

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Научная статья
УДК 633.16:58.084.5
DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-128-137



Адаптивный потенциал ячменя при токсичном воздействии кадмия в различных условиях оценки

Е. В. Товстик^{1,2}, О. Н. Шуплецова¹, Л. В. Панихина¹, Ю. А. Злобина¹

¹ Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, Киров, Россия

² Вятский государственный университет, Киров, Россия

Автор, ответственный за переписку: Евгения Владимировна Товстик, tovstik2006@inbox.ru

Актуальность. Определение уровня совместимости реакции генотипов ячменя (*Hordeum vulgare* L.) на токсичность кадмия в различных тест-системах актуально для повышения объективности оценки их стрессоустойчивости. Цель работы заключалась в сравнительном анализе устойчивости ячменя к кадмию в лабораторных и вегетационных опытах.

Материалы и методы. Объектами исследования служили 9 сортов ячменя различного эколого-географического происхождения. Оценка устойчивости сортов к кадмию проводили в рулонной культуре. Полученные данные сопоставляли с результатами вегетационного опыта.

Результаты и заключение. Токсический эффект 20 и 50 мг/дм³ Cd²⁺ проявлялся в снижении длины корней и ростков проростков ячменя, а также асинхронности их роста. Сорта ячменя с более высокой урожайностью в условиях кадмиевого стресса, характеризовались большим содержанием свободных фенольных соединений (ФС) в корнях и ростках, а также общим содержанием ФС в ростках. Наличие взаимосвязи между уровнем накопления ФС в корнях и индексом длины корня, а также между накоплением ФС в проростках и урожайностью указывает на потенциальную ценность ФС в отборе устойчивых к кадмию сортов ячменя.

Ключевые слова: стресс, устойчивость, корень, росток, фенольные соединения, урожайность

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого по теме № FNWE-2025-0008 «Разработка новых биотехнологических методов создания перспективных генотипов сельскохозяйственных культур со стабильной продуктивностью, толерантных к абиотическим стрессорам, получение нового исходного материала регенерантного происхождения для селекции адаптивных сортов растений».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Товстик Е.В., Шуплецова О.Н., Панихина Л.В., Злобина Ю.А. Адаптивный потенциал ячменя при токсичном воздействии кадмия в различных условиях оценки. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2025;186(2):128-137. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-128-137

DOMESTIC PLANT BREEDING AT THE PRESENT STAGE

Original article

DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-128-137

Adaptive potential of barley under toxic impact of cadmium in various conditions of assessment

Evgeniya V. Tovstik^{1,2}, Olga N. Shupletsova¹, Lyubov V. Panikhina¹, Yulia A. Zlobina¹¹ Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia² Vyatka State University, Kirov, Russia**Corresponding author:** Evgeniya V. Tovstik, tovstik2006@inbox.ru

Background. Determining the level of compatibility in barley (*Hordeum vulgare* L.) genotypes for cadmium toxicity in various test systems is important for increasing the objectivity of assessing their stress resistance. The purpose of this work was a comparative analysis of barley resistance to cadmium in laboratory and pot experiments.

Materials and methods. Nine barley cultivars of various ecogeographic origin served as the material for the study. Their cadmium resistance was assessed in roll culture. The data obtained were compared with the results of the pot experiment.

Results and conclusion. The toxic effect of 20 and 50 mg/dm³ Cd²⁺ was manifested in a decrease in the length of the roots and shoots of barley plantlets, and in the asynchrony of their growth. Barley cultivars with higher yields under cadmium stress conditions demonstrated high content of free phenolic compounds (PC) in roots and shoots, as well as the total content of PC in shoots. The relationships between the level of PC accumulation in roots and the root length index, and between PC accumulation in shoots and yield, indicated the potential value of PC in the selection of cadmium-resistant barley cultivars.

Keywords: stress, resistance, root, shoot, phenolic compounds, yield

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher of the Russian Federation within the state task assigned to the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Theme No. FNWE-2025-0008 "Development of new biotechnological methods for producing promising crop genotypes with stable productivity and tolerance to edaphic stressors, and obtaining new source material of regenerative origin for breeding adaptable plant cultivars".

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Tovstik E.V., Shupletsova O.N., Panikhina L.V., Zlobina Yu.A. Adaptive potential of barley under toxic impact of cadmium in various conditions of assessment. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2025;186(2):128-137. DOI: 10.30901/2227-8834-2025-2-128-137

Введение

Существенные различия в толерантности растений к токсичности тяжелых металлов обусловлены механизмами различной природы. Мониторинг этих изменений может дать представление о стратегиях поддержания метаболического гомеостаза и выявить защитные соединения, которые повышают толерантность растений к стрессу (Goncharuk, Zagoskina, 2023).

Кадмий – один из наиболее токсичных и высокомолекулярных тяжелых металлов. Легко поглощаясь корневой системой, он может накапливаться в различных органах растений, передаваться по трофическим цепям (Shupletsova, Tovstik, 2021).

По данным Россельхознадзора, земли сельскохозяйственного назначения испытывают загрязнение кадмием на уровне 0,60–0,84 мг/кг. В число населенных пунктов, почвы которых загрязнены кадмием, входят города Свирск (Иркутская обл.), Кировоград, Ревда, Реж (Свердловская обл.), Владикавказ (Республика Северная Осетия-Алания), Новосибирск (Новосибирская обл.) (State report..., 2024).

Несмотря на широкий спектр работ по оценке влияния кадмия на растения, многие из них проведены в краткосрочных опытах до окончания естественного биологического цикла растений (Vassilev et al., 2004; Geras'kin et al., 2021). Эффекты длительного воздействия кадмия на растения до сих пор изучены недостаточно. Отмечается, что токсический эффект кадмия снижается по мере увеличения времени его воздействия на растения, что связано с адаптацией, происходящей в онтогенезе (Wu et al., 2003). На примере яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) показано, что возделывание культуры на черноземах с содержанием подвижного кадмия более чем 0,4 мг/кг ведет к загрязнению зерновой продукции выше санитарно-гигиенических нормативов, но не влияет на продуктивность (Lukin et al., 2004).

Ямень отличается высокой чувствительностью к почвенным стрессорам, которая объясняется слабым развитием корневой системы и низкой способностью к хелатообразованию (Kosareva, 2012). В условиях загрязнения почвы кадмием устойчивые к токсиканту сорта ярового ячменя превосходят по продуктивности чувствительные. Однако не у всех генотипов наблюдаются изменения морфобиологических признаков. Подобная дифференциальная толерантность к кадмиевому стрессу в основном объясняется его транслокацией и антиоксидантной защитой растений (Rahman et al., 2016). При возделывании ярового ячменя на фоне с умеренно опасным содержанием кадмия в почве (2 мг/кг) отмечено повышение урожайности на 26% от контроля и снижение урожайности на 5% на фоне с опасным содержанием кадмия в почве (9 мг/кг) (Ilinskiy, Vinogradov, 2016). Наиболее отчетливо градиция сортов по толерантности прослеживается при концентрации кадмия в почве 50 мг/кг, в то время как концентрация 25 мг/кг недостаточна для дифференциации сортов по продуктивности (Dikarev et al., 2024).

Все больше исследований указывают на то, что при содержании кадмия в почве ниже порога токсичности проявляется его горметический эффект (Gorbunova et al., 2020). У молодых растений он объясняется активацией антиоксидантной системы для защиты клеток от окислительных повреждений, вызванных низкоуровневым стрессом (Wang et al., 2023), в том числе за счет гетероауксинов и фенольных соединений (ФС) (Małkowski et al.,

2020). При усилении кадмиевой нагрузки включаются дополнительные/иные адаптационные механизмы. При этом увеличение биосинтеза ФС в условиях стресса часто связывают с более высокой толерантностью растений (Jańczak-Pieniążek et al., 2022).

Лабораторные эксперименты обеспечивают проведение скрининга генотипов в течение короткого периода с применением различных стрессовых нагрузок, в том числе более высоких, чем встречаются в природе, что актуально для определения пределов толерантности растений. Сопоставление результатов лабораторных и вегетационных испытаний позволяет изучить генотипическую реакцию ячменя на различных стадиях онтогенеза.

Цель работы заключалась в сравнительном анализе устойчивости ячменя к кадмию в лабораторных и вегетационных опытах.

Материалы и методы

Исследования проводили в 2024 г. на базе Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (ФАНЦ Северо-Востока) (г. Киров, Кировская область, Россия). Объектами исследования служили 9 сортов ячменя различного эколого-географического происхождения (табл. 1).

Изучаемые сорта по признаку «происхождение» относились к трем группам: 1) сорта гибридного происхождения селекции ФАНЦ Северо-Востока; 2) сорта регенерантного происхождения селекции ФАНЦ Северо-Востока; 3) сорта гибридного происхождения зарубежной селекции (Беларусь, Дания, Австрия). Сорта-регенеранты индуцированы от исходных генотипов в каллусной культуре *in vitro* на среде с $40 \text{ мг/дм}^3 \text{ Al}^{3+}$ при $\text{pH} = 3,8$ ('Форвард', 'Витрум') и на среде аналогичного состава с добавлением полиэтиленгликоля в качестве осмотика ('Бионик'); зарегистрированы в Государственном реестре охраняемых селекционных достижений: 'Бионик' (№ 9295 от 25.10.2017) и 'Форвард' (№ 9152 от 11.07.2017). Сорт 'Витрум' – заявка № 86497/7754415 от 31.05.2022.

Оценивали устойчивость сортов ячменя к кадмию в лабораторных условиях на проростках. Полученные данные сопоставляли с результатами по урожайности этих же генотипов в вегетационном опыте. Схема опыта, как в лабораторных, так и вегетационных условиях, включала контрольный (без воздействия кадмия) и токсичный фон (с кадмием). Модельными токсикантами служили соответственно сульфат ($3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) и ацетат кадмия(II) ($\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в виде кристаллогидратов. Использование для почвенной культуры ацетата кадмия было обусловлено его хорошей растворимостью в воде, меньшей способностью закрепляться в почве, а также не подкислять ее. Заменяя ацетат кадмия на сульфат в рулонной культуре, минимизировали влияние элемента питания. Применение в экспериментах более высоких, чем встречаются в природе, концентраций кадмия (ориентировочно-допустимая концентрация по валовым формам – 0,5–2,0 мг/кг почвы) было обусловлено поиском пределов толерантности ячменя.

Лабораторный скрининг

Проращивали зерна в рулонной культуре в контрольных (дистиллированная вода без внесения соли кадмия; $\text{pH} = 6,0$) и стрессовых условиях (водные растворы солей с 20 и 50 $\text{мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$; $\text{pH} = 5,2$) по ГОСТ 12038-84 (ГОСТ 12038-84..., 1986). Повторность опыта четырехкратная, по 25 зерен в одной повторности каждого варианта. По-

Таблица 1. Характеристика исследуемых сортов ячменя

Table 1. Description of the studied barley cultivars

Сорт	Номер каталога	Страна происхождения	Критерий отбора
‘Витрум’	я-416**	Россия (Кировская область)	Алюмо- и кислотоустойчивость
‘Новичок’	к-30806*		
‘Родник Прикамья’	к-26965*		
‘Форвард’	я-389**		Засуха-, алюмо- и кислотоустойчивость
‘Бионик’	я-207**		
‘Дина’	к-29216*		Скороспелость, кислотоустойчивость
‘Зазерский 85’	к-26965*	Беларусь	Высокая урожайность
‘Triumph’	к-31188*	Дания	
‘Tallon’	к-30290*	Австралия	

Примечание: * – каталог ВИР; ** – каталог ФАНЦ Северо-Востока

Note: * – VIR catalogue; ** – catalogue of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky

сле 8-дневного культивирования проростков (стадия роста GS10-GS19 по шкале Задокса) оценивали морфологические параметры: длину и сухую массу корня и ростка (надземная часть проростка), рассчитывали массовое соотношение корней/ростков. По результатам биометрических показателей корневой системы рассчитывали индекс длины корня (ИДК, %) (соотношение средней длины корней в стрессовых и контрольных условиях) (Lisitsyn, 2018).

После учета ростовых и массовых характеристик из растительной ткани экстрагировали ФС: свободные – 70-процентным этиловым спиртом при температуре 5°C в течение 24 часов, суммарные, в том числе связанные с клеточной стенкой – щелочью (2 н. NaOH) при 80°C в течение 2 часов (Sun et al., 2001). Содержание ФС в экстрактах определяли на спектрофотометре (ПЭ5300ВИ, ООО «Экросхим», Россия), стандартом служила галловая кислота (GOST R 55488-2013..., 2014).

Почвенная культура в вегетационном опыте

Вегетационный опыт проводили в условиях, приближенных к полевым. Почвы были представлены дерново-подзолистым суглинком, которым заполняли емкости размером 1,5 × 1,3 × 0,3 м. Посев производили ручным способом по 35 шт. на 1 емкость по схеме 4 × 15 см рядками. Почва характеризовалась средним содержанием гумуса ($C_{орг} = 2,5 \pm 0,3\%$), низким содержанием подвижного фосфора ($C(P_2O_5) = 50 \pm 10$ мг/кг), очень низким содержанием нитратного азота ($C(NO_3^-) = 1,7 \pm 0,5$ мг/кг), $pH_{KCl} = 6,5 \pm 0,1$. Токсичный почвенный фон создавали путем внесения в почву раствора ацетата кадмия в концентрации 10,86 г/дм³ в пересчете на кристаллогидрат. По данным атомно-абсорбционной спектроскопии, содержание подвижных соединений кадмия в почве при этом составило $6,4 \pm 0,5$ мг/кг. Контролем служила почва без внесения токсиканта. Фоновое содержание подвижных соединений кадмия в почве контрольного варианта составило $0,040 \pm 0,008$ мг/кг.

Растения выращивали в естественных условиях до получения семян. В период длительного отсутствия атмосферных осадков проводили полив растений водопроводной водой, поддерживая влажность почвы на уровне 60% от полной влагоемкости. Контроль влажности поч-

вы и корректировку объема полива осуществляли с использованием портативного влагомера.

Достоверность различий тестируемых параметров между контролем и опытными вариантами оценивали с помощью t-критерия Стьюдента. Для установления статистической зависимости между параметрами оценки использовали корреляционный анализ Пирсона ($p < 0,05$). Статистическая обработка данных выполнена в Excel для Microsoft Office 2007.

Результаты и обсуждение

В рулонной культуре токсический эффект кадмия в концентрациях 20 и 50 мг/дм³ проявлялся в снижении длины корней и ростков ячменя. Для большинства сортов различия по данным параметрам в контроле и опытных вариантах были статистически значимы. Отсутствие изменений как в длине корня, так и ростка в аналогичных условиях фиксировали лишь у сортов ‘Новичок’ и ‘Родник Прикамья’. Снижение длины корня и ростка относительно контроля в варианте с 20 мг/дм³ Cd²⁺ в среднем по сортам составило 19,2 и 18,8%; 50 мг/дм³ Cd²⁺ – 39,3 и 20,0% соответственно (табл. 2).

На ранней стадии развития ячменя кадмий в большей степени оказывал влияние на рост корней, чем ростков, что объясняется непосредственным контактированием корней с токсикантом (Moreira et al., 2020). Аналогичные закономерности выявлены и у других сельскохозяйственных культур, например гречихи обыкновенной (*Fagopyrum esculentum* Moench) (Horbowicz, Mitrus, 2020). Снижение длины корня под действием кадмия у растений неаккумулирующего экотипа связывают с сокращением меристематической ткани и зоны удлинения корня (Li et al., 2023).

Отчетливо прослеживались генотипические различия по влиянию кадмия на корневую систему. Так, наибольшие значения ИДК были зафиксированы (20 и 50 мг/дм³ Cd²⁺) у сортов ‘Новичок’ (106,0 и 69,8%), ‘Родник Прикамья’ (91,4 и 72,7%) и ‘Форвард’ (92,7 и 64,5%). В то же время более чувствительными к кадмию оказались сорта ‘Витрум’ (77,6 и 48,1%), ‘Дина’ (76,6 и 54,5%) и ‘Tallon’ (67,9 и 60,4%). Повышение концентрации от 20 до 50 мг/дм³ кадмия сопровождалось асинхронно-

Таблица 2. Морфологические параметры проростков ячменя в зависимости от концентрации кадмия
Table 2. Morphological parameters of barley plantlets depending on cadmium content

Сорт	Длина, см Масса корней, мг			ИДК, %		Длина, см Масса ростков, мг			Массовое соотношение корень / росток		
	0 мг/дм ³	20 мг/дм ³	50 мг/дм ³	20 мг/дм ³	50 мг/дм ³	0 мг/дм ³	20 мг/дм ³	50 мг/дм ³	0 мг/дм ³	20 мг/дм ³	50 мг/дм ³
‘Витрум’	$\frac{15,6 \pm 0,3}{233 \pm 21}$	$\frac{12,1 \pm 0,9^*}{190 \pm 16^*}$	$\frac{7,5 \pm 1,0^*}{145 \pm 19^*}$	77,6	48,1	$\frac{8,9 \pm 1,4}{203 \pm 29}$	$\frac{7,9 \pm 0,3}{198 \pm 33}$	$\frac{7,2 \pm 0,4^*}{215 \pm 13}$	114,8	96,0	67,4
‘Новичок’	$\frac{11,6 \pm 1,6}{210 \pm 26}$	$\frac{12,3 \pm 0,9}{290 \pm 20^*}$	$\frac{8,1 \pm 0,4^*}{220 \pm 16}$	106,0	69,8	$\frac{7,9 \pm 0,3}{230 \pm 62}$	$\frac{6,9 \pm 0,5}{225 \pm 59}$	$\frac{7,9 \pm 1,4}{205 \pm 34}$	91,3	128,9	107,3
‘Родник Прикамья’	$\frac{12,8 \pm 0,8}{243 \pm 19}$	$\frac{11,7 \pm 0,9}{293 \pm 19^*}$	$\frac{9,3 \pm 0,2^*}{228 \pm 26}$	91,4	72,7	$\frac{7,1 \pm 0,4}{188 \pm 29}$	$\frac{7,0 \pm 0,1}{265 \pm 26^*}$	$\frac{6,1 \pm 0,1^*}{228 \pm 26}$	129,3	110,6	100,0
‘Форвард’	$\frac{12,4 \pm 0,5}{218 \pm 32}$	$\frac{11,5 \pm 1,2}{278 \pm 29^*}$	$\frac{8,0 \pm 0,4^*}{180 \pm 12}$	92,7	64,5	$\frac{7,9 \pm 0,4}{153 \pm 15}$	$\frac{6,8 \pm 0,3^*}{213 \pm 22^*}$	$\frac{6,2 \pm 0,2^*}{200 \pm 29^*}$	142,5	130,5	90,0
‘Бионик’	$\frac{15,4 \pm 0,7}{283 \pm 32}$	$\frac{11,8 \pm 0,5^*}{238 \pm 21^*}$	$\frac{8,4 \pm 0,5^*}{225 \pm 19^*}$	76,6	54,5	$\frac{9,2 \pm 0,3}{218 \pm 19}$	$\frac{7,2 \pm 0,5^*}{245 \pm 53}$	$\frac{6,5 \pm 0,2^*}{155 \pm 25^*}$	129,8	97,1	145,2
‘Дина’	$\frac{14,0 \pm 0,5}{240 \pm 23}$	$\frac{11,7 \pm 0,5^*}{260 \pm 37}$	$\frac{8,1 \pm 0,3^*}{235 \pm 25}$	83,6	57,9	$\frac{8,3 \pm 0,4}{240 \pm 46}$	$\frac{6,8 \pm 0,4^*}{215 \pm 25}$	$\frac{6,9 \pm 0,5^*}{185 \pm 25^*}$	100,0	120,9	127,0
‘Зазерский 85’	$\frac{15,0 \pm 0,8}{248 \pm 35}$	$\frac{10,8 \pm 0,9^*}{198 \pm 13^*}$	$\frac{9,8 \pm 0,8^*}{220 \pm 16}$	72,0	65,3	$\frac{8,8 \pm 1,1}{255 \pm 19}$	$\frac{6,2 \pm 0,2^*}{170 \pm 22^*}$	$\frac{6,9 \pm 0,3^*}{215 \pm 13^*}$	97,3	116,5	102,3
‘Triumph’	$\frac{13,0 \pm 0,9}{260 \pm 38}$	$\frac{9,3 \pm 0,7^*}{253 \pm 39}$	$\frac{7,7 \pm 0,9^*}{145 \pm 17^*}$	71,5	59,2	$\frac{8,1 \pm 0,3}{200 \pm 22}$	$\frac{6,6 \pm 0,8^*}{215 \pm 21}$	$\frac{6,9 \pm 0,1^*}{190 \pm 28}$	130,0	117,7	76,3
‘Tallon»	$\frac{15,9 \pm 0,3}{230 \pm 12}$	$\frac{10,8 \pm 1,1^*}{225 \pm 34}$	$\frac{9,6 \pm 0,7^*}{215 \pm 19}$	67,9	60,4	$\frac{10,0 \pm 0,3}{285 \pm 57}$	$\frac{6,4 \pm 0,3^*}{250 \pm 35}$	$\frac{6,6 \pm 0,4^*}{240 \pm 28}$	80,7	90,0	89,6
Среднее	$\frac{14,0}{240}$	$\frac{11,3^*}{247}$	$\frac{8,5^*}{201^*}$	–	–	$\frac{8,5}{219}$	$\frac{6,9^*}{222}$	$\frac{6,8^*}{204}$	–	–	–

Примечание: * означает достоверные различия от контроля при $p \leq 0,05$; прочерк (–) указывает, что показатель не рассчитывался

Note: * marks significant differences from the control at $p \leq 0,05$; dash (–) means that the indicator not calculated

стью роста корней и ростков ячменя. Коэффициент корреляции (r) между данными морфологическими показателями в ряду исследованных сортов составил в контроле 0,86 (сильная положительная); в варианте с $20 \text{ мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$ – 0,59 (средняя положительная); при $50 \text{ мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$ – -0,35 (умеренная отрицательная).

В отличие от линейного роста проростков, кадмий в концентрации 20 мг/дм^3 способствовал увеличению массы корней у растений отдельных сортов (в 1,4 раза у 'Родника Прикамья' и 'Форварда'), однако, согласно усредненным по сортам значениям, не оказывал значимого влияния на данный параметр. Одной из причин гормонального эффекта $20 \text{ мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$ могло стать увеличение размера паренхимных клеток корня с целью повышения сопротивления радиальным потокам токсиканта с водой (Maksimović et al., 2007). При этом выявленный гормезис при токсическом воздействии кадмия может указывать на адаптацию растений к данному виду стресса. В случае высокой концентрации ($50 \text{ мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$) масса корней однозначно снижалась (в среднем на 16% относительно контроля).

По массе ростков при концентрации кадмия 20 мг/дм^3 различия с контролем для большинства сортов были недостоверны. Исключениями являлись сорта 'Родник Прикамья' (+77 мг к контролю), 'Форвард' (+60 мг к контролю) и 'Зазерский 85' (-85 мг к контролю).

Важным аспектом представленного исследования явился анализ массового соотношения корней и ростков. Низкие значения данного параметра в последнее время рассматриваются в качестве индикатора слабого накопления токсиканта в надземной массе растений (Xu et al., 2018). В данной работе к сортам с низким значением данного показателя отнесены 'Витрум', 'Родник Прикамья', 'Форвард', 'Triumph'. У остальных сортов этот же показатель в присутствии кадмия оставался неизменным или увеличивался.

Наряду с морфологическими изменениями проростков, исследовали их биохимические показатели. Для этого определяли содержание свободных ФС и их сумму в растительной ткани. Общее содержание ФС в корнях варьировало от 25 до 37 мг/г. Для большинства сортов, независимо от концентрации кадмия, значения данного показателя были стабильны. Увеличение содержания ФС при действии кадмия отмечали у сортов 'Витрум' – на 44,0 и 32,0% относительно контроля при концентрации 20 и $50 \text{ мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$ соответственно; у 'Дины' и 'Triumph' – на 21,4% и 10,7% при $50 \text{ мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$ (рис. 1, а, б).

Содержание свободных ФС в корнях, по сравнению с суммой, варьировало в более широком диапазоне (от 8,8 до 16,5 мг/г) и определялось как сортом, так и концентрацией кадмия. При более низкой концентрации кадмия (20 мг/дм^3) регистрировали как повышение содержания свободной фракции ФС в корнях (на 19,8–36,8% относительно контроля) у сортов ('Витрум', 'Новичок', 'Родник Прикамья', 'Дина'), так и отсутствие достоверных различий с контролем. Закономерности в реакции сортов на стресс более высокого уровня ($50 \text{ мг/дм}^3 \text{ Cd}^{2+}$) частично сохранялись. Так, высокая концентрация кадмия индуцировала синтез свободных ФС у сортов 'Витрум' – на 40,5%, 'Новичок' – 40,4%, 'Родник Прикамья' – 57,3%; либо, напротив, ингибировала у сортов 'Бионик' – на 15,2%, 'Triumph' – 18,8%.

По результатам проведенной работы выявили сорта ячменя, в проростках которых в присутствии кадмия повышается содержание свободных ФС. Среди них – 'Витрум', 'Дина', 'Triumph', 'Новичок', 'Родник Прикамья'. В то же время у некоторых сортов, таких как 'Triumph', данные по содержанию различных фракций ФС в структурных частях проростков, в частности корне, иногда были противоречивы, что указывает на сложность задействованных в ответной реакции на кадмиевый стресс механизмов адаптации (рис. 2, а, б).

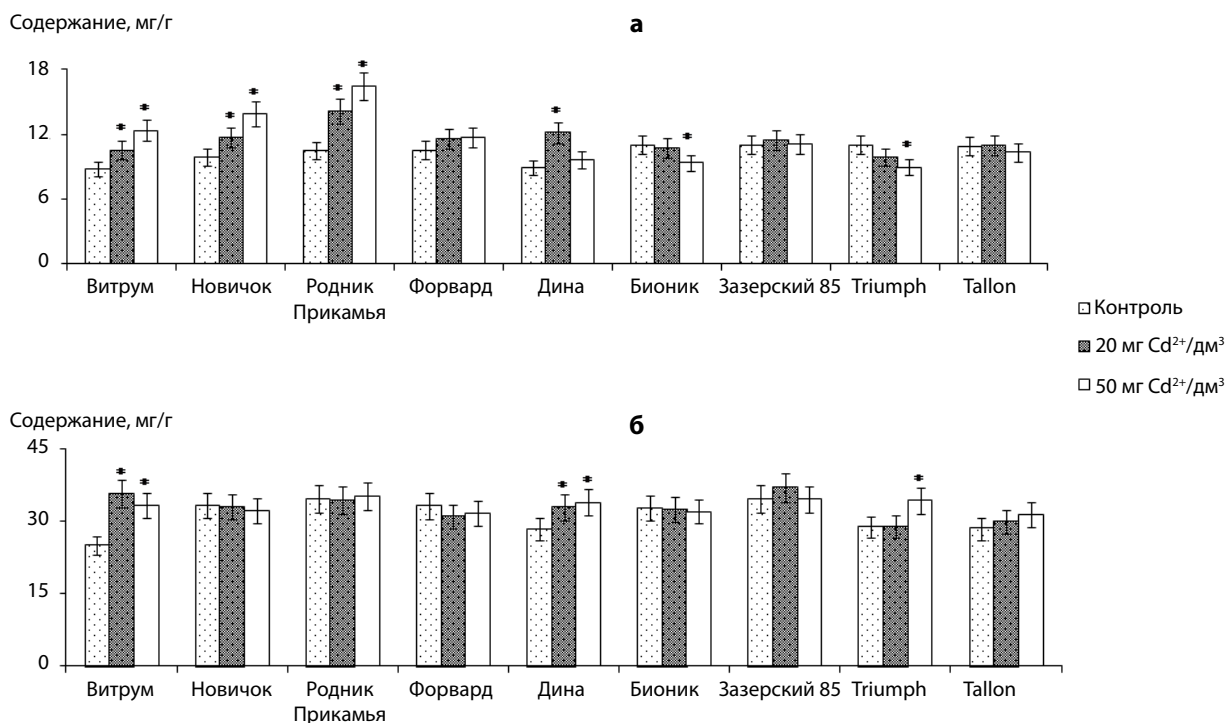
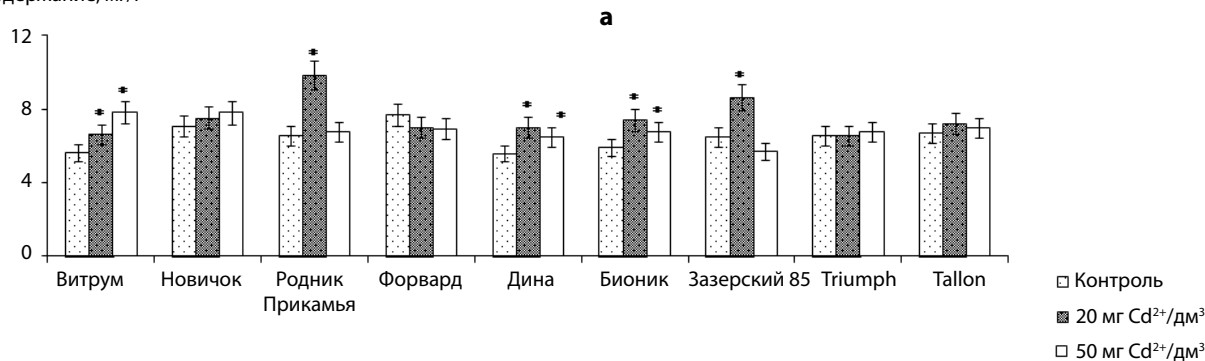


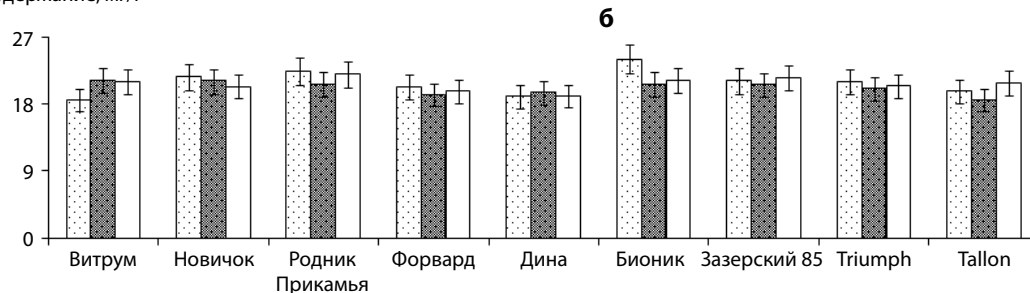
Рис. 1. Содержание свободных (а) и суммы (б) фенольных соединений в корнях проростков ячменя

Fig. 1. Content of free (a) and total (б) phenolic compounds in the roots of barley plantlets

Содержание, мг/г



Содержание, мг/г

**Рис. 2.** Содержание свободных (а) и суммы (б) фенольных соединений в ростках проростков ячменя**Fig. 2.** Content of free (a) and total (б) phenolic compounds in the shoots of barley plantlets

Полученные данные по биохимическим параметрам корней сопоставляли с ИДК. В результате была выявлена средняя положительная корреляция между уровнем накопления свободных ФС в корнях и ИДК ($r = 0,62$).

В целом по комплексу морфологических и биохимических параметров, оцененных в лабораторных условиях, выделились сорта с повышенной стрессоустойчивостью и имеющие наибольшее сходство в ответных реакциях на кадмиевый стресс. К ним относились 'Витрум', 'Новичок', 'Родник Прикамья'.

Известно, что ответные реакции растений на стресс обусловлены формированием как специфических, так и неспецифических адаптивных механизмов (Shupletsova, Shchennikova, 2016). Необходимо учитывать, что результаты лабораторной оценки растений на ранних

стадиях онтогенеза могут не совпадать с результатами исследований зрелых растений в почвенных условиях. С увеличением времени воздействия негативный эффект кадмия может становится более очевидным, при этом генотипические различия в реакции растений на токсичность кадмия могут сохранять стабильность на протяжении всего периода роста (Elguera et al., 2003).

Использование урожайности в качестве ключевого параметра стрессоустойчивости растений позволило выявить сорта, показавшие превосходство по адаптивному потенциалу к кадмию. В их число вошли 'Новичок' и 'Tallon', показавшие повышение урожайности в стрессовых условиях (на 8 и 36% соответственно). Остальные сорта на почвенном фоне с кадмием показывали снижение урожайности по сравнению с контролем от 5% ('Дина') до 37% ('Витрум') (табл. 3).

Таблица 3. Урожайность сортов в условиях вегетационных испытаний, приближенных к полевым в 2024 году**Table 3.** Yield of barley cultivars tested under pot experiment conditions close to field trials in 2024

Сорт	Урожайность, г/м ²	
	Контрольный фон	Фон с кадмием
'Витрум'	337	212
'Новичок'	237	257
'Родник Прикамья'	295	242
'Форвард'	296	206
'Дина'	176	168
'Бионик'	334	263
'Зазерский 85'	240	154
'Triumph'	297	189
'Tallon'	168	229

Данные по урожайности на контрольном и стрессовом почвенных фонах сопоставляли с результатами оценки параметров стрессоустойчивости сортов на стадии проростков в лабораторном опыте (табл. 4).

Анализ коэффициентов корреляции Пирсона позволил установить, что в контроле сорта с более высокой

ет о потенциальной ценности ФС в качестве ключевого критерия отбора устойчивых к кадмию генотипов ячменя. Для повышения объективности оценки устойчивости сортов ячменя к кадмию требуется комплексный подход, сочетающий как лабораторные, так и вегетационные испытания.

Таблица 4. Взаимосвязь параметров оценки стрессоустойчивости сортов в лабораторных условиях и урожайностью этих же генотипов в вегетационном опыте

Table 4. Relationship between the parameters of stress resistance assessment of the cultivars under laboratory conditions and the yield of the same genotypes in a pot experiment

Параметр оценки	Структурная часть проростка	Условия		
		Контроль	Стресс	
			20 мг/дм ³ Cd ²⁺	50 мг/дм ³ Cd ²⁺
Длина	Росток	-0,59	0,16	0,23
	Корень	-0,34	0,43	-0,17
Масса	Росток	-0,55	0,43	0,29
	Корень	-0,24	0,57	0,27
Общее содержание ФС	Росток	0,39	0,24	0,31
	Корень	0,06	-0,19	-0,49
Содержание свободных ФС	Росток	-0,12	0,13	0,51
	Корень	0,08	0,13	0,39

Примечание: в таблице приведены значения коэффициентов корреляции Пирсона

Note: the table shows the values of the Pearson correlation coefficients

урожайностью ('Бионик' и 'Витрум') характеризовались более низкими значениями длины и массы ростка (корреляция умеренная отрицательная). При переходе от контрольных к стрессовым условиям, напротив, отмечали положительную корреляцию данных по урожайности с параметрами лабораторной оценки проростков. Данная закономерность прослеживалась только в случае более низкой концентрации кадмия (20 мг/дм³). При высоком уровне стресса (50 мг/дм³ Cd²⁺) коэффициенты корреляции были низкими.

Параметры биохимической оценки в большей степени коррелировали с урожайностью в стрессовых условиях (50 мг/дм³ Cd²⁺). Умеренная положительная корреляция отмечалась между урожайностью и уровнем свободных ФС в корнях и ростках ($r = 0,39$ и $r = 0,51$); а также урожайностью и общим содержанием ФС в ростках ($r = 0,54$). В случае корней отмечали умеренную отрицательную корреляцию с урожайностью.

Заключение

В ходе исследования выявлена высокая вариабельность морфометрических и биохимических показателей проростков ячменя в условиях кадмиевого стресса. Наличие частичных несовпадений результатов лабораторной оценки стрессоустойчивости сортов с их градацией по показателям урожайности в почвенных условиях с тем же стрессором указывает на специфические механизмы адаптации растений к кадмию, в том числе на различных этапах онтогенеза. Наличие взаимосвязи между уровнем накопления ФС в корнях и ИДК, а также накоплением ФС в проростках и урожайностью свидетельству-

References / Литература

- Dikarev A.V., Dikarev D.V., Krylenkin D.V. Varietal differentiation of spring barley in terms of cadmium resistance based on morphometric, biochemical parameters, and productivity. *Agricultural Chemistry*. 2024;(10):68-82. [in Russian] (Дикарев А.В., Дикарев Д.В., Крыленкин Д.В. Сортовая дифференциация ярового ячменя по устойчивости к кадмию на основе морфометрических, биохимических показателей и продуктивности. *Агрохимия*. 2024;(10):68-82). DOI: 10.31857/S0002188124100083
- Elguera J.C.T., Barrientos E.Y., Wrobel Kaz., Wrobel Kat. Effect of cadmium (Cd(II)), selenium (Se(IV)) and their mixtures on phenolic compounds and antioxidant capacity in *Lepidium sativum*. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2012;35(2):431-441. DOI: 10.1007/s11738-012-1086-8
- Geras'kin S.A., Dikarev A.V., Dikarev V.G., Dikareva N.S. Analysis of intraspecific polymorphism in barley for resistance to cadmium. *Agricultural Chemistry*. 2021;(8):49-56. [in Russian] (Гераськин С.А., Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Анализ внутривидового полиморфизма ячменя по устойчивости к действию кадмия. *Агрохимия*. 2021;(8):49-56). DOI: 10.31857/S0002188121080081
- Goncharuk E.A., Zagorskina N.V. Heavy metals, their phytotoxicity, and the role of phenolic antioxidants in plant stress responses with focus on cadmium: review. *Molecules*. 2023;28(9):3921. DOI: 10.3390/molecules28093921
- Gorbulnova V.A., Zubkova V.M., Belozubova N.Yu. Productivity and photosynthetic activity of *Linum usitatissimum* L. plants during soil contamination with cadmium. *Agrarian Russia*. 2020;(3):27-32. [in Russian] (Горбунова В.А., Зуб-

- кова В.М., Белозубова Н.Ю. Продуктивность и фотосинтетическая деятельность растений льна-долгунца при загрязнении почвы кадмием. *Аграрная Россия*. 2020;(3):27-32. DOI: 10.30906/1999-5636-2020-3-27-32
- GOST 12038-84. Interstate standard. Agricultural seeds. Methods for determination of germination. Moscow: Standartinform; 1986. [in Russian] (ГОСТ 12038-84. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Москва: Стандартинформ; 1986). URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12038-84> [дата обращения: 04.12.2024].
- GOST R 55488-2013. National standard of the Russian Federation. Propolis. Method for the determination of polyphenols. Moscow: Standartinform; 2014. [in Russian] (ГОСТ Р 55488-2013. Национальный стандарт Российской Федерации. Прополис. Метод определения полифенолов. Москва: Стандартинформ; 2014). URL: <https://megainform.ru/Data2/1/4293774/4293774185.pdf> [дата обращения: 04.12.2024].
- Horbowicz M., Mitrus J. Impact of short-term exposure to lead and cadmium of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) seedlings grown in hydroponic culture. *Journal of Elementology*. 2020;25(2):633-644. DOI: 10.5601/jelem.2019.24.4.1908
- Ilnitskiy A.V., Vinogradov D.V. The question of spring barley tolerance when growing on the land polluted with heavy metals. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2016;2(30):23-28. [in Russian] (Ильинский А.В., Виноградов Д.В. К вопросу толерантности ярового ячменя при выращивании на почве, загрязненной комплексом тяжелых металлов. *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2016;2(30):23-28).
- Jańczak-Pieniążek M., Cichoński J., Michalik P., Chrzanowski G. Effect of heavy metal stress on phenolic compounds accumulation in winter wheat plants. *Molecules*. 2022;28(1):241. DOI: 10.3390/molecules28010241
- Kosareva I.A. The study of crops and wild relatives collections for signs of resistance to toxic elements of acid soils. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2012;170:34-44. [in Russian] (Косарева И.А. Изучение коллекции сельскохозяйственных культур и диких родичей по признакам устойчивости к токсическим элементам кислых почв. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2012;170:34-44).
- Li Y., Rahman S.U., Qiu Z., Shahzad S.M., Nawaz M.F., Huang J. et al. Toxic effects of cadmium on the physiological and biochemical attributes of plants, and phytoremediation strategies: A review. *Environmental Pollution*. 2023;325:121433. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121433
- Lisitsyn E.M. Indexes of root system development for barley edaphic breeding. *Legumes and Groat Crops*. 2018;2(26):66-71. [in Russian] (Лисицын Е.М. Показатели развития корневых систем в эдафической селекции ячменя. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2018;2(26):66-71). DOI: 10.24411/2309-348X-2018-10019
- Lukin S.V., Kononenko L.A., Miroshnikova Yu.V. The effect of cadmium on the development of photosynthetic apparatus and yield of spring wheat. *Agricultural Chemistry*. 2004;(3):63-68. [in Russian] (Лукин С.В., Кононенко Л.А., Мирошникова Ю.В. Влияние кадмия на развитие фотосинтетического аппарата и урожайность яровой пшеницы. *Агрохимия*. 2004;(3):63-68).
- Maksimović I., Kastori R., Krstić L., Luković J. Steady presence of cadmium and nickel affects root anatomy, accumulation and distribution of essential ions in maize seedlings. *Biologia Plantarum*. 2007;51:589-592. DOI: 10.1007/s10535-007-0129-2
- Małkowski E., Sitko K., Szopiński M., Gieroń Ż., Pogrzeba M., Kalaji H.M. et al. Hormesis in plants: The role of oxidative stress, auxins and photosynthesis in corn treated with Cd or Pb. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(6):2099. DOI: 10.3390/ijms21062099
- Moreira I.N., Martins L.L., Mourato M.P. Effect of Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn on seed germination and seedling growth of two lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.). *Plant Physiology Reports*. 2020;25(2):347-358. DOI: 10.1007/s40502-020-00509-5
- Rahman M.F., Islam M., Begum M.C., Kabir A.H., Alam M.F. Genetic variation in cadmium tolerance is related to transport and antioxidant activities in field peas (*Pisum sativum* L.). *Archives of Agronomy and Soil Science*. 2016;63(4):578-585. DOI: 10.1080/03650340.2016.1224859
- Shupletsova O.N., Shchennikova I.N. Results of using cell technologies for creation of new barley varieties resistant against aluminum toxicity and drought. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(5):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;20(5):623-628). DOI: 10.18699/VJ16.183
- Shupletsova O.N., Tovstik E.V. Accumulation of cadmium and zinc in barley regenerants on a provocative soil background with cadmium. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021;182(4):117-125. [in Russian] (Шуплецова О.Н., Товстик Е.В. Аккумуляция кадмия и цинка регенерантами ячменя на провокационном почвенном фоне с кадмием. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2021;182(4):117-125). DOI: 10.30901/2227-8834-2021-4-117-125
- State report "On the status and protection of the environment in the Russian Federation in 2023" (Gosudarstvenny doklad "O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2023 godu"). Moscow: Ministry of Natural Resources and the Environment of the Russian Federation; 2024. [in Russian] (Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». Москва: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации; 2024). URL: <https://2023.ecology-gosdoklad.ru/doklad/pochvy-i-zemelnye-resursy/harakteristika-pochv-i-zemelnyh-resursov/> [дата обращения: 16.01.2025].
- Sun R.C., Sun X.F., Zhang S.H. Quantitative determination of hydroxycinnamic acids in wheat, rice, rye, and barley straws, maize stems, oil palm frond fiber, and fast-growing poplar wood. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49(11):5122-5129. DOI: 10.1021/jf010500r
- Vassilev A., Lidon F.C., Ramalho J.C., do Céu Matos M., Bareiro M.G. Shoot cadmium accumulation and photosynthetic performance of barley plants exposed to high cadmium treatments. *Journal of Plant Nutrition*. 2004;27(5):775-795. DOI: 10.1081/PLN-120030613
- Wang B., Lin L., Yuan X., Zhu Y., Wang Y., Li D. et al. Low-level cadmium exposure induced hormesis in peppermint young plant by constantly activating antioxidant activity based on physiological and transcriptomic analyses. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1088285. DOI: 10.3389/fpls.2023.1088285

Wu F., Qian Q., Zhang G. Genotypic differences in effect of cadmium on growth parameters of barley during ontogenesis. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2003;34(13-14):2021-2034. DOI: 10.1081/CSS-120023234

Xu Z.M., Mei X.Q., Tan L., Li Q.S., Wang L.L., He B.Y. et al. Low root/shoot (R/S) biomass ratio can be an indicator of low

cadmium accumulation in the shoot of Chinese flowering cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee) cultivars. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2018;25(36):36328-36340. DOI: 10.1007/s11356-018-3566-x

Информация об авторах

Евгения Владимировна Товстик, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, доцент, Вятский государственный университет, 610000 Россия, Киров, ул. Московская, 36, tovtstik2006@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>

Ольга Наумовна Шуплецова, доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, olga.shuplecova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4679-0717>

Любовь Владимировна Панихина, аспирант, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, priemnaya@fanc-sv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2227-7716>

Юлия Александровна Злобина, младший научный сотрудник, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого, 610007 Россия, Киров, ул. Ленина, 166а, ylechkaaaa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0949-1403>

Information about the authors

Evgeniya V. Tovstik, Cand. Sci. (Biology), Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, Associate Professor, Vyatka State University, 36 Moskovskaya St., Kirov 610000, Russia, tovtstik2006@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>

Olga N. Shupletsova, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, olga.shuplecova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4679-0717>

Lyubov V. Panikhina, Postgraduate Student, Associate Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, priemnaya@fanc-sv.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2227-7716>

Yulia Al. Zlobina, Associate Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, 166a Lenina St., Kirov 610007, Russia, ylechkaaaa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0949-1403>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.02.2025; одобрена после рецензирования 05.04.2025; принята к публикации 18.04.2025. The article was submitted on 01.02.2025; approved after reviewing on 05.04.2025; accepted for publication on 18.04.2025.