

УДК 633.16:581.4:546.815:581.5

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ СОРТОВ ЯЧМЕНЯ ПО УСТОЙЧИВОСТИ К КАДМИЮ СОХРАНЯЕТСЯ НА ПРОТЯЖЕНИИ ВСЕГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РАСТЕНИЙ

© 2021 г. С. А. Гераскин^{1,*}, А. В. Дикарев¹, М. А. Лыченкова¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии
249032 Обнинск, Калужская обл., Киевское шоссе, 109 км, Россия*

**E-mail: stgeraskin@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.07.2020 г.

После доработки 18.08.2020 г.

Принята к публикации 10.11.2020 г.

В вегетационном эксперименте исследовали концентрации кадмия в растениях, биохимические, морфологические и продуктивные показатели четырех контрастных по устойчивости к кадмию сортов ярового ячменя для ответа на вопрос: будут ли отобранные на основе исследования проростков сорта демонстрировать аналогичные реакции на действие кадмия на протяжении всего жизненного цикла. Обнаружены существенные различия уровней накопления кадмия в тканях растений. Установлено, что концентрация кадмия 50 мг/кг дерново-подзолистой почвы является критической для ячменя и позволяет уверенно разделить контрастные по устойчивости к этому тяжелому металлу сорта. Различия между устойчивыми и чувствительными сортами проявлялись на организменном уровне (площадь листьев, высота растений, структура урожая). По биохимическим параметрам различий между контрастными сортами обнаружено не было.

Ключевые слова: ячмень, кадмий, площадь листьев, высота растений, структура урожая, пролин, малоновый диальдегид.

DOI: 10.31857/S0002188121020071

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке загрязнение агросферы токсикантами техногенного происхождения стало одним из факторов, сдерживающих развитие сельского хозяйства и создающих угрозу для здоровья населения. Одним из главных компонентов промышленных выбросов, представляющих опасность для живых организмов, являются тяжелые металлы (ТМ), в том числе кадмий, который поступает в природные и аграрные экосистемы в результате работы горной и топливной промышленности, эксплуатации аккумуляторов и других источников питания, производства лаков, красок и др.

Растения являются основным компонентом, определяющим продуктивность агроэкосистем, поэтому изучение их устойчивости к действию техногенных факторов имеет как теоретическую, так и практическую значимость. В качестве наиболее общих проявлений стресса, обусловленного избыточным содержанием ТМ, выделяют повреждение мембран, изменение активности ферментов, ингибирование роста растений [1]. В тканях растений усиливается образование ак-

тивных форм кислорода, что, в частности, интенсифицирует процессы перекисного окисления липидов мембран, ведет к изменению структурно-функционального состояния клеток. Загрязнение почв ТМ негативно влияет на рост и урожайность сельскохозяйственных культур, ведет к накоплению тяжелых металлов в продукции растениеводства. Накопление ТМ в съедобных частях растений является основным путем их поступления в пищевую цепь человека [2]. Особого внимания в этой связи заслуживает кадмий, поскольку относится к металлам, чьи ионы легко поступают в растения [3]. Интегральным показателем, определяющим устойчивость сельскохозяйственных растений к техногенному воздействию, является продуктивность, снижение которой свидетельствует о нарушении важнейших функций растений. В условиях стресса продуктивность растений снижается, поэтому знание механизмов их устойчивости к внешним воздействиям позволяет сохранить объемы сельскохозяйственного производства в условиях техногенеза.

Механизмы поступления и биологического действия тяжелых металлов в целом сходны для

Таблица 1. Агрохимические характеристики использованной в эксперименте почвы

Показатель	Дерново-подзолистая супесчаная
pH_{KCl}	5.22 ± 0.01
Гумус, %	1.01 ± 0.02
H_r , мг-экв/100 г почвы	1.89 ± 0.02
Сумма обменных оснований, мг-экв/100 г почвы	5.3 ± 0.01
Обменный K_2O , мг/кг почвы (по Масловой)	77.7 ± 1.3
Подвижный P_2O_5 , мг/кг почвы (по Кирсанову)	127 ± 2

всех живых существ. Принято считать [4], что в большинстве растений кадмий не вовлечен в физиологические процессы (лишь у морских диатомей обнаружена Cd-карбонильная ангидраза). В то же время он является крайне токсичным элементом, что обусловлено его способностью индуцировать оксидативный стресс, связываться с SH-группами биополимеров и способностью замещать цинк в ферментах [5]. Однако при анализе действия ТМ на сельскохозяйственные культуры необходимо учитывать не только характеристики самого растения и металла, но и почвы, на которых оно произрастает. Физико-химические свойства, гранулометрический состав, плодородие, тип почвы способны существенно модифицировать ответ растения на действие поллютанта [5].

В наших предыдущих лабораторных экспериментах [6] были установлены концентрации кадмия, вызывающие существенное подавление развития проростков ячменя, исследован внутривидовой полиморфизм 50-ти сортов ячменя разного географического происхождения и выявлены сорта, контрастные по устойчивости к кадмию, установлены аллельные варианты изоферментов, связанные с устойчивостью или чувствительностью к кадмию. В связи с этим возник вопрос: будут ли отобранные на основе исследования проростков сорта демонстрировать аналогичные реакции на действие кадмия на протяжении всего жизненного цикла растений? С целью ответа на этот вопрос в рамках вегетационного опыта были исследованы морфометрические, биохимические показатели и продуктивность 4-х выявленных в наших экспериментах на проростках контрастных по устойчивости к кадмию сортов ячменя в условиях загрязнения почвы кадмием.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент по изучению реакции контрастных сортов ярового двурядного ячменя на загрязнение почвы кадмием был заложен на дерново-подзолистой супесчаной почве. Агрохимические характеристики почвы представлены в табл. 1.

Кадмий вносили в виде нитрата $Cd(NO_3)_2$ в концентрациях 25 и 50 мг/кг почвы. При выборе концентрации руководствовались данными, полученными в проведенных ранее вегетационных опытах по изучению ответных реакций растений ячменя на действие широкого диапазона концентраций кадмия [5]. На основе анализа данных о реакции морфометрических и биохимических показателей растений ячменя была выбрана критическая доза, которая вызывает существенное угнетение рассматриваемых параметров, но еще позволяет растению нормально развиваться и завершить свой жизненный цикл.

Для исследования были выбраны контрастные по устойчивости к кадмию сорта ярового ячменя из мировой коллекции ВИР: устойчивые – Симфония (Украина) и Местный (Удмуртия), чувствительные – Са 220702 (Дания) и Malva (Латвия). Методика оценки чувствительности и процедура выбора этих сортов были описаны в работах [6, 7]. Растения выращивали в пластиковых сосудах емкостью 5 кг по общепринятой методике [8]. В контроле и варианте 50 мг Cd/кг опыт проводили в 4-кратной повторности для каждого сорта, 25 мг Cd/кг – в 3-кратной повторности, всего 44 сосуда. При закладке опыта почву тщательно перемешивали и вносили в нее питательные элементы в виде водных растворов солей NH_4NO_3 , и K_2HPO_4 из расчета $N_{200}P_{25}K_{33}$. При внесении в почву питательных веществ учитывали и корректировали количество азота, поступавшее с раствором соли кадмия. Контролем служил вариант с НРК без внесения кадмия. При выборе солей питательных элементов и их концентраций руководствовались рекомендациями [8, 9]. Перед посевом почву инкубировали в течение 14 сут при температуре 20–23°C и влажности 60% ПВ. Растения выращивали до товарной спелости в условиях постоянной влажности почвы (60% ПВ). Положение вегетационных сосудов меняли ежедневно по схеме, обеспечивающей однородные условия роста и развития растений. Растения поливали дистиллированной водой.

Минерализацию растительных проб и кислотную экстракцию из них кадмия выполняли в соответствии с указаниями [10]. Содержание кадмия определяли на ИСП-ОЭС Liberty AX (США). Отбор проб растений для биометрического и био-

Таблица 2. Содержание кадмия в растениях ячменя, мг/кг

Устойчивость	Сорт	Солома			Зерно		
		Варианты (Cd ²⁺ в почве, мг/кг)					
		0	25	50	0	25	50
Устойчивые	Симфония	0.26 ± 0.56	51.00 ± 5.52	105.52 ± 2.67	0.27 ± 0.58	3.10 ± 1.91	10.80 ± 3.43
	Местный	0.51 ± 0.79	55.35 ± 5.49	124.65 ± 6.12	0.11 ± 0.37	6.12 ± 2.65	9.91 ± 3.30
Чувствительные	Malva	0.32 ± 0.64	38.04 ± 5.50	217.80 ± 18.14	0.19 ± 0.49	38.04 ± 5.50	–
	Ca 220702	0.58 ± 0.84	56.44 ± 5.51	205.28 ± 16.33	0.12 ± 0.38	49.41 ± 5.56	–

химического анализов проводили через 30 сут после всходов. Содержание свободного пролина и малонового диальдегида (МДА) определяли в пробах листьев согласно методикам, описанным в работах [11] и [12] соответственно. До урожая оставляли по 10 растений на сосуд. В течение всего вегетационного периода вели фенологические наблюдения. При уборке урожая через 90 сут после всходов определяли структуру урожая по следующим показателям: высота растений, общее число стеблей и число продуктивных стеблей, масса колосьев, масса соломы, общее число колосьев и число колосьев с зерном, масса зерна, число зерен в колосе.

Для статистического анализа экспериментальных данных использовали программные пакеты MS Excel 2003 и Statistica 10.0. Статистическую значимость различий оценивали с помощью *U*-критерия Манна–Уитни. На графиках и диаграммах приведены среднеарифметические величины в расчете на одно растение и доверительные интервалы показателей (в % к контролю) при 95%-ном уровне значимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание кадмия в тканях растений. Дерново-подзолистые почвы отличаются низким естественным содержанием ТМ. В то же время подвижность металлов в песчаных почвах относительно суглинистых разновидностей повышена [13], что увеличивает риски проявления фитотоксических эффектов и снижения урожайности при выращивании сельскохозяйственных растений на техногенно-загрязненных почвах. В контроле содержание кадмия в зерне и соломе контрастных сортов не различалось (табл. 2). Одним из возможных механизмов, повышающих устойчивость растений к загрязнению почвы ТМ, является снижение их поступления в растение. Действительно, концентрации кадмия в соломе устойчивых сортов при загрязнении 50 мг Cd/кг почвы была в 2 раза меньше, чем у чувствительных. Это

подтверждено при сравнении групп контрастных сортов ($p \leq 0.05$), однако между крайними сортами из этих групп (Местный и Malva) значимых различий выявить не удалось. Сопоставить загрязнение кадмием зерна в этом варианте опыта не представлялось возможным, т.к. у чувствительных сортов зерно не сформировалось. Тем не менее, следует отметить, что накопление кадмия в зерне на 2 порядка превышало установленную гигиеническими требованиями безопасности продовольственного сырья и продуктов норму (0.1 мг/кг) [14].

Иные закономерности отмечены в варианте с концентрацией кадмия в почве 25 мг/кг. Содержание кадмия в соломе устойчивых и чувствительных сортов значимо не различалось. Более отчетливо эти различия проявились при анализе содержания кадмия в зерне, поскольку устойчивые сорта накапливали на порядок меньше кадмия, чем чувствительные ($p \leq 0.05$). Из полученных данных следует, что одна из причин различий сортов ячменя по устойчивости связана с особенностями накопления кадмия в тканях растений. Этот тяжелый металл накапливался в соломе в концентрациях, значительно превышающих концентрации в почве, в генеративные органы его переходило существенно меньше [3]. Видимо, барьерную роль играет проводящая система растения, ограничивающая поступление кадмия в генеративные органы.

Биохимические параметры. Вызванные ТМ фитотоксические эффекты проявлялись в первую очередь на клеточном уровне. В частности, тяжелые металлы нарушают функционирование ферментов, индуцируют образование свободнорадикальных и перекисных соединений. Результатом этого являются множественные повреждения биополимеров, нарушения ферментативных циклов метаболизма и оксидативный стресс. Одним из соединений, которые участвуют в нейтрализации стрессовых воздействий, является пролин [15].

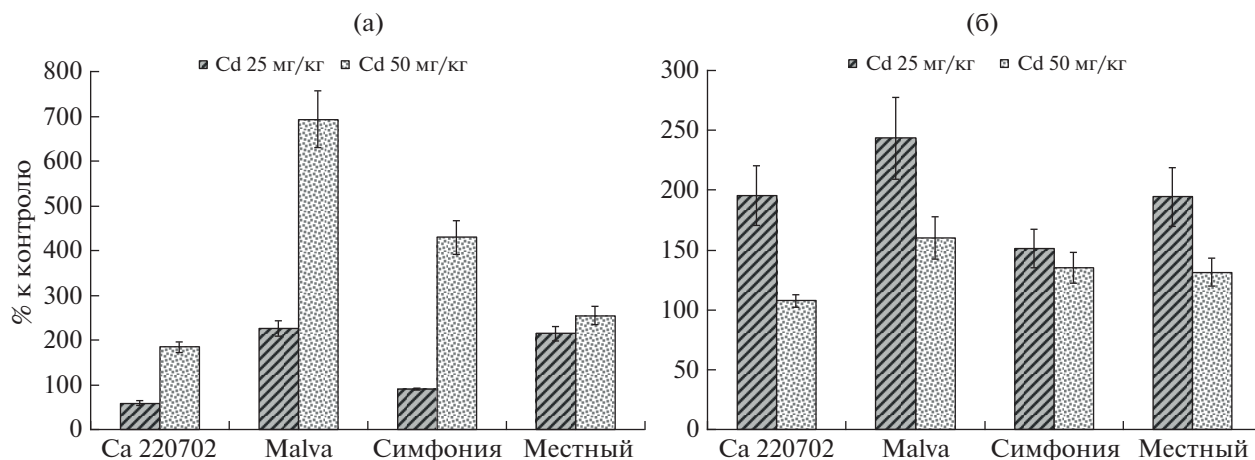


Рис. 1. Содержание пролина (а) и МДА (б) в надземной биомассе 4-х сортов ярового ячменя.

Содержание пролина в листьях ячменя ожидаемо возрастало с увеличением концентрации кадмия в почве (рис. 1а). Уже в варианте 25 мг Cd/кг у наиболее чувствительного сорта Malva концентрация пролина возрастала в 2 раза (однако у 2-х других сортов этот показатель не отличался значимо от контроля). При дозе 50 мг Cd/кг концентрации пролина в листьях увеличились в 2–7 раз, что очевидно было связано с увеличением стрессовой нагрузки. При этом различий между группами устойчивых и чувствительных сортов по этому показателю выявить не удалось, более того, была отмечена несколько парадоксальная закономерность. У одного из чувствительных сортов Ca 220702 зафиксировано самое низкое содержание пролина из всех 4 сортов, в то время как у другого (Malva) оно оказалось самым высоким. Следует заметить, что у последнего сорта и содержание МДА было максимальным (рис. 1б). Таким образом, высокие уровни содержания пролина у этого сорта видимо связаны со значительной чувствительностью к стрессу. В наших исследованиях с другими культурами (конские бобы, салат, редис), связанных с анализом воздействия свинца, уже при концентрации 50 мг Pb/кг почвы также отмечали резкое увеличение концентрации пролина, вполне объяснимое с точки зрения его роли как защитного соединения [16].

При концентрации 25 мг Cd/кг почвы у всех 4-х сортов содержание МДА существенно (в 1.5–2.5 раза) возрастало по сравнению с контролем. В целом содержание данного метаболита было несколько меньше у устойчивых к кадмию сортов, но различия не были статистически значимыми. Минимальное содержание МДА зафиксировано у сорта Симфония. При концентрации 50 мг Cd/кг у всех сортов содержание МДА снижалось,

хотя и оставалось больше контроля в 1.1–1.7 раза. Различие между чувствительными и устойчивыми сортами в этом варианте становится еще менее заметным. Снижение концентрации МДА в растениях с увеличением содержанием кадмия в среде обитания было обнаружено и в работе [17].

Таким образом, анализ биохимических параметров не позволил связать устойчивость сортов ячменя с содержанием пролина и МДА. Из этого можно сделать вывод, что реакция на воздействие кадмия определяется иными физиологическими процессами и требует дополнительного изучения.

Морфологические показатели растений. Внешний вид растений ярового ячменя через 50 сут после всходов показан на рис. 2. Фотографии даны для варианта 50 мг Cd/кг, поскольку именно в этом случае различия между сортами были наиболее очевидными. В варианте 25 мг Cd/кг визуальные различия не обнаружены, хотя у чувствительных сортов образование колосьев происходило на 1–2 нед позже. В целом на этом этапе органогенеза были заметны существенные различия во внешнем виде растений, особенно по высоте. Видно, что устойчивые сорта (рис. 2а) показали меньшее угнетение по сравнению с чувствительными (рис. 2б). Следовательно, доза 50 мг Cd/кг является достаточной для обнаружения эффектов воздействия кадмия и дифференциации сортов на устойчивые и чувствительные. Данная концентрация кадмия может считаться критической, вызывающей значимое угнетение процессов роста и развития растений ячменя, но еще не приводящей к их гибели. В то же время доза 25 мг Cd/кг не позволила с уверенностью обнаружить визуальные различия. Есть основания полагать, что использовать более высокие концентрации для изучения действия кадмия нет



Рис. 2. Внешний вид растений ячменя на 50-е сут эксперимента: (а) – устойчивые сорта, слева направо: сорт Симфония (50 мг Cd/кг), сорт Симфония (контроль), сорт Местный (50 мг Cd/кг), сорт Местный (контроль); (б) – чувствительные сорта: сорт Ca 220702 (50 мг Cd/кг), сорт Ca 220702 (контроль), сорт Malva (50 мг Cd/кг), сорт Malva (контроль).

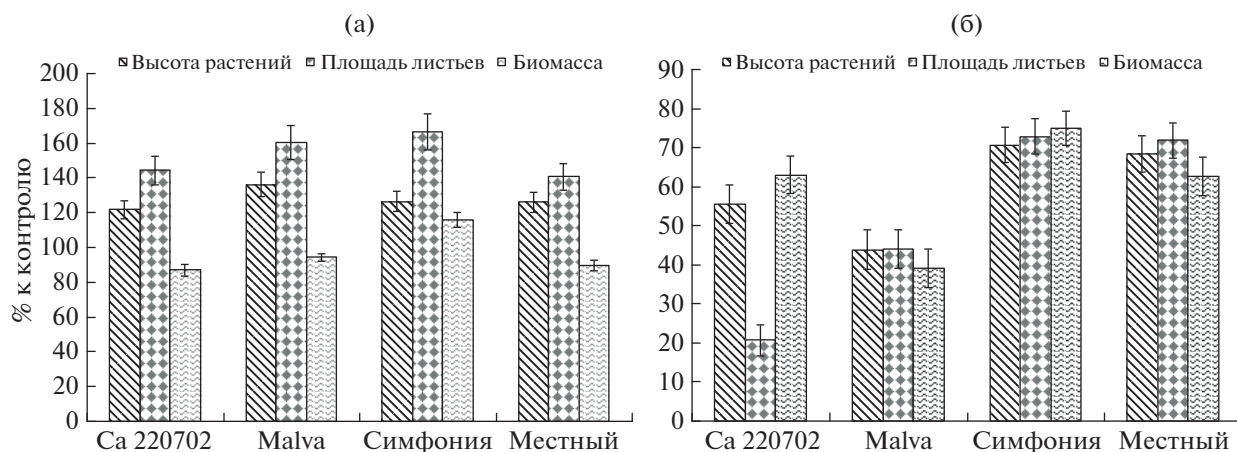


Рис. 3. Влияние загрязнения кадмием на высоту, площадь листьев и биомассу растений ячменя контрастных по устойчивости сортов: (а) – 25 мг Cd/кг, (б) – 50 мг Cd/кг.

смысла, поскольку они вызовут гибель растений. Более того, уже при дозе 50 мг Cd/кг урожай зерна удалось сформировать только устойчивым сортам, и дальнейшее увеличение содержания кадмия в почве способно обеднить потенциальный объем данных, которые можно получить в исследовании.

Морфометрические показатели. На рис. 3 приведены количественные данные, подтверждающие визуальные наблюдения о влиянии кадмия на морфометрические показатели 4-х контрастных по устойчивости сортов ячменя. При концентрации 25 мг Cd/кг не удалось выявить значимых различий между устойчивыми и чувствительными сортами всех 3-х показателей (рис. 3а). Только один из устойчивых сортов (Симфония)

статистически значимо ($p < 0.05$) превосходил оба чувствительных сорта по биомассе. Т.е. этой дозы кадмия недостаточно для формирования заметных различий в ответных реакциях контрастных сортов. Необходимо также отметить, что концентрация кадмия 25 мг/кг индуцировала заметный стимулирующий эффект по показателям “высота растений” и “площадь листьев”, которые, в зависимости от сорта, увеличились на 120–170% по сравнению с контролем.

Увеличение концентрации кадмия до 50 мг/кг вело к явному угнетению развития как чувствительных, так и устойчивых сортов. Величины всех 3-х анализированных морфометрических показателей у всех сортов были статистически значимо меньше контроля (рис. 3б). При этом внутриви-

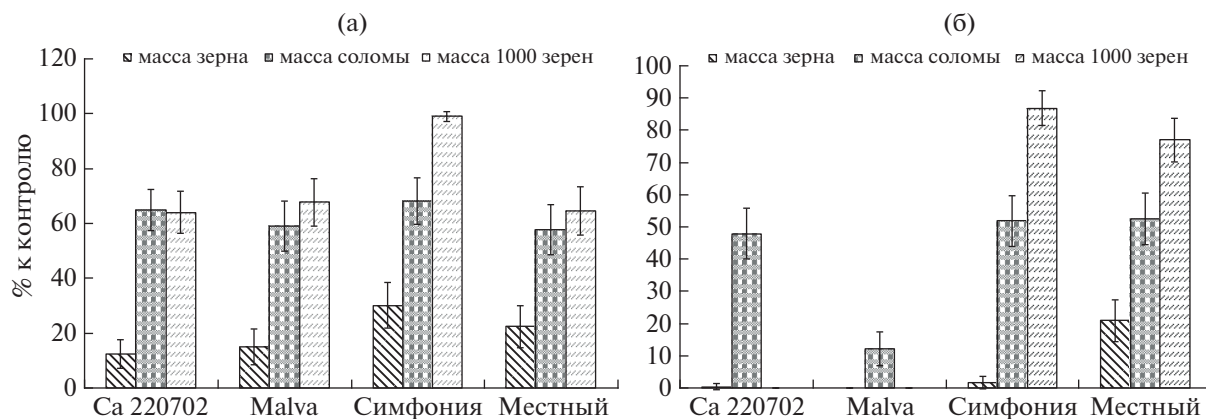


Рис. 4. Влияние кадмия на основные показатели продуктивности 4-х сортов ярового ячменя: (а) – 25 мг Cd/кг, (б) – 50 мг Cd/кг.

довые особенности ответа растений на токсический стресс становились очевидными. Все исследованные показатели устойчивых сортов статистически значимо ($p < 0.05$) превосходили чувствительные. Наиболее заметными были различия по площади листьев: величина этого показателя устойчивых сортов была почти в 2 раза больше, чем чувствительных. Сходную закономерность показала и высота растений, хотя в этом случае отличия в ответе на действие кадмия проявляются не столь отчетливо. Менее всего дифференциация между группами контрастных сортов была заметна по биомассе. В этом случае один из чувствительных сортов Ca 220702 практически не отличался от устойчивых.

Таким образом, по чувствительности к действию кадмия изученные показатели можно выстроить в следующий ряд. Сильнее всего на токсический стресс реагировала площадь листьев, и именно при ее анализе была заметна наибольшая разница между устойчивыми и чувствительными сортами. В меньшей степени изменялась высота растений, хотя и по этому критерию устойчивые сорта статистически значимо превосходили чувствительные. Биомасса изменяется не столь сильно, и в некоторых случаях она у чувствительных сортов могла сохраняться на уровне, близком к устойчивым сортам.

Из полученных данных можно сделать вывод, что различия между устойчивыми и чувствительными сортами уверенно выявлены на уровне организма, когда концентрация кадмия в среде достигла критического уровня. В то же время, пока концентрация кадмия недостаточно велика, существенных различий между устойчивыми и чувствительными сортами не наблюдали. В этих условиях растения успешно справлялись со

стрессовой нагрузкой, а неспецифические механизмы защиты, отвечающие за предотвращение проникновения во внутреннюю среду нежелательных веществ, оказались достаточно эффективными. При этом особенности ответа растений ячменя на токсическое действие кадмия, описанные ранее для проростков [6], сохранялись и у взрослых растений.

Структура урожая. Особый интерес представляют результаты, полученные в конце цикла вегетации. На их основе можно сделать вывод о том, сохраняется ли устойчивость или чувствительность каждого сорта на протяжении всей жизни растений, и как эти особенности сказываются на хозяйственно ценных качествах. Так же, как и в остальных случаях, загрязнение почвы кадмием в концентрации 25 мг/кг не привело к существенным различиям между группами контрастных по устойчивости сортов ячменя (рис. 4а). Однако следует отметить, что масса зерна у устойчивых сортов была заметно больше, чем у чувствительных, а по массе 1000 зерен сорт Симфония значимо ($p < 0.05$) превосходил остальные сорта. Более того, лишь у сорта Симфония этот показатель сохранился на уровне контроля, в то время как у всех остальных сортов снизился до 70%.

Значительно более информативным оказался вариант с внесением 50 мг Cd/кг кадмия (рис. 4б). В этом случае наблюдали явно выраженное подавление развития чувствительных сортов. Устойчивые сорта тоже показали угнетение, но не столь значительное. Например, у чувствительных сортов урожая зерна получить не удалось совсем (или он был исчезающе мал), в то время как у устойчивых сортов масса зерна составила $\approx 20\%$ от контроля. Стоит заметить, что сорт Симфония и в этом случае показал свои выдающиеся качества,

поскольку у него масса 1000 зерен составила >90% от контроля. На основе полученных данных можно утверждать, что сорт Симфония обладает высокой устойчивостью к токсическому действию кадмия, и, как это было выявлено в нашей предыдущей работе [7], к свинцу.

Результаты оценки массы соломы были не столь наглядны, тем не менее на рис. 4б видно, что чувствительные сорта формировали меньшую биомассу, чем устойчивые. Причем масса соломы сорта Са 220702 незначительно уступала устойчивым сортам. Однако масса соломы сорта Malva составила ≈10% от контроля (у сорта Симфония она была равна ≈50%). Стоит отметить, что устойчивые сорта в меньшей степени поражались болезнями (листовой ржавчиной), чем чувствительные, причем различие было наиболее отчетливым при дозе 50 мг Cd/кг. Интересно, что в варианте 25 мг Cd/кг поражение болезнями оказалось менее выраженным, чем в контроле. Вероятно, такая концентрация кадмия стимулирует защитные силы растения, которое лучше противостоит заражению, а при высокой концентрации поллютанта возбудители болезни легко поселяются на ослабленном растении.

Таким образом, концентрация кадмия 50 мг/кг являлась критической для ячменя при выращивании на дерново-подзолистой почве и позволила уверенно разделить контрастные по устойчивости сорта к этому ТМ. При этом все сорта сохраняли свойства устойчивых или чувствительных к кадмию на протяжении всего жизненного цикла. Из рассмотренных сортов сорт Симфония показал наибольшую устойчивость к токсическому действию кадмия, а сорт Malva, напротив, остро реагировал на загрязнение почвы этим тяжелым металлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что обнаруженная при оценке воздействия кадмия на проростки дифференциация сортов ячменя на устойчивые и чувствительные сохранялась на протяжении всего жизненного цикла растений. Обнаружены существенные различия уровней накопления кадмия в тканях растений ячменя. Причем как в соломе (при концентрации 50 мг Cd/кг почвы), так и особенно в зерне, устойчивые сорта накапливали в разы меньше кадмия, чем чувствительные. Эффективная работа защитных систем устойчивых сортов, ограничивающих поступление кадмия в растение, позволяла им успешно завершить жизненный цикл и дать урожай зерна даже в условиях высоких концентраций кадмия в почве. В то

же время развитие чувствительных сортов фактически останавливалось в фазе кущения, и колос большинства сортов не формировался. Из этого следует, что формирование внутривидового полиморфизма по устойчивости к действию кадмия в значительной степени связано со способностью предотвращать избыточное накопление токсических элементов в тканях растений.

Анализ содержания в тканях растений пролина и малонового диальдегида хотя и показал реакцию растений на вызванный кадмием стресс, однако не позволил связать устойчивость исследованных сортов ячменя с величиной этих параметров. Из этого следует, что устойчивость растений ячменя к кадмию не связана прямо с выработкой пролина или накоплением малонового диальдегида, а контролируется иными физиолого-биохимическими процессами. Вопрос о молекулярно-клеточных механизмах формирования ответной реакции растений на повышенные концентрации тяжелых металлов требует дополнительного изучения.

По чувствительности к действию кадмия морфометрические показатели растений ячменя можно выстроить в следующий ряд: площадь листьев > высота растений > биомасса. Особенно отчетливо различия между контрастными сортами проявились при анализе показателей продуктивности. При концентрации 50 мг Cd/кг урожай зерна растений чувствительных сортов получить не удалось, в то время как устойчивые сорта хотя и были угнетены, но продуктивность сохранили. Значительно уменьшалась у чувствительных сортов и масса соломы по сравнению как с контролем, так и с устойчивыми сортами.

В целом проведенное исследование показало существенные различия сортов ячменя как по накоплению кадмия в соломе и, особенно, в зерне, так и по реакции повышенных концентраций кадмия на продуктивность растений. Полученные результаты могут быть полезными при планировании сельскохозяйственного производства на техногенно-загрязненных почвах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серегин И.В., Иванов В.Б.* Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48. № 4. С. 606–630.
2. *McLaughlin M.J., Parker D.R., Clarke J.M.* Metals and micronutrients – food safety issues // Field Crops Res. 1999. V. 60. P. 143–163.
3. *Wagner G.J.* Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health // Adv. Agron. 1993. V. 51. P. 173–212.

4. *Clemens S.* Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants // *Biochimie*. 2006. V. 88. P. 1707–1719.
5. Санжарова Н.И., Цыгвинцев П.Н. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. 398 с.
6. *Dikarev A.V., Dikarev V.G., Dikareva N.S.* The assessment of cadmium nitrate effect on morphological and cytogenetical indexes of spring barley seedlings // *Brazil. J. Botany*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00679-4>
7. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С., Гераськин С.А. Внутривидовой полиморфизм ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) по устойчивости к действию свинца // *Сел.-хоз. биол.* 2014. № 5. С. 78–87.
8. Журбицкий З.И. Теория и практика вегетационного метода. М.: Наука, 1968. 260 с.
9. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / Под ред. Артюшина А.М. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
11. *Bates L.S., Waldern R.P., Teare I.D.* Rapid determination of free proline for water-stress studies // *Plant and Soil*. 1973. V. 39. № 1. P. 205–207.
12. *Heath R.L., Packer L.* Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // *Arch. Biochem. Biophys.* 1968. V. 125. № 1. P. 189–198.
13. Иванов А.И., Суханов П.А., Иванова Ж.А., Яковлева Т.И. Агроэкологическое значение окультуривания песчаных дерново-подзолистых почв при загрязнении Pb и Cd // *Агрохимия*. 2019. № 4. С. 70–78.
14. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов: санитарно-эпидемиологические правила и нормы. М.: Минздрав РФ, 2002. 164 с.
15. Кузнецов В.В., Шевякова Н.И. Пролин при стрессе: биологическая роль, метаболизм, регуляция // *Физиология растений*. 1999. Т. 46. № 2. С. 321–336.
16. Дикарев А.В., Дикарев В.Г., Дикарева Н.С. Исследование фитотоксичности свинца для растений редиса и салата при выращивании на разных типах почв // *Агрохимия*. 2019. № 6. С. 72–80.
17. Ху Ж.Цз., Пей Д.Л., Лиан Ф., Ши Г.С. Влияние загрязнения воды кадмием на рост растений *Sagittaria sagittifolia* // *Физиология растений*. 2009. Т. 56. № 5. С. 759–767.

Differentiation of Barley Varieties in Resistance to Cadmium is Remain the Same during the Whole Life Cycle of Plants

S. A. Geras'kin^{a,#}, A. V. Dikarev^a, and M. A. Lychenkova^a

^aRussian Institute of Radiology and Agroecology
Kievskoe Shosse, 109 km, Obninsk, Kaluga Region 249032, Russia

[#]E-mail: stgeraskin@gmail.com

To answer the question: will the varieties selected on the basis of the seedlings study show similar reactions to the action of cadmium throughout the entire life cycle, in the vegetation experiment we studied the concentration of cadmium in plants, biochemical, morphological and productive indicators of four varieties of spring barley contrasting in cadmium resistance. Significant differences in the levels of cadmium accumulation in plant tissues were found. It was found that a cadmium concentration of 50 mg/kg of sod-podzolic soil is critical for barley and allows one to confidently separate varieties that are contrast in resistance to this heavy metal. Differences between resistant and sensitive varieties are manifested at the organism level (leaf area, plant height, yield structure). Differences between contrasting varieties in biochemical parameters were not found.

Key words: barley, cadmium, leaf area, plant height, yield structure, proline, malondialdehyde.