

ГЕНЕТИКА КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ ДИКИХ РОДИЧЕЙ

Научная статья
УДК 633.161:575.118.2
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-170-176



Генетический контроль признака алюмоустойчивости у образцов ярового ячменя

О. В. Яковлева

Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ольга Владимировна Яковлева, oly.yakovleva@mail.ru

Актуальность. Ячмень является культурой, резко реагирующей на повышенную почвенную кислотность. В кислой почве свободные катионы Al^{3+} наиболее токсичны. Особенно сильно негативное воздействие алюминия проявляется на ранних стадиях развития растений и при недостатке питательных элементов. Признак алюмоустойчивости определяется экспрессией олигогенов либо полигенных комплексов, а также их взаимодействием. Закономерности наследования алюмоустойчивости ячменя изучены недостаточно.

Материалы и методы. Материалом для исследования явились образцы ярового ячменя, контрастно различающиеся по устойчивости к токсичным ионам алюминия: высокоустойчивый местный образец к-9730 (Россия) и неустойчивый сорт 'Colsess IV'. Для гибридологического анализа были отобраны фенотипически однородные линии, получены гибриды F_1 - F_5 и F_2BC_1 . Расщепление гибридных популяций по устойчивости оценивали по степени роста надземной части и корневой системы в условиях ионного стресса при тестирующей концентрации 185 мкМ ионов алюминия и уровне pH 4,0.

Результаты. Высокая устойчивость растений ячменя к токсичным ионам алюминия образца к-9730, оцененная по реакции корня и ростка на воздействие стрессора, контролируется двумя доминантными генами. Методом отбора растений старших поколений гибридов выделены ценные генотипы с высоким уровнем устойчивости к ионному стрессу и создан донор алюмоустойчивости ячменя Л-30-1, характеризующийся также и другими ценными для селекции признаками.

Заключение. Изучение наследования устойчивости растений ячменя к токсичным ионам алюминия (185 мкМ Al^{3+} , pH 4,0) у образца к-9730 и сорта 'Colsess IV' позволило установить ряд закономерностей. Результаты проведенного исследования рекомендуется использовать в процессе селекции при выборе родительских пар для создания новых сортов ячменя, которые будут наиболее адаптированы к неблагоприятным условиям среды.

Ключевые слова: культурный ячмень, ионы алюминия, гены устойчивости, генотип, генетический контроль

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания согласно тематическому плану ВИР по проекту № FGEM-2022-0009 «Структурирование и раскрытие потенциала наследственной изменчивости мировой коллекции зерновых и крупяных культур ВИР для развития оптимизированного генбанка и рационального использования в селекции и растениеводстве».

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Яковлева О.В. Генетический контроль признака алюмоустойчивости у образцов ярового ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(1):170-176. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-170-176

GENETICS OF CULTIVATED PLANTS AND THEIR WILD RELATIVES

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-170-176

Genetic control of the aluminum resistance trait in barley hybrids

Olga V. Yakovleva

*N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, St. Petersburg, Russia***Corresponding author:** Olga V. Yakovleva, oly.yakovleva@mail.ru

Background. Barley is a crop that reacts sharply to increased soil acidity. In acidic soil, free Al^{3+} cations are the most toxic. The negative effects of aluminum are especially pronounced in the early stages of plant development and with a lack of nutrients. The character of aluminum resistance is determined by the expression of oligogenes or polygenic complexes, as well as their interaction. The patterns of inheritance of aluminum resistance in barley have not been studied enough.

Materials and methods. The material for the study included spring barley accessions contrasting in their resistance to toxic aluminum ions: highly resistant local accession k-9730 (Russia), and susceptible cv. 'Colsess IV'. Phenotypically homogeneous lines were selected for hybridological analysis, and F_1 - F_5 and F_2BC_1 hybrids were obtained. Segregation among hybrid populations in resistance was assessed according to the degree of growth of the aboveground part and root system under ion stress conditions at a testing concentration of 185 μ of aluminum ions and a pH level of 4.0.

Results. High resistance of k-9730 barley plants to toxic aluminum ions, assessed by the responses of the root and sprout to the effects of the stressor, is controlled by two dominant genes. By selecting plants of older hybrid generations, valuable genotypes with high levels of resistance to ion stress were identified and a donor of aluminum resistance for barley, L-30-1, was developed, which is also characterized by other traits valuable for breeding.

Conclusion. Studying the inheritance of resistance to toxic aluminum ions (185 μ Al^{3+} , pH 4.0) in the k-9730 and 'Colsess IV' barley genotypes helped to establish a number of patterns. The results of the study are recommended to be used in the breeding process when choosing parent pairs to develop new barley cultivars that will be most adapted to adverse environmental conditions.

Keywords: cultivated barley, aluminum ions, resistance genes, genotype, genetic control

Acknowledgements: the research was conducted within the framework of the state task according to the theme plan of VIR, Project No. FGEM-2022-0009 "Structuring and disclosing the potential of hereditary variation in the global collection of cereal and groat crops at VIR for the development of an optimized genebank and its sustainable utilization in plant breeding and crop production".

The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Yakovleva O.V. Genetic control of the aluminum resistance trait in barley hybrids. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(1):170-176. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-1-170-176

Введение

Воздействие факторов окружающей среды на сельскохозяйственное производство может быть весьма разнообразным. В кислых почвах содержатся токсичные для растений элементы, такие как алюминий, железо, марганец, которые негативно влияют на корневую систему, замедляют реакции фосфорилирования сахаров и репликации нуклеиновых кислот, снижают поступление кальция, магния, калия, фосфора. Алюминий может снижать потребление воды растениями. Особенно сильно негативное воздействие алюминия проявляется на ранних стадиях развития растений и при недостатке питательных элементов (Yakovleva, 2018).

По результатам мониторинга пахотных угодий, кислые почвы в Российской Федерации занимают 4,1 млн га, то есть около сорока процентов от обследованной площади. При этом в Северо-Западном регионе отмечены наибольшие площади кислых почв, 5,9% из них составляют сильно- и очень сильнокислые почвы (Gogmachadze G., Gogmachadze L., 2021).

Использование устойчивых к токсичным почвенным факторам сортов позволит снизить потери урожая, которые в пересчете на зерно могут составлять более 12 млн т (Sychev, Akanova, 2019).

Ячмень является культурой, резко реагирующей на повышенную почвенную кислотность. Для эффективной селекции ячменя по признаку устойчивости к токсичным ионам алюминия необходим поиск источников и правильный подбор пар для скрещивания при создании новых генотипов. Необходимы также знания о генетическом контроле признака.

Начальные сведения о сортах и линиях ячменя, которые переносят токсичные уровни Al^{3+} и низкий уровень pH почвы, появились в середине прошлого века (Foy et al., 1965; Sloomaker, Arzadun, 1969; Reid, 1976; Minella, Sorrells, 1997). Сообщалось о более чем двухстах генотипах ячменя, устойчивых к алюминию, однако поиск новых источников устойчивости продолжается и в настоящее время. Выделенные источники толерантности могут быть представлены озимыми и яровыми формами, двурядным и шестирядным подвидами различного эколого-географического происхождения.

В литературе сообщается, что устойчивость к токсичности ионов алюминия и низкому уровню pH является наследуемым признаком (Reid, 1971; Stølen, Andersen, 1978). У яровых ячменей различия по устойчивости к низкому уровню pH почвы объясняются наличием доминантного гена *Pht* (Stølen, Andersen, 1978). Ряд исследователей сообщали о гене *Alp*, контролирующем устойчивость сортов 'Dayton' и 'Smooth Awn 16' (Reid, 1971; Minella, Sorrells, 1997). Предполагается, что гены *Pht* и *Alp* могут быть одним и тем же геном устойчивости, но исследования по идентификации генов не проводились. Различными методами генетического анализа определено, что гены локализованы в четвертой хромосоме (4HL) дистально от центромеры (Minella, Sorrells, 1997; Tang et al., 2000). Во всех опубликованных исследованиях толерантность определялась как доминантный признак. Предполагалось также, что на уровень устойчивости растений ячменя оказывают влияние второстепенные гены либо гены с малым эффектом, а разные аллели одного гена могут определять разную устойчивость к ионам алюминия (Rigin, Yakovleva, 2006).

Показано также, что наследование устойчивости к алюминию может быть полигенным. Изучение генети-

ческого контроля устойчивости к алюминию у ячменя проводилось с помощью генетической карты, созданной на основе молекулярных маркеров. Локусы количественных признаков (quantitative trait loci – QTL) были обнаружены на хромосомах 2Н, 3Н и 4Н. Для определения предполагаемой функции QTL использовался поиск гомологичных последовательностей, что позволило выявить потенциальные гены-кандидаты устойчивости к алюминию.

В современных научных исследованиях основным геном устойчивости ячменя к токсичности ионов алюминия считается *HvAACT1* (*HvMATE*). Он кодирует белок группы MATE и способствует высвобождению из верхушек корней цитрата, который защищает растущие клетки и способствует удлинению корней (Ma et al., 2016).

Семейство белков MATE участвует в регуляции процессов роста и развития растений. Эти белки отвечают за транспортировку вторичных метаболитов, токсичных соединений и тяжелых металлов, а также за устойчивость к болезням и регуляцию гормонов растений.

Ген *HvMATE* связан с толерантностью многих генотипов ячменя, включая 'Murasakimochi', 'Dayton', 'Honen', 'WB229', 'Svanhals', 'Br2' и 'Brindabella'. Более высокий уровень экспрессии *HvAACT1* в верхушках корней наблюдается у устойчивых генотипов ячменя по сравнению с чувствительными.

Недавно было обнаружено, что у толерантных генотипов ячменя более высокая экспрессия гена *HvAACT1* связана с наличием вставки длиной 1023 пар оснований в 5'-UTR области *HvAACT1*. Данная вставка повышает уровень экспрессии гена в верхушках корней (Ma et al., 2016). Подобная мутация обнаруживается только у устойчивого к Al^{3+} культурного ячменя, происходящего из районов Восточной Азии.

Некоторые исследователи отмечают высокий уровень алюмоустойчивости у сорта ячменя 'Dayton'. Выявлены четыре микросателлитных маркера *Vmac310*, *Vmag353*, *HVM68* и *HVMCABG*, ассоциированные с геном *Alp*. Между маркерами *HVM68* и *Vmag353*, которые находятся на расстоянии 3,5 и 3,1 см от гена *Alp*, было установлено наибольшее сцепление. С помощью микросателлитного маркера *Vmag353* можно прогнозировать устойчивость растений ячменя к ионам алюминия с вероятностью до девяноста пяти процентов (Raman et al., 2002). Определены и другие специфические маркеры, такие как *1kb-insertion* и *HvMATE21 indel*, сцепленные с геном *HvAACT1*. В настоящее время идентифицирован аллель *bpb-6949*, контролирующей рост корневой системы у дикого и культурного ячменя. Определена его локализация на расстоянии 0,8 см от гена *HvMATE* (Cai et al., 2013; Yakovleva, 2023).

Способность ячменя противостоять вредному воздействию токсичных ионов алюминия – это сложный биологический процесс, который обусловлен генетическими характеристиками растения. В основе генетического контроля признака лежит экспрессия олигогенов и полигенных комплексов, а также их взаимодействие. К сожалению, закономерности наследования алюмоустойчивости ячменя изучены явно недостаточно.

Целью наших исследований являлось изучение генетического контроля алюмоустойчивости у выделенного нами ранее (Yakovleva, 1998) устойчивого образца ячменя к-9730 с помощью гибридологического анализа.

Материалы и методы

Исходным материалом для исследования явились образцы ярового ячменя из коллекции генетических ресурсов растений ВИР, различающиеся по уровню устойчивости к токсичным ионам алюминия. Для массовой оценки сортов использовался лабораторный метод «корневого теста» при раннем развитии растений ячменя (Yakovleva, 2021). После одновременного измерения ростовых параметров каждого образца вычисляли индексы длины корня (ИДК) и ростка (ИДР) как отношение средней длины показателя в опыте к средней длине этого показателя в контрольном варианте. Изученные образцы ячменя распределяли по шкале на пять групп устойчивости. Шкала представлена следующим образом: 1 – ИД > 0,81 – высокоустойчивые; 2 – ИД 0,61–0,80 – устойчивые; 3 – ИД 0,41–0,60 – среднеустойчивые; 4 – ИД 0,31–0,40 – среднечувствительные; 5 – ИД < 0,30 – неустойчивые.

Среди изученных 600 образцов коллекции нами были выделены высокоустойчивый образец местного ячменя к-9730 из России (ИДК = $0,78 \pm 0,07$) и неустойчивый сорт 'Colsess IV' (к-24626, США) (ИДК = $0,20 \pm 0,05$). Для гибридологического анализа из этих сортов отобрали фенотипически однородные линии.

Родительские формы, гибриды F_1 – F_3 и последующих поколений, а также гибриды F_2BC_1 выращивали на опытном поле научно-производственной базы (НПБ) «Пушкинские и Павловские лаборатории ВИР» (Санкт-Петербург, Пушкин). Семена родительских форм и гибридов высевали весной в оптимальные сроки, по 20 зерен в рядок на метровых делянках. Все поколения гибридов ячменя высевали между делянками родительских растений. Семьи F_3 высевали в поле в трех повторностях, не менее 120 растений в каждой.

Скрещивания образцов проводили твел-методом в прямых и обратных комбинациях (Merezhko et al., 1973). Уборку в поле проводили по растениям с последующей индивидуальной оценкой в лаборатории.

Родительские и гибридные растения ячменя изучали в лабораторных условиях. При ионном стрессе с тестирующей концентрацией 185 мкМ ионов алюминия и рН 4,0 оценивали расщепление гибридов по степени роста надземной части и корневой системы как показателям устойчивости.

У гибридов F_1 определяли степень фенотипического доминирования (h_p) по признаку устойчивости к ионам алюминия (Veil, Atkins, 1965).

Наследование устойчивости к токсичным ионам изучали при анализе расщепления семей гибридов третьего поколения, представляющих собой потомство одного растения F_1 . Полученные данные распределения гибридных растений по устойчивости к алюминию объединяли после статистической проверки на однородность.

Среди изучаемых гибридных растений выделяли положительные и отрицательные трансгрессивные формы, которые выходили за пределы классов распределения по длине корня и по длине ростка от родителей в большую или меньшую сторону.

Для дальнейшего изучения в следующих поколениях и создания доноров алюмоустойчивости ячменя использовали семьи растений с высокой устойчивостью (Al^{3+} 185 мкМ, рН 4,0), выделенные из третьего (F_3) поколения гибридов.

Проводили дисперсионный и корреляционный анализы показателей устойчивости (Zaitsev, 1984). Степень

соответствия фактически полученных данных теоретически ожидаемым результатам рассчитывали с помощью критерия хи-квадрат (χ^2) Пирсона. Статистическая обработка результатов генетического анализа выполнена с помощью программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

При выращивании родительских форм и гибридов в дистиллированной воде без ионов алюминия различия по средней длине корня у родительских сортов и гибридов статистически незначительны. Средняя длина корней у образца к-9730 и сорта 'Colsess IV' составляла $6,75 \pm 0,27$ см и $6,30 \pm 0,21$ см соответственно, что свидетельствует об отсутствии достоверных различий между ними. Таким образом, мы предположили, что родительские формы не различались по главным генам, контролирующим рост корней растений ячменя. Подобные исследования родительских образцов в дистиллированной воде без ионов алюминия по длине ростка показали отсутствие различий по генам, детерминирующим длину ростка.

Поэтому в генетическом анализе именно эти ростовые параметры использовались для характеристики устойчивости отдельного растения ячменя к токсичным ионам алюминия.

В проведенном исследовании гибриды и родительские формы были представлены не менее чем тридцатью растениями.

В условиях ионного стресса изменчивость длины корня и длины ростка родительских форм и гибридов F_1 оказалась относительно невысокой. Так, величина дисперсии (s^2) составила 1,1 см, а коэффициент вариации (Cv) равен 13,10%. В соответствии с полученными результатами можно говорить о генетической однородности гибридов первого поколения и родителей.

Дальнейшее изучение гибридов первого поколения от реципрокных скрещиваний устойчивого образца к-9730 и неустойчивого сорта 'Colsess IV' по длине корня показало детерминацию признака только со стороны ядра, так как не было выявлено значимых различий между гибридами F_1 прямых и обратных скрещиваний, а их устойчивость была близка к значению к-9730 (средняя длина корней $F_1 = 6,6 \pm 0,19$ см).

В соответствии с требованиями генетического анализа при изучении первого поколения гибридов необходимо учитывать величину исследуемого признака и определять степень фенотипического доминирования.

Полученные нами результаты свидетельствуют о полном доминировании высокой устойчивости к ионам алюминия над их чувствительностью. В прямой (к-9730 × 'Colsess IV') и обратной ('Colsess IV' × к-9730) комбинациях скрещивания степень доминирования составила 0,83 и 0,87 соответственно.

В процессе генетического анализа исследовали 436 семей гибридов третьего поколения прямых и обратных комбинаций от скрещивания образца к-9730 и 'Colsess IV'. Семьи F_3 являлись потомствами отдельных растений F_1 , по каждой семье анализировали 20–30 растений и рассчитывали среднюю длину корня. Статистический анализ степени однородности выборок показал отсутствие различий между изучаемыми комбинациями, поэтому выборки объединили.

На стрессовом фоне средняя длина корня растений сорта 'Colsess IV' равна $3,6 \pm 0,07$ см (дисперсия – 0,068),

образца к-9730 – $6,3 \pm 0,27$ см (величина дисперсии – 0,549).

Среди 436 семей F_3 обнаружено 410 гомозиготных и гетерозиготных по устойчивости к ионам алюминия семей и 26 гомозиготно неустойчивых семей. Соотношение фенотипов (410 : 26) достоверно не отличается от теоретически ожидаемого 15 : 1 ($\chi^2 = 0,07$), таким образом образцы к-9730 и 'Colsess IV' различаются по двум доминантным генам (табл. 1).

Расщепление по длине корня изучали у гибридных семей F_2BC_1 , полученных от анализирующих скрещиваний F_1 (к-9730 × 'Colsess IV') × 'Colsess IV'. В данном опыте 42 семьи были устойчивы, а 11 семей – неустойчивы к изучаемому стрессу. Фактическое соотношение фенотипов (42 : 11) существенно не отличалось от теоретического 3 : 1 ($\chi^2 = 0,51$). Таким образом, было подтверждено предположение о контроле высокой устойчивости к алюминию у образца к-9730 двумя доминантными генами.

В стрессовых условиях у ячменя наблюдалась значительная дифференциация образцов по реакции надземной части (росток), были выделены формы, контрастно различающиеся по устойчивости.

Гибридные растения тех же семей F_3 изучили по реакции ростка на действие токсичных ионов алюминия. Измерение ростков и корней проводили одновременно. В водном растворе с ионами алюминия родительские сорта к-9730 и 'Colsess IV' имели статистически достоверные различия по длине ростка ($13,5 \pm 0,27$ см и $9,3 \pm 0,17$ см соответственно).

Неустойчивыми считали семьи F_3 , у которых средняя длина растений была менее 9,0 см, как у сорта 'Colsess IV'. В изучаемой комбинации 404 семьи были устойчивы по длине ростка, 32 семьи отнесены к неустойчивому классу. Соотношение фенотипов (404 : 32) не отличалось от 15 : 1 ($\chi^2 = 0,55$), что указывает на контроль устойчивости растений ячменя к токсичным ионам алюминия двумя доминантными генами (табл. 2).

Таким образом, на основании результатов гибридологического анализа 436 семей F_3 к-9730 × 'Colsess IV' и 'Colsess IV' × к-9730 показано, что различия по устойчивости корней и ростка к токсичным ионам алюминия детерминированы двумя неаллельными генами.

Среди проанализированных нами гибридов F_3 выделили 27 семей, значительно превышающих по устойчивости родительский образец к-9730. Положительные трансгрессивные формы сохраняли высокий уровень устойчивости в четвертом, пятом и шестом поколениях. Методом многократного индивидуального отбора создан донор Л-30-1. Определено, что устойчивость этого донора к ионам алюминия контролируется двумя доминантными генами. Продолжительность вегетационного периода Л-30-1 не превышает 89 дней (среднеспелость). Колос остистый, шестирядный, средней озерненности. Длина колоса – $10,7 \pm 0,25$ см. Зерновки хорошо выполненные, крупные, пленчатые, масса 1000 зерен – $39,4 \pm 1,49$ г (рисунок).

Таким образом, образец ячменя к-9730, защищенный двумя доминантными генами устойчивости к токсич-

Таблица 1. Наследование алюмоустойчивости у гибридов ярового ячменя третьего поколения (тестирование по длине корня)

Table 1. Inheritance of aluminum resistance in the third-generation spring barley hybrids (root length testing)

Комбинация скрещивания / Cross combination	Оценено семей F_3 / Total number of F_3 families	Соотношение фенотипов «устойчивый : чувствительный» / Resistant : Susceptible phenotype ratio		χ^2	P
		фактическое / observed	теоретическое / expected		
к-9730 × 'Colsess IV'	179	164 : 15	15 : 1	1,39	0,50–0,75
'Colsess IV' × к-9730	257	246 : 11	15 : 1	1,70	0,25–0,50
Всего:	436	410 : 26	15 : 1	0,07	0,95–0,99

Примечание: $\chi^2_{0,05} = 3,84$

Note: $\chi^2_{0,05} = 3.84$

Таблица 2. Наследование алюмоустойчивости у гибридов ярового ячменя третьего поколения (тестирование по длине ростка)

Table 2. Inheritance of aluminum resistance in the third-generation spring barley hybrids (sprout length testing)

Комбинация скрещивания / Cross combination	Оценено семей F_3 / Total number of F_3 families	Соотношение фенотипов «устойчивый : чувствительный» / Resistant : Susceptible phenotype ratio		χ^2	P
		фактическое / observed	теоретическое / expected		
к-9730 × 'Colsess IV'	179	166 : 13	15 : 1	0,27	0,75–0,95
'Colsess IV' × к-9730	257	238 : 19	15 : 1	0,58	0,50–0,75
Всего:	436	404 : 32	15 : 1	0,55	0,75–0,90

Примечание: $\chi^2_{0,05} = 3,84$

Note: $\chi^2_{0,05} = 3.84$

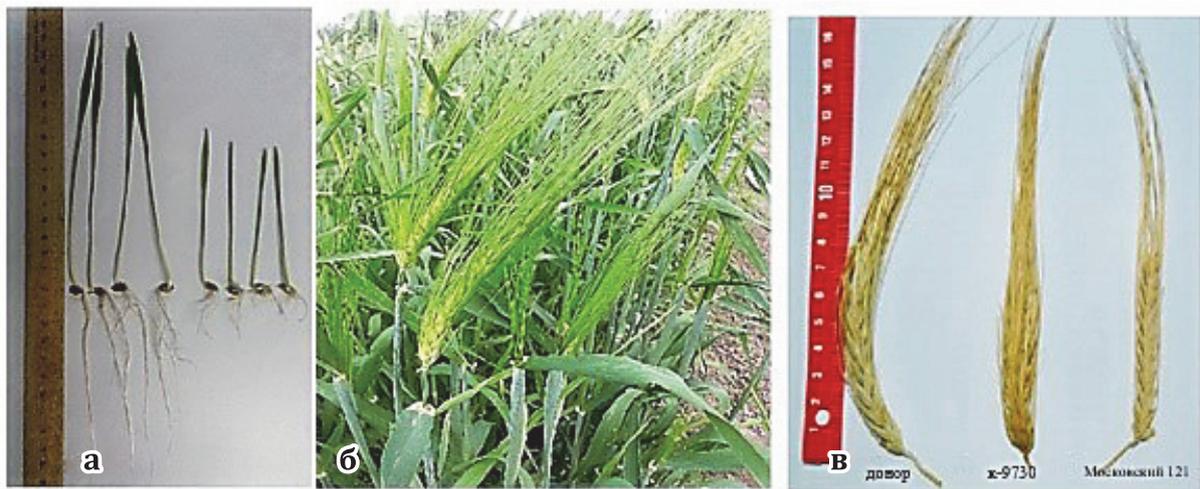


Рисунок. Донор устойчивости к токсичным ионам алюминия Л-30-1:

а – гибридные растения F₃; б – взрослое растение; в – колос

Figure. L-30-1, a donor of resistance to toxic aluminum ions:

a – F₃ hybrid plants; б – an adult plant; в – the ear

ным ионам алюминия, соответствует всем критериям, предъявляемым к донорам (Merezhko, 1984).

В результате многолетней работы с использованием метода генетического анализа удалось выделить ценные рекомбинанты ячменя и создать доноры устойчивости к токсичным ионам алюминия (185 мкМ Al³⁺, pH 4,0). Новый высокоустойчивый исходный материал может стать важным источником в улучшении сортов ячменя при селекции на эдафическую устойчивость.

Заключение

Изучение наследования устойчивости растений ячменя к токсичным ионам алюминия (185 мкМ Al³⁺, pH 4,0) у образца к-9730 и сорта 'Colsess IV' позволило установить ряд закономерностей. Так, высокая устойчивость по реакции корня и ростка является доминантным признаком по отношению к низкой устойчивости. Устойчивость образца к-9730 детерминирована двумя неаллельными генами. Среди старших поколений гибридов методом индивидуального отбора созданы ценные генотипы с высоким уровнем устойчивости к ионному стрессу.

Результаты проведенного исследования рекомендуются использовать в процессе селекции при выборе родительских пар для создания новых сортов ячменя, которые будут наиболее адаптированы к неблагоприятным условиям среды.

References / Литература

- Beil G.M., Atkins R.E. Inheritance of quantitative characters in grain sorghum. *Iowa State Journal of Science*. 1965;39(3):345-358.
- Cai S., Wu D., Jabeen Z., Huang Y., Huang Y., Zhang G. Genome-wide association analysis of aluminum tolerance in cultivated and Tibetan wild barley. *PLoS One*. 2013;8(7):e69776. DOI: 10.1371/journal.pone.0069776
- Foy C.D., Armiger W.H., Briggie L.W., Reid D.A. Differential aluminum tolerance of wheat and barley varieties in acid soils. *Agronomy Journal*. 1965;57(5):413-417. DOI: 10.2134/agronj1965.00021962005700050001x
- Gogmachadze G.D., Gogmachadze L.G. On some results of agro-ecological monitoring of soils and land resources of the Russian Federation in 2019. *AgroEcoInfo*. 2021;4(46):17. [in Russian] [Гогмачадзе Г.Д., Гогмачадзе Л.Г. О некоторых результатах агроэкологического мониторинга почв и земельных ресурсов Российской Федерации в 2019 году. *АгроЭкоИнфо*. 2021;4(46):17. DOI: 10.51419/20214410
- Ma Y., Li C., Ryan P.R., Shabala S., You J., Liu J. et al. A new allele for aluminium tolerance gene in barley (*Hordeum vulgare* L.). *BMC Genomics*. 2016;17:186. DOI: 10.1186/s12864-016-2551-3
- Merezhko A.F. The system of genetic studying of source material for plant breeding: guidelines (Sistema geneticheskogo izucheniya iskhodnogo materiala dlya selektsii rasteniy: metodicheskiye ukazaniya). Leningrad: VIR; 1984. [in Russian] [Мережко А.Ф. Система генетического изучения исходного материала для селекции растений: методические указания. Ленинград: ВИР; 1984].
- Merezhko A.F., Ezrokhin L.M., Yudin A.E. Guidelines for an effective pollination technique for cereal crops (Metodicheskiye ukazaniya po effektivnomu metodu opyleniya zernovykh kultur). Leningrad: VIR; 1973. [in Russian] [Мережко А.Ф., Эзрохин Л.М., Юдин А.Е. Методические указания по эффективному методу опыления зерновых культур. Ленинград: ВИР; 1973].
- Minella E., Sorrells M.E. Inheritance and chromosome location of *Alp*, a gene controlling aluminum tolerance in 'Dayton' barley. *Plant Breeding*. 1997;116(5):465-469. DOI: 10.1111/j.1439-0523.1997.tb01032.x
- Raman H., Moroni J., Sato K., Read B., Scott B. Identification of AFLP and microsatellite markers linked with an aluminium tolerance gene in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Theoretical and Applied Genetics*. 2002;105(2-3):458-464. DOI: 10.1007/s00122-002-0934-0
- Reid D.A. Aluminium and manganese toxicities in the cereal grains. In: M.J. Wright (ed.). *Proceedings of a Workshop on Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*; NAL, Beltsville, Maryland; November 22–23, 1976. Washington DC: AID; 1977. p.55-64.
- Reid D.A. Genetic potential for solving problems of soil mineral stress: aluminum and manganese toxicities in cereal grains. In: M.J. Wright (ed.). *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Ithaca: Cornell University Press; 1976. p.55-64.

- Rigin B.V., Yakovleva O.V. Genetic analysis of toxic aluminum ion tolerance in barley. *Russian Journal of Genetics*. 2006;42(3):301-305. DOI: 10.1134/S1022795406030100
- Slootmaker L.A.J., Arzadun J.F. Selection of young barley plants for tolerance to high soil acidity in relation to some agronomic characteristics of mature plants. *Euphytica*. 1969;18:157-162. DOI: 10.1007/BF00035686
- Stølen O., Andersen S. Inheritance of tolerance to low soil pH in barley. *Hereditas*. 1978;88(1):101-105. DOI: 10.1111/j.1601-5223.1978.tb01608.x
- Sychev V.G., Akanova N.I. Modern problems and prospects of chemical amelioration of acid soils. *Plodородие = Fertility*. 2019;1(106):3-7. [in Russian] (Сычев В.Г., Аканова Н.И. Современные проблемы и перспективы химической мелиорации кислых почв. *Плодородие*. 2019;1(106):3-7). DOI: 10.25680/S19948603.2019.106.01
- Tang Y., Sorrells M.E., Kochian L.V., Garvin D.F. Identification of RLFP markers linked to the barley aluminum tolerance gene *Alp*. *Crop Science*. 2000;40(3):778-782. DOI: 10.2135/cropsci2000.403778x
- Yakovleva O.V. Aluminum resistance of malting barley. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):126-131. [in Russian] (Яковлева О.В. Аллюмоустойчивость пивоваренного ячменя. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):126-131). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-126-131
- Yakovleva O.V. Genetic diversity of wild barley (*Hordeum spontaneum* K. Koch) in the context of resistance to toxic aluminum ions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(1):215-224. [in Russian] (Яковлева О.В. Генетическое разнообразие дикого ячменя (*Hordeum spontaneum* K. Koch) по устойчивости к токсичным ионам алюминия. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(1):215-224). DOI: 10.30901/2227-8834-2023-1-215-224
- Yakovleva O.V. Hereditary variability of acid resistance of cultivated barley plants. *Research Bulletin of the N.I. Vavilov Institute of Plant Industry*. 1998;236:49-51. [in Russian] (Яковлева О.В. Наследственная изменчивость кислотоустойчивости растений культурного ячменя. *Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института растениеводства им. Н.И. Вавилова*. 1998;236:49-51).
- Yakovleva O.V. Phytotoxicity of aluminum ions. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2018;179(3):315-331. [in Russian] (Яковлева О.В. Фитотоксичность ионов алюминия. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2018;179(3):315-331). DOI: 10.30901/2227-8834-2018-3-315-331
- Zaitsev G.N. Mathematical statistics in experimental botany (*Matematicheskaya statistika v eksperimentalnoy botanike*). Moscow: Nauka; 1984. [in Russian] (Зайцев Г.Н. Математическая статистика в экспериментальной ботанике. Москва: Наука; 1984).

Информация об авторе

Яковлева Ольга Владимировна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, 190000 Россия, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44, oly.yakovleva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6537-0868>

Information about the author

Olga V. Yakovleva, Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, 42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia, oly.yakovleva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6537-0868>

Статья поступила в редакцию 19.12.2024; одобрена после рецензирования 10.02.2025; принята к публикации 24.02.2025. The article was submitted on 19.12.2024; approved after reviewing on 10.02.2025; accepted for publication on 24.02.2025.