Genetic sources for implementation of the main trends in barley breeding in Siberia. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*, vol. 165, pp. 101–105 [in Russian] (Заушинцева А. В. Генетические источники для реализации основных направлений селекции ячменя в Сибири // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2009. Т. 165. С. 101–105).

Прозрачность финансовой деятельности/The transparency of the financial activities

Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования/How to cite this article

Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н. Генетические источники селекции ячменя (*Hordeum vulgare*) в волго-вятском регионе. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2019; 180(1): 82–88. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-82-88

Shupletsova O. N., Shchennikova I. N. Genetic sources for barley (*Hordeum vulgare*) breeding in the volga-vyatka region. Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2019; 180(1):82–88. DOI: 10.30901/2227-8834-2019-1-82-88

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы/The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work

Дополнительная информация/Additional information

Полные данные этой статьи доступны/Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-82-88>

Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы/The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employer

Все авторы одобрили рукопись/All authors approved the manuscript

Конфликт интересов отсутствует/No conflict of interest