https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-7-2
УДК: 633:16;631:524.01
Тип статьи: оригинальная
Type of article: original

# ГЕНОТИПИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ ЯЧМЕНЯ НА ПОВЫШЕННОЕ СОДЕРЖАНИЕ КАДМИЯ В ПОЧВЕ

(✉)**Товстик Е.В.[1, 2], Шуплецова О.Н.[1], Щенникова И.Н.[1]**
[1]*Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого*
Киров, Россия
[2]*Вятский государственный университет*
Киров, Россия
(✉)e-mail: tovstik2006@inbox.ru

Представлены результаты сравнительной оценки на контрольном и провокационном почвенном фоне по кадмию сортов ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.), полученных различными методами. Всего изучено 10 сортов: Родник Прикамья, Новичок, Дина, Зазерский 85, Triumph, Tallon (гибридизация и отбор); Форвард, Бионик, Витрум (клеточная селекция); Памяти Дудина (мутагенез). Исследования проводили в 2021 г. в климатических условиях Кировской области. Семена растений каждого сорта высевали в вегетационные емкости, наполненные дерново-подзолистой почвой. Провокационный почвенный фон по кадмию (6,4 ± 0,5 мг/кг) создавали путем внесения в почву ацетата кадмия. Среднее значение урожайности сортов ячменя в контроле (почвенный фон без кадмия) составило 279 г/м$^2$, на провокационном фоне – 216 г/м$^2$. В условиях кадмиевого стресса урожайность гибридов снижалась по сравнению с контролем на 12,2%, регенерантов – на 29,6, мутанта – на 42,4%. Среди исследованных сортов стабильно высокую урожайность как на контрольном (334 г/м$^2$), так и на кадмиевом фоне (263 г/м$^2$) показал сорт Бионик, имеющий регенерантное происхождение. Продуктивная кустистость гибридных сортов ячменя на контрольном фоне варьировала от 2,8 до 4,1 шт., у регенерантов – от 3,4 до 4,8, сорта-мутанта – 4,3 шт. В условиях кадмиевого стресса продуктивная кустистость снижалась в среднем на 2,7 шт. – у гибридов, на 3,4 – у регенерантов, на 2,6 шт. – у мутанта. Бионик независимо от почвенного фона по сравнению с другими сортами имел наибольшую продуктивную кустистость. Значимых различий в содержании полифенолов в зерне исследуемых сортов на контрольном и провокационном почвенном фоне по кадмию не выявлено. В условиях кадмиевого стресса отмечено снижение содержания флавоноидов в зерне, а также накопление кадмия (0,29–0,92 мг/кг). Сорта гибридного происхождения в большей степени проявляли способность к накоплению кадмия в зерне.

**Ключевые слова:** ячмень, кадмий, урожайность, продуктивная кустистость, полифенолы, флавоноиды

# GENOTYPICAL RESPONSE OF BARLEY TO INCREASED CADMIUM CONTENT IN SOIL

(✉)**Tovstik E.V.[1, 2], Shupletsova O.N.[1], Shchennikova I.N.[1]**
[1]*Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky*
Kirov, Russia
[2]*Vyatka State University*
Kirov, Russia
(✉)e-mail: tovstik2006@inbox.ru

The results of a comparative evaluation of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties obtained by different methods on control and provocative soil background for cadmium are presented. A total of 10 varieties were studied: Rodnik Prikamya, Novichok, Dina, Zazersky 85, Triumph, Tallon (hybridization and selection); Forward, Bionic, Vitrum (cell selection); In memory of Dudin (mutagenesis). The studies were carried out in 2021 under the climatic conditions of the Kirov region. Seeds of the plants of each variety were sown in vegetation containers filled with soddy-podzolic soil. Cadmium provocative background (6.4 ± 0.5 mg/kg) was created by adding cadmium acetate to the soil. The average yield of barley varieties in the control (soil background without cadmium) was 279 g/m$^2$; against a provocative background – 216 g/m$^2$. Under the conditions of cadmium stress, the yield of hybrids decreased compared to the control by 12.2%, regenerants – by 29.6%, mutant – by 42.4%.

Among the studied varieties, the Bionic variety, which has a regenerated origin, showed a consistently high yield both on the control (334 g/m$^2$) and cadmium background (263 g/m$^2$). Productive bushiness of hybrid barley varieties against the control background varied from 2.8 to 4.1; in regenerants – from 3.4 to 4.8; mutant varieties – 4.3 pieces. Under the conditions of cadmium stress, productive bushiness decreased by an average of 2.7 – in hybrids; for 3.4 – for regenerants, for 2.6 pieces – a mutant. Bionic, regardless of the soil background, compared with other varieties, had the highest productive bushiness. Significant differences in the content of polyphenols in the grain of the studied varieties on the control and provocation soil background for cadmium were not revealed. Under the conditions of cadmium stress, a decrease in the content of flavonoids in grain was noted, as well as the accumulation of cadmium (0.29–0.92 mg/kg). Varieties of hybrid origin showed the ability to accumulate cadmium in grain to a greater extent.

**Key words**: barley, cadmium, yield, productive bushiness, polyphenols, flavonoids

**Для цитирования:** *Товстик Е.В., Шуплецова О.Н., Щенникова И.Н.* Генотипическая реакция ячменя на повышенное содержание кадмия в почве // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т. 53. № 7. С. 13–21. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-7-2

**For citation:** Tovstik E.V., Shupletsova O.N., Shchennikova I.N. Genotypical response of barley to increased cadmium content in soil. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2023, vol. 53, no. 7, pp. 13–21. https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-7-2

**Конфликт интересов**
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
**Conflict of interest**
The authors declare no conflict of interest.

**Благодарность**
Работа выполнена в рамках темы № FNWE-2022-0008 «Разработка новых биотехнологических методов создания перспективных генотипов сельскохозяйственных культур со стабильной продуктивностью, толерантных к эдафическим стрессорам, получение нового исходного материала регенерантного происхождения для селекции адаптивных сортов растений».
**Acknowledgements**
The work was carried out within the framework of the project № FNWE-2022-0008 “Development of new biotechnological methods of creating promising genotypes of agricultural crops with stable productivity, tolerant to edaphic stressors, obtaining new source material of regenerant origin for breeding of adaptive plant varieties”.

## ВВЕДЕНИЕ

Среди загрязняющих веществ первого класса опасности кадмий вызывает наибольшую озабоченность в связи со способностью к биоаккумуляции в пищевой цепи [1]. В настоящее время разрабатывают различные способы предупреждения попадания кадмия в пищевое сырье и продукты питания. Один из них – контроль содержания кадмия в пахотных почвах, а также минеральных удобрениях, производимых на основе фосфатной породы. Согласно нормативной документации, концентрация кадмия в зависимости от вида удобрения и содержания в нем фосфатов (не более 5% и равной или не менее 5%) не должна превышать 3 и 20 мг/кг соответственно[1]. Однако даже в случае невысокого содержания кадмия в удобрениях с течением времени происходит накопление данного элемента в почве при внесении удобрений [2, 3]. Ориентировочно допустимая концентрация кадмия в почвах сельскохозяйственных угодий установлена только для его валовых форм. В зависимости от гранулометрического состава и кислотности почвы она варьирует от 0,5 до 2,0 мг/кг[2].

Опасность повышенного содержания кадмия в почве для растений заключается в провоцировании у них стресса [4]. В зависимости от его природы и выраженности, а также от вида растения стресс может приводить к ряду патологических изменений в растительных тканях различного уровня [5]. Один из них – выработка полифенолов, защитную роль которых связывают с антиоксидантной активностью [6]. Следует отметить, что фенольные соединения в последнее время все чаще рас-

[1]ГОСТ Р 58658–2019. Продукция и продовольствие с улучшенными характеристиками. Удобрения минеральные. Общие технические условия. М., 2020. 19 с.

[2]СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. https://docs.cntd.ru/document (дата обращения: 01.03.2023).

сматривают в качестве биохимических маркеров стрессового состояния злаковых [7].

Интерес к полифенолам не ограничивается только устойчивостью растений к стрессу. Он также сосредоточен в области неэкстрагируемых полифенолов, играющих важную роль в пищевой ценности продукции, а также их ингибирующей активности в отношении α-глюкозидазы [8, 9].

Важной задачей для сохранения урожайности и качества растениеводческой продукции в условиях загрязнения почв кадмием является выведение различными методами стресс-толерантных сортов [10].

Перспективность сортов при этом можно оценивать с помощью различного набора показателей (морфометрические, физиолого-биохимические), а также по продуктивности растений [11]. Наряду с этим в случае селекции сортов с повышенной устойчивостью к кадмию важно определять уровень аккумуляции токсичного металла в структурных частях растений, особенно в зерне.

Цель работы – изучить генотипические реакции ячменя на почвенном фоне с избытком ионов кадмия.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2021 г. на базе Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (Кировская область) в условиях вегетационного опыта. Объектом исследования служили 10 сортов ярового ячменя различного происхождения и созданные с применением селекционных и биотехнологических методов (см. табл. 1).

Опыт проводили в условиях, приближенных к полевым. Семена каждого сорта в количестве 35 шт. высевали в вегетационные емкости длиной 150 см, шириной 130 см и высотой 30 см, наполненные дерново-подзолистой почвой (содержание органического вещества – 2,5 ± 0,3%, азот в пересчете на нитратную форму – 1,7 ± 0,5 мг/кг, подвижный фосфор – 50 ± 10 мг/кг).

Площадь питания растений составляла 4 × 15 см. Для создания провокационного почвенного фона по кадмию за месяц до посева семян в почву вносили раствор ацетата кадмия. По данным атомно-абсорбционной спектроскопии, содержание подвижных соединений кадмия в почве в результате модельного загрязнения составило 6,4 ± 0,5 мг/ кг. Контрольным фоном служила почва без внесения кадмия. В период проведения опыта осуществляли полив растений по мере высыхания почвы. Критерием оценки устойчивости служили продуктивные (урожайность в пересчете на 1 м$^2$, кустистость) и биохимические (содержание полифенолов, флавоноидов, кадмия в зерне) признаки растений.

Определение содержания полифенолов и флавоноидов в зерне осуществляли спек-

**Табл. 1.** Сорта ячменя, полученные различными методами
**Table 1.** Description of barley varieties obtained by various methods

| Сорт | Происхождение | Критерий отбора |
|---|---|---|
| | *Гибридизация и отбор* | |
| Родник Прикамья | Россия | Стандарт |
| Новичок | » | Алюмо- и кислотоустойчивость |
| Дина | » | Скороспелость, кислотоустойчивость |
| Зазерский 85 | Беларусь | |
| Triumph | Дания | Высокая урожайность |
| Tallon | Австралия | |
| | *Клеточная селекция* | |
| Форвард | Россия | Алюмо- и кислотоустойчивость |
| Бионик | | Устойчивость к засухе, алюмо- и кислотоустойчивость |
| Витрум | | Алюмо- и кислотоустойчивость |
| | *Мутагенез* | |
| Памяти Дудина | Россия | Высокая урожайность |

трофотометрическим методом на спектрофотометре ПЭ 5300 ВИ (Россия) (стеклянные кюветы с толщиной оптического слоя 1 см)[3]. В качестве внутреннего стандарта при определении содержания полифенольных соединений использовали галловую кислоту, при определении флавоноидов – рутин. Суммарное содержание полифенолов определяли в щелочных извлечениях из зерна, свободных полифенолов и флавоноидов – в водно-спиртовых. Содержание связанных полифенолов в зерне устанавливали по разности значений суммарного содержания полифенолов в щелочных извлечениях и содержанием свободных полифенолов в этанольных экстрактах.

Определение содержания кадмия в зерне проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе «Спектр 5-4» (Россия). Подготовку проб зерна для анализа осуществляли методом сухого озоления[4].

Математическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью статистического анализа[5]. Для интерпретации полученных данных использовали пакет прикладных программ Microsoft Excel.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка устойчивости сортов прежде всего базируется на анализе видимых изменений морфологии растений в условиях стресса. В связи с этим проводили сопоставление продуктивных признаков растений на контрольном и провокационном по кадмию почвенных фонах. В зависимости от варианта опыта урожайность сортов варьировала в широких пределах (см. рис. 1, *а*).

Урожайность большинства сортов ячменя составила в среднем 279 г/м$^2$ в контроле и 216 г/м$^2$ на провокационном фоне. В условиях стресса значения данного показателя по сравнению с контролем снижались: у сортов гибридного происхождения на 12,2%, регенерантов – 29,6, мутанта – 42,4% (см. рис. 1, *а*). Однако у сортов Новичок и Tallon урожайность

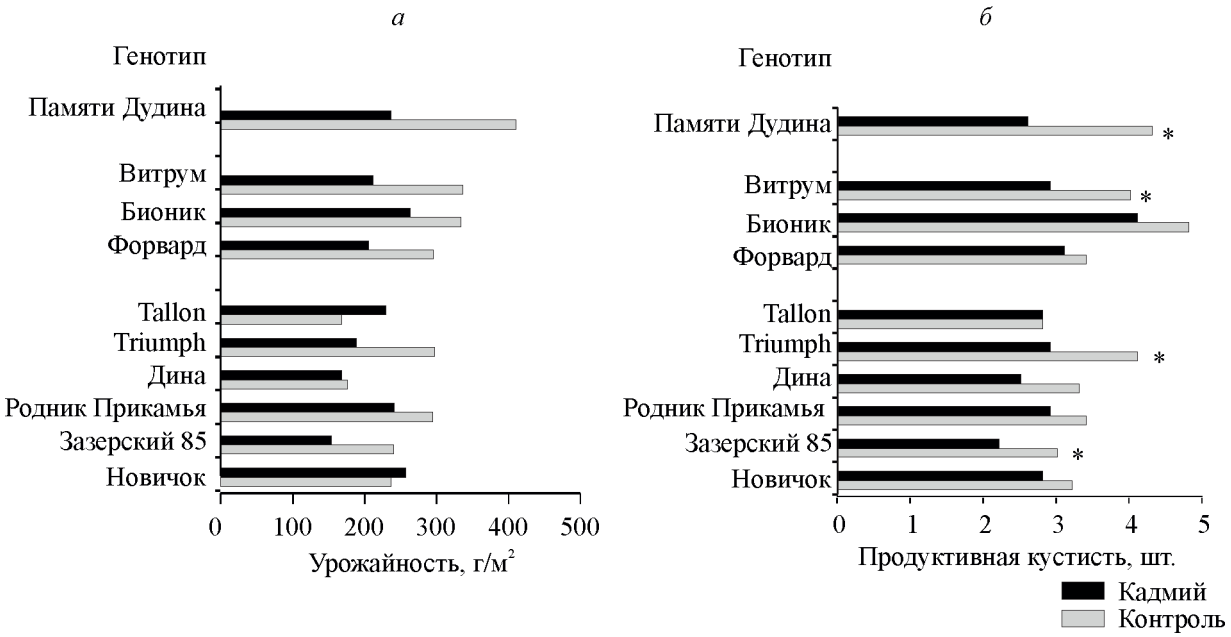


***Рис. 1.*** Средняя урожайность (*а*) и продуктивная кустистость (*б*) генотипов на контрольном и кадмиевом фоне
***Fig. 1.*** Average yield (*а*) and productive bushiness (*б*) of the genotypes on the control and cadmium background

[3]*Шуплецова О.Н., Товстик Е.В.* Содержание полифенолов в зерне ячменя сортов регенерантного происхождения, выращенных на различных почвенных фонах // Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. (Киров, 6 апреля 2022 г.). Киров, 2022. С. 120–125.

[4]ГОСТ 26929–94. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. URL: https://docs.cntd.ru/document (дата обращения: 01.03.2023).

[5]ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. https://docs.cntd.ru/document (дата обращения: 01.03.2023).

в присутствии кадмия в почве повышалась по сравнению с контрольными условиями.

Одним из сортов, имеющих стабильно высокую урожайность как на контрольном, так и кадмиевом фоне, был сорт регенерантного происхождения Бионик (334 и 263 г/м$^2$). Для этого же сорта отмечали наибольшую продуктивную кустистость (см. рис. 1, *б*).

Согласно данным литературы, интенсивность побегообразования у злаков – один из механизмов их адаптации к избытку токсичных ионов металлов в почве. Это позволяет растениям не только успешно произрастать в условиях ионной токсичности, но и сохранять высокий репродуктивный потенциал. Несмотря на то, что продуктивная кустистость является наследственной особенностью сорта, она также зависит от условий произрастания растений[6]. По результатам анализа, продуктивная кустистость гибридных сортов ячменя на контрольном фоне варьировала от 2,8 до 4,1 шт., у регенерантов – от 3,4 до 4,8, у сорта мутанта составляла 4,3 шт. На кадмиевом фоне продуктивная кустистость сортов относительно контрольного фона предсказуемо снижалась (в среднем: 2,7 шт. – гибриды, 3,4 – регенеранты, 2 шт. – мутант). Исключением был сорт Tallon, для которого достоверных различий в уровне продуктивной кустистости на контрольном и провокационном фоне не выявлено (см. рис. 1, *б*). Наибольшую чувствительность к кадмию проявляли сорта Зазерский 85 и Памяти Дудина: снижение показателя относительно контроля 26,7 и 39,5% соответственно.

Помимо продуктивных признаков растений оценивали биохимические показатели зерна. Практический интерес представляла оценка содержания полифенолов в зерне исследуемых сортов. Известно, что одна из важнейших функций полифенольных соединений – их участие в защите растений от окислительного стресса [6]. Профиль полифенольных соединений в надземной массе растений может зависеть не только от условий произрастания, но и от сортовых особенностей [12]. Регистрируемые значения содержания полифенолов в зерне на контрольном и провокационном по кадмию фоне варьировали в узком диапазоне (от 7,78 до 9,56 мг/г), что свидетельствовало об отсутствии значимых различий между сортами (см. табл. 2).

Выявлены сорта как с высоким уровнем содержания полифенолов в зерне (Родник Прикамья, Витрум, Дина, Памяти Дудина), так и с низким (Зазерский 85). Независимо от сорта содержание свободных полифенолов в зерне было более низким, чем связанных. Наличие почвенного стрессора снижало содержание свободных полифенолов в зерне ячменя всех исследуемых генотипов. Если в контрольных условиях их доля в общем количестве достигала 21,5–50,5% в зависимости от генотипа, то в стрессовых условиях колебалась в диапазоне 20,9–26,3%.

В последние годы неэкстрагируемую фракцию полифенолов все чаще рассматривают в качестве ключевой из-за устойчивости при переработке и способности достигать толстого кишечника, обеспечивая положительное влияние на здоровье человека [13, 14]. По результатам проведенных исследований, содержание связанных полифенолов в зерне различных сортов на контрольном фоне варьировало в широком диапазоне (49,5–78,5%), в том числе за счет более низких регистрируемых значений для Форварда и Бионика. На провокационном по кадмию фоне у сортов отмечали повышение содержания связанных полифенолов относительно контроля. Однако сортовые различия прослеживались в меньшей степени, чем на контрольном фоне (73,7–79,1% от общего содержания полифенолов) (см. табл. 2). Увеличение содержания связанных и уменьшение свободных полифенолов в зерне под действием кадмия свидетельствуют о наличии стресса у всех исследованных генотипов, независимо от их происхождения.

Практический интерес представляла оценка содержания в зерне флавоноидов как маркеров стрессоустойчивости, входящих в состав свободной фракции полифенолов [15]. Предполагалось, что сорта с неодинаковой

[6]*Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков): учебное пособие; Институт биологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. 55 с.

**Табл. 2.** Содержание полифенолов и флавоноидов в зерне генотипов ячменя, полученных различными методами

**Table 2.** The content of polyphenols and flavonoids in the grain of barley genotypes obtained by various methods

| Генотип | Контрольный фон | | | Кадмиевый фон | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Полифенолы | | Флавоноиды, мг/г | Полифенолы | | Флавоноиды, мг/г |
| | свободные / связанные, мг/кг / % | Суммарное, мг/кг | | свободные / связанные, мг/кг / % | Суммарное, мг/кг | |
| *Гибридизация и отбор* | | | | | | |
| Новичок | 2,32 ± 0,07 / 42,6 | 8,48 ± 0,34 | 0,046 | 2,09 ± 0,11* / 77,5 | 9,29 ± 0,04 | 0,039 |
| Зазерский 85 | 2,01 ± 0,03 / 73,8 | 7,78 ± 0,01 | 0,057 | 2,01 ± 0,15 / 76,1 | 8,42 ± 0,56 | 0,039 |
| Родник Прикамья | 2,64 ± 0,07 / 70,8 | 9,05 ± 0,11 | 0,076 | 2,09 ± 0,10* / 77,1 | 9,12 ± 0,39 | 0,050 |
| Дина | 2,00 ± 0,28 / 78,5 | 9,31 ± 0,22 | 0,115 | 1,98 ± 0,01 / 78,9 | 9,37 ± 0,14 | 0,043 |
| Triumph | 2,41 ± 0,01 / 72,6 | 8,81 ± 0,74 | 0,049 | 2,01 ± 0,11* / 77,4 | 8,89 ± 0,39 | 0,019 |
| Tallon | 2,27 ± 0,11 / 72,5 | 8,26 ± 0,75 | 0,013 | 1,90 ± 0,01 / 79,1 | 9,08 ± 0,16 | 0,027 |
| *Клеточная инженерия* | | | | | | |
| Форвард | 4,42 ± 0,61 / 50,1 | 8,85 ± 0,13 | 0,063 | 2,09 ± 0,10* / 76,9 | 9,07 ± 0,32 | 0,047 |
| Бионик | 4,49 ± 0,45 / 72,5 | 8,89 ± 0,39 | 0,047 | 2,39 ± 0,16* / 73,7 | 9,09 ± 0,33 | 0,021 |
| Витрум | 2,74 ± 0,03 / 69,8 | 9,06 ± 0,14 | 0,059 | 2,39 ± 0,08* / 73,8 | 9,10 ± 0,07 | 0,014 |
| *Мутагенез* | | | | | | |
| Памяти Дудина | 2,49 ± 0,02 / 73,4 | 9,36 ± 0,12 | 0,056 | 2,09 ± 0,01* / 78,2 | 9,59 ± 0,12 | 0,033 |

*$p \leq 0,05$.

стрессоустойчивостью могут иметь различный уровень антиоксидантной защиты и соответственно испытывать различное воздействие окислительного стресса, вызванного условиями выращивания.

В зависимости от условий выращивания растений и сортовых особенностей уровень флавоноидов колебался в широких пределах (см. табл. 2). На контрольном фоне у сортов гибридного происхождения их содержание варьировало – 0,013–0,115 мг/г, регенерантов – 0,047–0,063, сорта мутанта – 0,056 мг/г. Наибольшее количество флавоноидов отмечено у сорта Дина, наименьшее – Tallon. Снижение содержания флавоноидов выявлено на провокационном фоне у всех исследованных сортов (за исключением Tallon), но в большей степени у сортов гибридного происхождения: Triumph (61,2% относительно контроля) и Дина (62,6%), а также среди регенерантов у сорта Витрум (76,3%).

Следующим этапом исследования стала оценка накопления кадмия в зерне исследуемых генотипов на кадмиевом фоне (см. рис. 2).

Значение данного показателя согласно атомно-абсорбционной спектроскопии составило 0,29–0,92 мг/кг, превысив ПДК в зерне (0,1 мг/кг) у всех исследуемых сортов. На провокационном фоне регенерантные генотипы, индуцированные в результате клеточной селекции в стрессовых условиях, аккумули-

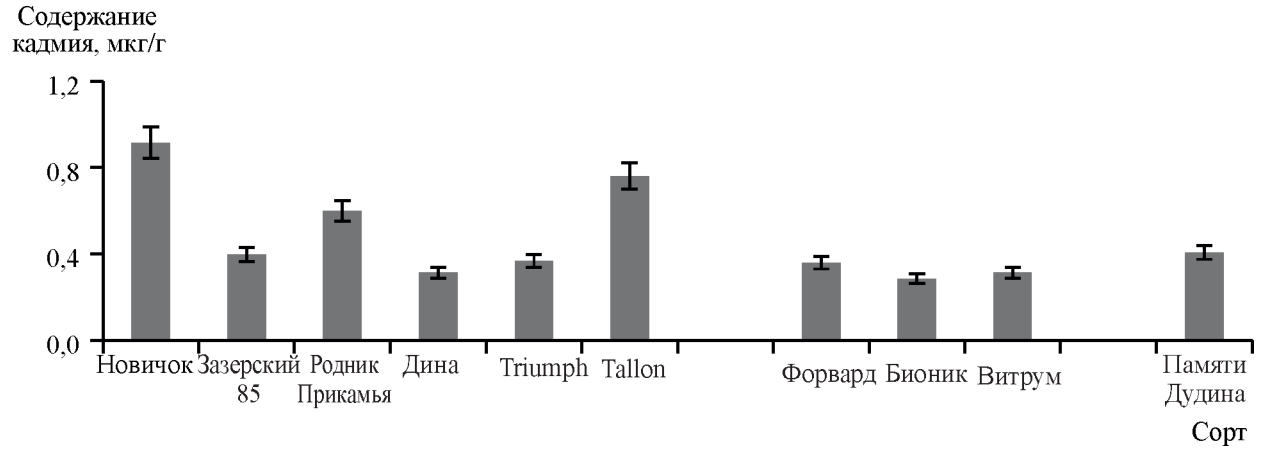


***Рис. 2.*** Содержание кадмия в зерне ячменя
***Fig. 2.*** Cadmium content in barley grain

ровали кадмий в регенеративных органах в 1,75 раза в меньшем количестве (в среднем 0,32 мг/кг сухой массы) по сравнению с сортами (в среднем 0,56 мг/кг сухой массы), не проходившие отбор *in vitro*.

## ВЫВОДЫ

1. Изучена реакция сортов ячменя на избыточное количество кадмия в почве. Отмечены значительные генотипические различия по чувствительности к стрессу сортов, полученных разными методами. Наличие почвенного стрессора снижало в зерне всех генотипов содержание свободных полифенолов, что затрудняло их биодоступность. Сорта-регенеранты Форвард, Бионик, Витрум, созданные в результате отбора *in vitro*, имели в стрессовых условиях более высокий уровень свободных полифенолов (в среднем 2,29 мг/г), но при относительно низкой доле флавоноидов (в среднем 0,027 мг/г) по сравнению с гибридами Родник Прикамья, Новичок, Дина, Зазерский 85, Triumph, Tallon (2,01 и 0,036 мг/г соответственно) и мутантом Памяти Дудина (2,09 и 0,036 мг/г соответственно). Полученные результаты свидетельствуют о наиболее слабом проявлении окислительного стресса регененантов на провокационном фоне среди исследуемых генотипов.

2. Показан различный характер аккумуляции ионов кадмия в зерне, существенно зависящий от генетической специфики растений. Регенерантные сорта, индуцированные в результате отбора каллусных клеток на селективных средах, в меньшей степени накапливали кадмий (в среднем 0,31 мкг/г) по сравнению с мутантом (в среднем 0,41 мкг/г) и сортами гибридного происхождения (в среднем 0,56 мкг/г).

3. Активность барьерных функций, снижающих негативное влияние кадмия на растения, наряду с проявлением окислительного стресса влияло на формирование урожайности (продуктивной кустистости). Выделены генотипы с высокой урожайностью на почвенном фоне с кадмием: Бионик (263 г/м$^2$), Новичок (260), Памяти Дудина (250 г/м$^2$).

4. Применение наряду с традиционной селекцией биотехнологических методов позволяет расширять генотипическое разнообразие адаптивных форм / стресс-толерантных сортов, что повышает возможности сохранения урожайности в условиях загрязнения почв кадмием.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wang X., Cui W., Wang M., Liang Y., Liang Y., Zhu G., Jin T., Chen X.* The association between life-time dietary cadmium intake from rice and chronic kidney // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. Vol. 211. P. 111933. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.111933.
2. *Bracher C., Frossard E., Bigalke M., Imseng M., Mayer J., Wiggenhauser M.* Tracing the fate of phosphorus fertilizer derived cadmium in soil-fertilizer-wheat systems using enriched stable isotope labeling // Environmental Pollution. 2021. Vol. 287. P. 117314. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117314.

3. *McDowell R.W., Graya C.W.* Do soil cadmium concentrations decline after phosphate fertiliser application is stopped: A comparison of long-term pasture trials in New Zealand? // Science of The Total Environment. 2022. Vol. 804. P. 150047. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150047.
4. *Широких И.Г., Шуплецова О.Н., Товстик Е.В., Огородникова С.Ю., Назарова Я.И., Березин Г.И.* Комплексная оценка растений ячменя, полученных путем клеточной селекции на устойчивость к кадмию // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. № 4 (65). С. 19–29. DOI: 10.30766/2072-9081.2018.65.4.19-29.
5. *Kruglova N.N., Seldimirova O.A., Zinatullina A.E. In vitro* Callus as a Model System for the Study of Plant Stress-Resistance to Abiotic Factors (on the Example of Cereals) // Biology Bulletin Reviews. 2018. Vol. 8. P. 518–526. DOI: 10.1134/S2079086418060063.
6. *Yang X.-J., Dang B., Fan M.-T.* Free and Bound Phenolic Compound Content and Antioxidant Activity of Different Cultivated Blue Highland Barley Varieties from the Qinghai-Tibet Plateau // Molecules. 2018. Vol. 23 (4). P. 879. DOI: 10.3390/molecules23040879.
7. *Irfan M., Dar M.I., Raghib F., Ahmad B., Raina A., Khan F.A., Naushin F.* Role and regulation of plants phenolics in abiotic stress tolerance: an overview // In book: Plant Signaling Molecules. 2019. Ch. 9. P. 157–168. DOI: 10.1016/B978-0-12-816451-8.00009-5.
8. *Zhang by Y., Bai B., Yan Y., Liang J., Guan X.* Bound Polyphenols from Red Quinoa Prevailed over Free Polyphenols in Reducing Postprandial Blood Glucose Rises by Inhibiting α-Glucosidase Activity and Starch Digestion // Nutrients. 2022. Vol. 14. Is. 4. P. 728. DOI: 10.3390/nu14040728.
9. *Gong K., Chen L., Li X., Linlin S., Liu K.* Effects of germination combined with extrusion on the nutritional composition, functional properties and polyphenol profile and related *in vitro* hypoglycemic effect of whole grain corn // Journal of Cereal Science. 2018. Vol. 83. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.jcs.2018.07.002.
10. *Melotto M., Brandl M.T., Jacob C., Jay-Russell M.T., Micallef S.A., Warburton M.L., Van Deynze A.* Breeding Crops for Enhanced Food Safety // Frontiers in Plant Science. 2020. Vol. 11. P. 428. DOI: 10.3389/fpls.2020.00428.
11. *Гераськин С.А., Дикарев А.В., Лыченкова М.А.* Дифференциация сортов ячменя по устойчивости к кадмию сохраняется на протяжении всего жизненного цикла растений // Агрохимия. 2021. № 2. С. 78–85. DOI: 10.31857/S0002188121020071.
12. *Kowalczewski P.Ł., Radzikowska D., Ivanišová E., Szwengiel A., Kačániová M., Sawinska Z.* Influence of Abiotic Stress Factors on the Antioxidant Properties and Polyphenols Profile Composition of Green Barley (*Hordeum vulgare* L.) // International Journal of Molecular Sciences. 2020. Vol. 21 (2). P. 397. DOI: 10.3390/ijms21020397.
13. *Полонский В.И., Лоскутов И.Г., Сумина А.В.* Селекция на содержание антиоксидантов в зерне как перспективное направление для получения продуктов здорового питания // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2018. Т. 22. № 3. С. 343–352. DOI: 10.18699/VJ18.370.
14. *Zhang L., García-Pérez P., Martinelli E., Giuberti G., Trevisan M., Lucini L.* Different fractions from wheat flour provide distinctive phenolic profiles and different bioaccessibility of polyphenols following in vitro digestion // Food Chemistry. 2023. Vol. 404. P. 134540. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134540.
15. *Shen N., Wang T., Gan Q., Liu S., Wang L., Jin B.* Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity // Food Chemistry. 2022. Vol. 383. P. 132531. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132531.

## REFERENCES

1. Wang X., Cui W., Wang M., Liang Y., Liang Y., Zhu G., Jin T., Chen X. The association between life-time dietary cadmium intake from rice and chronic kidney. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, vol. 211, p. 111933. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.111933.
2. Bracher C., Frossard E., Bigalke M., Imseng M., Mayer J., Wiggenhauser M. Tracing the fate of phosphorus fertilizer derived cadmium in soil-fertilizer-wheat systems using enriched stable isotope labeling. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 287, p. 117314. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117314.
3. McDowell R.W., Graya C.W. Do soil cadmium concentrations decline after phosphate fertiliser application is stopped: A comparison of long-term pasture trials in New Zealand? *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 804, p. 150047. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150047.
4. Shirokikh I.G., Shupletsova O.N., Tovstik E.V., Ogorodnikova S.Yu., Nazarova Y.I., Berezin G.I. Comprehensive assessment of barley

plants regenerated from resistant to cadmium callus lines. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*, 2018, no. 4 (65), pp. 19–29. (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2018.65.4.19-29.
5. Kruglova N.N., Seldimirova O.A., Zinatullina A.E. *In vitro* Callus as a Model System for the Study of Plant Stress-Resistance to Abiotic Factors (on the Example of Cereals). *Biology Bulletin Reviews*, 2018, vol. 8, pp. 518–526. DOI: 10.1134/S2079086418060063.
6. Yang X.-J., Dang B., Fan M.-T. Free and Bound Phenolic Compound Content and Antioxidant Activity of Different Cultivated Blue Highland Barley Varieties from the Qinghai-Tibet Plateau. *Molecules*, 2018, vol. 23 (4), p. 879. DOI: 10.3390/molecules23040879.
7. Irfan M., Dar M.I., Raghib F., Ahmad B., Raina A., Khan F.A., Naushin F. Role and regulation of plants phenolics in abiotic stress tolerance: an overview. *In book: Plant Signaling Molecules*. 2019, ch. 9, pp. 157–168. DOI: 10.1016/B978-0-12-816451-8.00009-5.
8. Zhang by Y., Bai B., Yan Y., Liang J., Guan X. Bound Polyphenols from Red Quinoa Prevailed over Free Polyphenols in Reducing Postprandial Blood Glucose Rises by Inhibiting α-Glucosidase Activity and Starch Digestion. *Nutrients*, 2022, vol. 14, is. 4, p. 728. DOI: 10.3390/nu14040728.
9. Gong K., Chen L., Li X., Linlin S., Liu K. Effects of germination combined with extrusion on the nutritional composition, functional properties and polyphenol profile and related *in vitro* hypoglycemic effect of whole grain corn. *Journal of Cereal Science*, 2018, vol. 83. pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jcs.2018.07.002.
10. Melotto M., Brandl M.T., Jacob C., Jay-Russell M.T., Micallef S.A., Warburton M.L., Van Deynze A. Breeding Crops for Enhanced Food Safety. *Frontiers in Plant Science*, 2020, vol. 11, p. 428. DOI: 10.3389/fpls.2020.00428.
11. Geras'kin S.A., Dikarev A.V., Lychenkova M.A. Differentiation of barley varieties in resistance to cadmium remains the same during the whole life cycle of plants. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 2021, no. 2, pp. 78–85. (In Russian). DOI: 10.31857/S0002188121020071.
12. Kowalczewski P.Ł., Radzikowska D., Ivanišová E., Szwengiel A., Kačániová M., Sawinska Z. Influence of Abiotic Stress Factors on the Antioxidant Properties and Polyphenols Profile Composition of Green Barley (*Hordeum vulgare* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, vol. 21 (2), p. 397. DOI: 10.3390/ijms21020397.
13. Polonskiy V.I., Loskutov I.G., Sumina A.V. Breeding for antioxidant content in grain as a promising trend in obtaining healthy food products. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektsii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*, 2018, vol. 22 (3), pp. 343–352. (In Russian). DOI: 10.18699/VJ18.370.
14. Zhang L., García-Pérez P., Martinelli E., Giuberti G., Trevisan M., Lucini L. Different fractions from wheat flour provide distinctive phenolic profiles and different bioaccessibility of polyphenols following in vitro digestion. *Food Chemistry,* 2023, vol. 404, p. 134540. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134540.
15. Shen N., Wang T., Gan Q., Liu S., Wang L., Jin B. Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 2022, vol. 383, p. 132531. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.132531.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

(✉)**Товстик Е.В.,** кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник; **адрес для переписки**: Россия, 610050, г. Киров, ул. Ленина, 166А; e-mail: tovstik2006@inbox.ru

**Шуплецова О.Н.,** доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник

**Щенникова И.Н.,** доктор сельскохозяйственных наук, член-корреспондент РАН, доцент

## AUTHOR INFORMATION

(✉)**Evgenia V. Tovstik**, Candidate of Science in Biology, Associate Professor, Senior Researcher; **address:** 166 A, Lenina St., Kirov, 610050, Russia; e-mail: tovstik2006@inbox.ru

**Olga N. Shupletsova**, Doctor of Science in Biology, Associate Professor, Lead Researcher

**Irina N. Shchennikova**, Doctor of Science in Agriculture, Corresponding Member RAS, Associate Professor

*Дата поступления статьи / Received by the editors 06.04.2023*
*Дата принятия к публикации / Accepted for publication 13.06.2023*
*Дата публикации / Published 21.08.2023*