

УДК [582.632.1:630*232.31:581.142]:546.48

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ КАДМИЯ НА ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ И БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ

Л. В. Ветчинникова¹, А. Ф. Титов^{2,3}

¹ Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

² Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

³ Отдел комплексных научных исследований ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

Изучали влияние ионов кадмия (от 10^{-6} до 10^{-3} М) на прорастание семян и рост проростков карельской березы *B. pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti и березы повислой *Betula pendula* Roth (сем. Betulaceae). Показано, что даже в низких концентрациях кадмий снижает энергию прорастания, абсолютную всхожесть семян, размер гипокотыля и зародышевого корешка. Наиболее токсичной оказалась концентрация кадмия 10^{-3} М, причем степень подавления прорастания семян была меньше при его воздействии в течение трех суток, чем семи. При более продолжительном действии (15 сут) ионы кадмия полностью ингибировали рост зародыша, а самая высокая концентрация (10^{-3} М) оказалась для семян летальной. Выявлены определенные количественные различия в реакции растений карельской березы и березы повислой на действие ионов кадмия, которые очевидно отражают их биологические особенности.

Ключевые слова: *B. pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, *Betula pendula* Roth; кадмий; семена; энергия прорастания; всхожесть; ростовые процессы.

L. V. Vetchinnikova, A. F. Titov. EFFECT OF CADMIUM IONS ON THE GERMINATION OF KARELIAN BIRCH AND SILVER BIRCH SEEDS

The effect of cadmium ions (from 10^{-6} to 10^{-3} M) on seed germination and early development of seedlings was studied in Karelian birch *B. pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti and silver birch *Betula pendula* Roth. It has been shown that even low concentrations of cadmium reduce the germination energy, germination percentage, hypocotyl and germinal root sizes. The most toxic concentration of cadmium was 10^{-3} M, and the suppression of seed germination was less pronounced when the exposure lasted for 3 days vs. 7 days. A longer impact (15 days) of cadmium ions completely inhibited embryo development, and the highest concentration (10^{-3} M) proved to be lethal to the seeds. Certain quantitative differences were revealed in the reaction of Karelian birch and silver birch plants to the action of cadmium ions, which obviously reflect the biological distinctions between these forms of birch.

Keywords: *B. pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti; *Betula pendula* Roth; cadmium; seeds; germination energy; germination percentage; growth processes.

Введение

Бурное развитие промышленности во второй половине XX века и значительное усиление антропогенного пресса на природу повлекли за собой резкое ухудшение экологической обстановки во многих регионах планеты, в т. ч. вследствие загрязнения окружающей среды. Среди многочисленных загрязнителей наиболее токсичными считаются выбросы промышленных предприятий, содержащие тяжелые металлы [Vassilev, 2002; Титов и др., 2007, 2014; Серегин, 2009; Hassan, Aarts, 2011; Ильин, 2012; Казнина, 2016; Cadmium..., 2019 и др.]. Тяжелые металлы поступают в окружающую среду преимущественно в нерастворимой форме, однако в ходе атмосферного переноса происходит постепенное их выщелачивание и переход из минеральной в ионную водорастворимую форму. В дальнейшем они поглощаются растениями, и по мере их накопления это становится реальной угрозой не только для самих растений, но и для животных и человека. Среди тяжелых металлов одним из наиболее токсичных и опасных считается кадмий, поскольку он достаточно легко поступает в растения, обладает высоким кумулятивным эффектом, не подвергается биодegradации и практически не выводится из организма [Das et al., 1997; Серегин, 2001; Benavides et al., 2005; Головкин и др., 2008; Казнина, Титов, 2013].

Береза, как известно, может в естественной среде активно расселяться на значительных по площади территориях, включая загрязненные тяжелыми металлами [Ташекова, Торопов, 2017]. Она не является их аккумулятором, однако способна накапливать довольно большое количество тяжелых металлов в органах и тканях, например, надземной части [Rosselli et al., 2003; Кузнецова и др., 2015; Григорьева, 2015], без явных признаков нарушения метаболизма, благодаря чему считается металлоустойчивым растением [Koronen et al., 2001; Вострикова, 2009]. Более того, в литературе имеются рекомендации использовать корневую меристему проростков семян березы повислой [Калаев и др., 2006; Вострикова, 2009] для проведения цитогенетического мониторинга, направленного на регистрацию фенотипических проявлений хромосомных аномалий и при оценке их распространения в популяциях. Преимущества березы, как и других древесных видов, обусловлены тем, что они являются многолетними растениями и возможные изменения в их тканях отражают характер длительного воздействия (и последствия) тех или иных факторов. Однако в тех случаях, когда речь идет

о нарушении у древесных растений физиологических процессов, вызванных тяжелыми металлами, удобной биологической моделью могут выступать прорастающие семена, всхожесть и энергия прорастания которых, а также рост проростков на начальном этапе развития легко поддаются регистрации.

Исходя из вышеизложенного, нами проведено изучение влияния ионов кадмия на прорастание семян и рост проростков карельской березы *B. pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti и березы повислой *Betula pendula* Roth.

Материалы и методы

Материалом для исследований служили семена *B. pendula* var. *carelica* и *B. pendula*, полученные в результате контролируемого опыления деревьев, типичных для изученных видов. Добавим, что, несмотря на существующее пока латинское название, карельскую березу мы также относим к таксономическому рангу вида в соответствии с его общепринятыми биологическими критериями [Ветчинникова, Титов, 2020].

Семена проращивали в лабораторных условиях на растворах уксуснокислой соли кадмия (Cd^{2+}) в концентрациях 10^{-6} , 10^{-5} , 10^{-4} и 10^{-3} М. Выбор соли, содержащей ацетат-ионы, обусловлен их наименьшей токсичностью для растений по сравнению с другими анионами [Калинин, 1989; Кагарманов, 1995; Казнина, 2016 и др.]. Поэтому наблюдаемый в этом случае биологический эффект почти целиком определялся действием ионов кадмия. Диапазон изученных концентраций металла варьировал от природной фоновой величины до критической для жизнедеятельности растений. Для проращивания семян контрольного варианта использовали дистиллированную воду без добавления кадмия. Проращивание семян осуществляли на специальной установке в чашках Петри. Повторность в пределах одного варианта составляла 50 семян, опыт повторяли трижды.

О реакции семян на действие кадмия судили по энергии прорастания (на 7-е сут) и всхожести семян на 3-и и 15-е сут (абсолютная всхожесть) от начала проращивания, а также по изменению линейных размеров зародышевого корешка и гипокотыля (на 7-е сут от начала проращивания). Статистическую обработку данных осуществляли с помощью общепринятых методов с использованием пакета программ Microsoft Excel. На рисунках представлены средние значения и их стандартные ошибки.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования показали, что в условиях лабораторного опыта ионы кадмия оказывали ощутимое влияние на прорастание семян изученных видов березы, что проявлялось в снижении их абсолютной всхожести и энергии прорастания, уменьшении размеров проростков, а также в торможении начальной стадии онтогенеза. При этом с увеличением концентрации металла наблюдалось усиление его ингибирующего действия. Так, если при использовании концентраций кадмия 10^{-6} , 10^{-5} и 10^{-4} М активное прорастание семян было зафиксировано на 3-и сут, то при применении концентрации 10^{-3} М наблюдали ярко выраженную задержку прорастания: лишь единичные семена после набухания характеризовались как «проклюнувшиеся», а спустя 15 сут их развитие прекращалось совсем (табл.). Соответственно ионы кадмия оказывали негативное влияние и на энергию прорастания семян карельской березы.

Так, энергия прорастания семян карельской березы (7-е сут) в контрольном варианте составила более 55 % (рис. 1). Но под влиянием кадмия она заметно снижалась. При этом в варианте с наибольшей концентрацией металла (10^{-3} М) прорастание составляло не более 10 % или не происходило вообще.

У березы повислой зависимость воздействия ионов кадмия от их концентрации на энергию прорастания семян оказалась сходной

с таковой у карельской березы, с той лишь разницей, что значения ее показателей по сравнению с последней были почти в 1,5 раза ниже (включая контроль) (рис. 1). В концентрациях 10^{-6} и 10^{-5} М кадмий также слабо влиял на энергию прорастания и абсолютную всхожесть семян березы повислой. Увеличение концентрации металла в растворе до 10^{-4} М приводило к заметному снижению всхожести семян, а до 10^{-3} М – к полному ее подавлению (табл.).

Скорость роста и формирования проростков у карельской березы оказались также срав-

Влияние кадмия на всхожесть семян карельской березы и березы повислой

The influence of cadmium on the germination of seeds of Karelian birch and silver birch

Концентрация кадмия, М Cadmium concentration, M	Количество проросших семян, в % Number of germinated seeds, in %			
	карельская береза Karelian birch		береза повислая silver birch	
	3 сут 3 day	15 сут* 15 day*	3 сут 3 day	15 сут* 15 day*
0 (контроль) (control)	45,0	74,3	7,4	48,0
10^{-6}	46,0	71,0	31,0	46,8
10^{-5}	41,4	73,3	26,6	43,4
10^{-4}	37,6	60,6	20,6	36,0
10^{-3}	16,8	0,0	11,3	0,0

Примечание. *Абсолютная всхожесть семян.

Note. *Absolute germination of seeds.

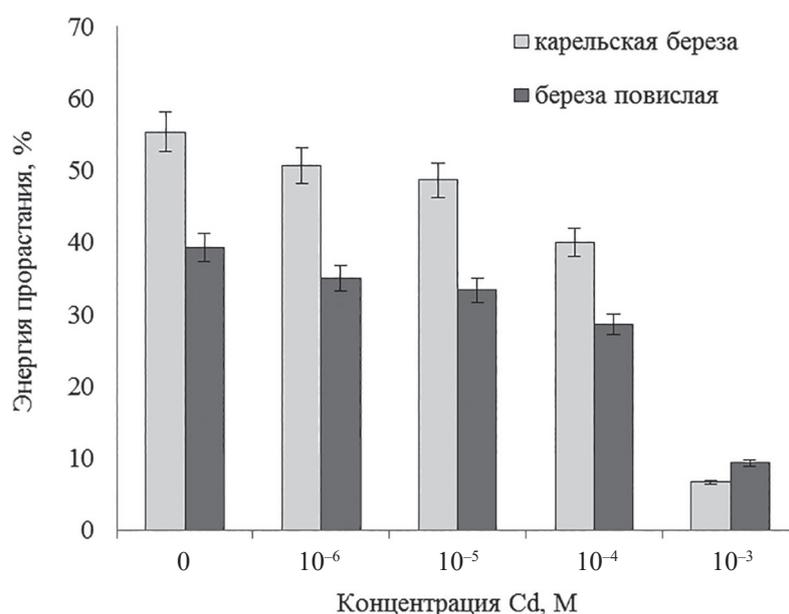


Рис. 1. Влияние кадмия на энергию прорастания семян карельской березы и березы повислой

Fig. 1. The effect of cadmium on the germination energy of seeds of Karelian birch and silver birch

нительно устойчивыми по отношению к ионам кадмия. В частности, на 7-е сут в концентрациях 10^{-6} и 10^{-5} М кадмий или не влиял на рост зародышевого корешка, который, как правило, появляется из семени первым, или слабо его стимулировал (рис. 2). При использовании концентрации 10^{-4} М отмечено заметное ингибирование роста зародышевого корешка (на 30 %), а в варианте с концентрацией 10^{-3} М происходило полное подавление его развития.

Размеры гипокотыля у карельской березы при использовании низких концентраций кадмия (10^{-6} , 10^{-5} М) практически не отличались от таковых в контроле, но по абсолютным значениям они почти вдвое превышали длину зародышевого корешка. Снижение величины прироста гипокотыля (в 1,5 раза) через 7 сут отмечено при применении концентрации кадмия, равной 10^{-4} М, а почти полное торможение – в варианте с концентрацией металла 10^{-3} М (рис. 3). Более активный рост гипокотыля по сравнению с зародышевым корешком, по всей вероятности, обусловлен тем, что береза, как и ряд других видов, характеризуется надземным (эпигейным) прорастанием. В этом случае на ранних этапах развития растений гипокотиль играет ключевую роль, прорастая из семени в виде петлеобразного изгиба, благодаря которому легко «пробивает» слой почвы и «выносит» семядоли вместе с зародышевой почкой на поверхность.

У березы повислой по сравнению с карельской березой кадмий в изученном диапазоне концентраций в большей степени оказывал стимулирующее влияние на рост проростков (рис. 2, 3). В частности, если на 7-е сут в контрольном варианте длина зародышевого корешка и гипокотыля не превышала 4 и 6 мм соответственно (и была почти в 2 раза меньше, чем у карельской березы), то в опытном – с использованием концентраций 10^{-6} и 10^{-5} М – размеры проростков увеличились более чем в 2 раза. Но положительное воздействие кадмия на рост гипокотыля у березы повислой было слабее, чем на рост корней. Ранее эффект стимулирования малыми дозами тяжелых металлов отмечен у ряда представителей культурных растений [Atici et al., 2005; Dong et al., 2005; Казнина, 2016 и др.]. Вместе с тем у березы повислой, так же как и у карельской березы, при использовании наибольшей из изученных концентраций (10^{-3} М) кадмий ингибировал начальный рост зародыша, препятствуя дальнейшему прорастанию семян.

Добавим, что на начальных этапах онтогенеза обоих видов березы влияние ионов кадмия на процессы роста и развития семян усиливалось с увеличением продолжительности его действия, однако степень токсичности зависела от применяемой концентрации. Так, при использовании концентраций от 10^{-6} до 10^{-4} М кадмий в течение всего опыта оказывал негативное воздействие на начальный рост про-

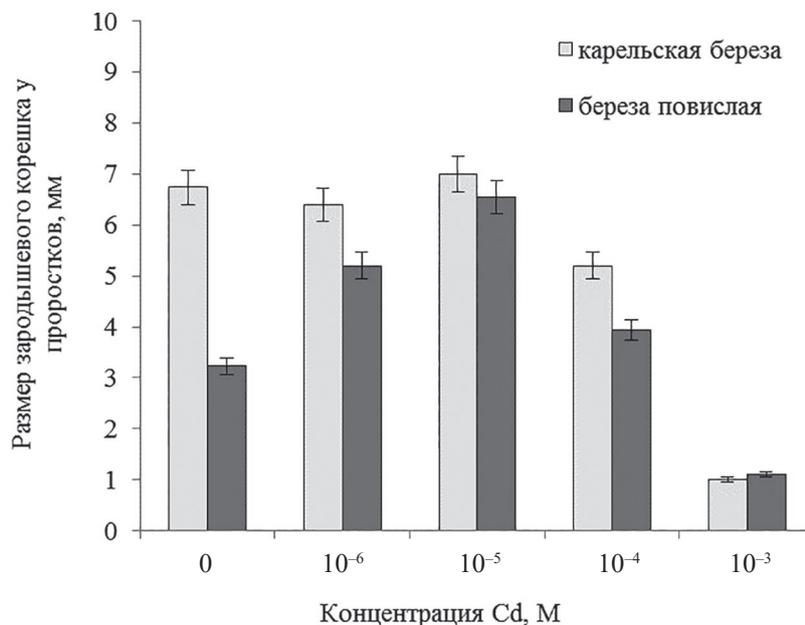


Рис. 2. Влияние кадмия на размер зародышевого корешка у проростков карельской березы и березы повислой

Fig. 2. The effect of cadmium on the size of the germinal root in seedlings of Karelian birch and silver birch

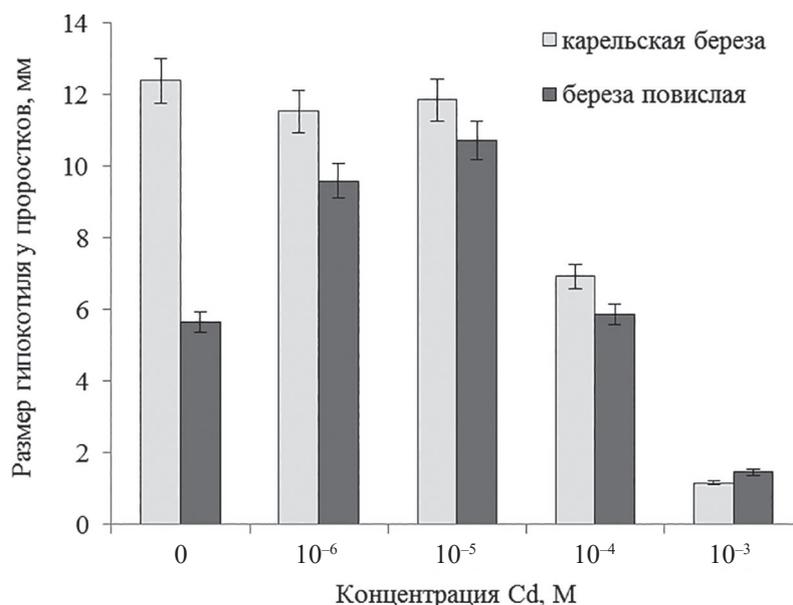


Рис. 3. Влияние кадмия на размер гипокотилия у проростков карельской березы и березы повислой

Fig. 3. The effect of cadmium on the size of hypocotyl in seedlings of Karelian birch and silver birch

ростков, но оно не приводило к летальному исходу (табл.). По всей вероятности, это обусловлено тем, что семенная оболочка выступала существенным барьером для поглощения ионов кадмия. Ранее на примере травянистых и сельскохозяйственных растений убедительно показано, что прорастание семян является наиболее устойчивым процессом к действию тяжелых металлов именно потому, что ионы металла не способны проникать внутрь семени и остаются в клеточных стенках семенной оболочки [Холодова и др., 2005; Титов и др., 2007, 2014; Казнина, 2016]. Однако после набухания ее целостность нарушается, а проницаемость увеличивается. Заметим, что в семенах березы из-за отсутствия эндосперма первоначально запас питательных веществ зародыш получает непосредственно из семядолей, после прорастания – за счет зародышевого корешка из окружающей среды. Не исключено, что по этой причине в наших опытах спустя 15 сут в варианте с концентрацией кадмия 10^{-4} М наблюдалось побурение зачаточных корешков, свидетельствующее о токсичном воздействии металла на проростки в зависимости не только от его концентрации, но и от продолжительности действия.

Таким образом, в целом характер реакции семян обоих видов березы на действие кадмия оказался однотипным: с повышением концентрации металла снижается энергия прорастания и абсолютная всхожесть семян, замедляется

рост зачаточных органов проростков. Наблюдаемые при этом различия носили только количественный характер. Например, у березы повислой на 7-е сут после начала проращивания отмечено положительное влияние низких концентраций кадмия (10^{-5} М) на рост проростков: длина гипокотилия была более чем на 25 % выше, чем в контроле, что не наблюдалось у карельской березы.

Данные о снижении энергии прорастания семян у обоих видов березы относительно контрольного варианта свидетельствуют, что отрицательное влияние кадмия на ростовые процессы, не фиксируемое визуально, по всей вероятности, может иметь место и при применении низких концентраций металла. Основными негативными эффектами кадмия (как и тяжелых металлов в целом) на процесс деления клеток считаются: снижение интенсивности клеточного деления, уменьшение количества клеток на всех фазах митоза, увеличение продолжительности отдельных фаз и всего митотического цикла [Серегин, Иванов, 2001; Титов и др., 2014 и др.]. Помимо прочего такие изменения могут быть связанными еще и с повреждением хромосом и/или с неравным их расхождением к полюсам клетки [Калаев и др., 2006; Баранова, 2015 и др.]. Однако благодаря существованию различных защитно-приспособительных и компенсаторных механизмов растения березы способны расти и развиваться в присутствии достаточно высоких

концентраций кадмия в среде, что свидетельствует об их относительно высокой металлоустойчивости.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что ионы кадмия оказывают на прорастание семян карельской березы и березы повислой ингибирующее действие, характер и сила которого зависят от концентрации металла и продолжительности его действия. Даже в низких концентрациях (10^{-6} , 10^{-5} М) ионы кадмия снижают энергию прорастания и абсолютную всхожесть семян карельской березы и березы повислой. При применении более высоких концентраций металла (10^{-4} и особенно 10^{-3} М) отмечено не только замедление процесса прорастания семян, но и торможение роста зачаточных органов. Вместе с тем зафиксировано небольшое стимулирующее влияние низких концентраций ионов кадмия на размеры зачаточного корешка и гипокотила у березы повислой, что не наблюдалось у карельской березы. Некоторые количественные различия, выявленные в реакции растений карельской березы и березы повислой на действие ионов кадмия, очевидно отражают биологические особенности этих видов. В целом, несмотря на то, что семена березы не имеют твердой оболочки, а зародыш – эндосперма, они способны прорасти при концентрации кадмия во внешней среде от 10^{-6} до 10^{-4} М, что свидетельствует об их достаточно высокой устойчивости к этому металлу. Токсичной оказалась наибольшая из изученных концентрация кадмия – 10^{-3} М. Результаты опытов позволяют также говорить о потенциальной возможности использования семян карельской березы для создания плантаций целевого назначения, а березы повислой – для лесовосстановления на территориях, загрязненных тяжелыми металлами, в частности кадмием.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт леса КарНЦ РАН, Институт биологии КарНЦ РАН, Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН).

Литература

Баранова Т. В. Цитогенетические изменения проростков березы повислой при загрязнении городской среды // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 2(26). С. 77–82.

Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Карельская береза: разновидность или самостоятельный вид? // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 26–48. doi: 10.17238/issn0536-1036.2020.1.26

Вострикова Т. В. Цитозеологическое изучение березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях техногенной нагрузки // Вестник ВГУ. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2009. № 2. С. 95–101.

Головки Т. К., Гармаш Е. В., Скугорева С. Г. Тяжелые металлы в окружающей среде и растительных организмах // Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН. 2008. № 7. С. 2–7.

Григорьева И. Я. Изучение биоиндикационных свойств древесных растений на тяжелые металлы // Инновационная наука. 2015. Т. 3, № 4. С. 26–29.

Ильин В. Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение. Новосибирск: СО РАН, 2012. 220 с.

Кагарманов И. Р. Биологические особенности тополя в связи с лесовосстановлением в техногенных условиях Предуралья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 1995. 18 с.

Казнина Н. М., Титов А. Ф. Влияние кадмия на физиологические процессы и продуктивность растений семейства *Roaceae* // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133, № 6. С. 588–603.

Казнина Н. М. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства *Roaceae* к тяжелым металлам: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Санкт-Петербург, 2016. 38 с.

Калаев В. Н., Буторина А. К., Шелухина О. Ю. Оценка антропогенного загрязнения районов г. Старый Оскол по цитогенетическим показателям семенного потомства березы повислой // Экологическая генетика. 2006. Т. 4, № 2. С. 9–21.

Калинин М. И. Корневоедение: Учеб. пособие. Киев: УМК ВО, 1989. 195 с.

Кузнецова Т. Ю., Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий произрастания // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 1. С. 68–73. doi: 10.17076/esc027

Серегин И. В. Распределение тяжелых металлов в растениях и их действие на рост: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М. 2009. 53 с.

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.

Ташекова А. Ж., Торопов А. С. Использование листьев растений как биогеохимических индикаторов состояния городской среды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 5. 114–124.

Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения // Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 194 с.

Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам // Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 170 с.

Холодова В. П., Волков К. С., Кузнецов В. В. Адаптация к высоким концентрациям солей меди

и цинка растений хрустальной травки и возможность их применения в целях фитомедиации // Физиология растений. 2005. Т. 52, № 6. С. 848–858.

Atici Ö., Ağar G., Battal P. Changes in phytohormone contents in chickpea seeds germinating under lead or zinc stress // *Biologia Plantarum*. 2005. Vol. 49, no. 2. P. 215–222.

Benavides M. P., Gallego S. M., Tomaro M. L. Cadmium toxicity in plants // *Braz. J. Plant Physiol.* 2005. Vol. 17, no. 1. P. 21–34. doi: 10.1590/S1677-04202005000100003

Cadmium toxicity and tolerance in plants from physiology to remediation / Eds. M. Hasanuzzaman, M. Narasimha, M. N. V. Prasad, M. Fujita. Academic Press, 2019. 619 p.

Das P., Samantaray S., Rout G. R. Studies on cadmium toxicity in plants: a Review // *Environ. Pollut.* 1997. Vol. 98, no. 1. P. 29–36. doi: 10.1016/s0269-7491(97)00110-3

References

Baranova T. V. Tsitogeneticheskie izmeneniya pro-rostkov berezy povislou pri zagryaznenii gorodskoi sredy [Cytogenetic changes of *Betula pendula* sprouts when environment pollution]. *Vestnik PGTU. Ser.: Les. Ekol. Prirodopol'zovanie* [Vestnik Volga St. Univ. Tech. Ser.: Forest. Ecol. Nat. Management]. 2015. No. 2(26). P. 77–82.

Golovko T. K., Garmash E. V., Skugoreva S. G. Tyazhelye metally v okruzhayushchei srede i rastitel'nykh organizmakh [Heavy metals in the environment and plants]. *Vestnik IB Komi NTs UrO RAN* [Vestnik Inst. Biol., Komi SC UB RAS]. 2008. No. 7. P. 2–7.

Grigor'eva I. Ya. Izuchenie bioindikatsionnykh svoystv drevesnykh rastenii na tyazhelye metally [Study of bio-indication properties of woody plants on heavy metals]. *Innovatsionnaya nauka* [Innovative Sci.]. 2015. Vol. 3, no. 4. P. 26–29.

Il'in V. B. Tyazhelye metally i nemetally v sisteme pochva – rastenie [Heavy metals and nonmetals in the soil-plant system]. Novosibirsk: SO RAN, 2012. 220 p.

Kagarmanov I. R. Biologicheskie osobennosti topolei v svyazi s lesovosstanovleniem v tekhnogennykh usloviyakh Predural'ya [Biological features of the poplar in connection with reforestation in the man-induced conditions of the Cis-Ural region]: PhD (Cand. of Biol.) thesis. Ufa, 1995. 18 p.

Kalaev V. N., Butorina A. K., Sheluhina O. Yu. Otsenka antropogennogo zagryazneniya raionov g. Staryi Oskol po tsitogeneticheskim pokazatelyam semennogo potomstva berezy povislou [Assessment of anthropogenic pollution of the Stary Oskol districts by cytogenetic indicators of seed of the silver birch]. *Ekol. genetika* [Ecol. genetics]. 2006. Vol. 4, no. 2. P. 9–21.

Kalinin M. I. Kornevedenie: Ucheb. posobie [Study of roots: a study guide]. Kiev: UMK VO, 1989. 195 p.

Kaznina N. M. Fiziologo-biokhimicheskie i molekulyarno-geneticheskie mekhanizmy ustoichivosti rastenii semeistva *Poaceae* k tyazhelym metallam [Physiological-biochemical and molecular genetic mechanisms

Dong J., Wu F., Zhang G. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings // *J. Zhejiang Univ. Sci. B*. 2005. Vol. 6, no. 10. P. 974–98. doi: 10.1631/jzus.2005. B0974

Hassan Z., Aarts M. G. Opportunities and feasibilities for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants // *Environ. Exp. Bot.* 2011. Vol. 72, no. 1. P. 53–63.

Kopponen P., Utriainen M., Lukkari K., Suntioinen S., Kärenlampi L., Kärenlampi S. Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soil // *Environ. Pollut.* 2001. Vol. 112. P. 89–97.

Rosselli W., Keller C., Boschi K. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil // *Plant and Soil*. 2003. Vol. 256, iss. 2. P. 265–272.

Vassilev A. Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: an overview // *J. Central Eur. Agric.* 2002. Vol. 4, no. 1. P. 65–74.

Поступила в редакцию 11.02.2020

of the *Poaceae* family resistance to heavy metals]: Summary DSc (Dr. of Biol.) thesis. St. Peterburg, 2016. 38 p.

Kaznina N. M., Titov A. F. Vliyaniye kadmiya na fiziologicheskie protsessy i produktivnost' rastenii semeistva *Poaceae* [The influence of cadmium on physiological processes and productivity of *Poaceae* plants]. *Uspekhi sovr. biol.* [Advances in Modern Biol.]. 2013. Vol. 133, no. 6. P. 588–603.

Kholodova V. P., Volkov K. S., Kuznetsov V. V. Adaptatsiya k vysokim kontsentratsiyam solei medi i tsinka rastenii khrustal'noi travki i vozmozhnost' ikh primeneniya v tselyakh fitomediatsii [Adaptation of the common ice plant to high copper and zinc concentrations and their potential using for phytoremediation]. *Fiziol. rast.* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2005. Vol. 52, no. 6. P. 848–858.

Kuznetsova T. Yu., Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Akkumulyatsiya tyazhelykh metallov v razlichnykh organakh i tkanyakh berezy v zavisimosti ot uslovii proizvodstvaniya [Heavy metals accumulation in various organs and tissues of birch trees depending on grow the conditions a comparative study of birches]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. of KarRC RAS]. 2015. No. 1. P. 68–73. doi: 10.17076/eco27

Seregin I. V., Ivanov V. B. Fiziologicheskie aspekty toksicheskogo deistviya kadmiya i svintsya na vysshie rasteniya [Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants]. *Fiziol. rast.* [Russ. J. Plant Physiol.]. 2001. Vol. 48, no. 4. P. 606–630.

Seregin I. V. Raspredeleniye tyazhelykh metallov v rasteniyakh i ikh deistvie na rost [Heavy metals distribution in plants and their effect on growth]: Summary DSc (Dr. of Biol.) thesis. Moscow, 2009. 53 p.

Tashekova A. Z., Toropov A. S. Ispol'zovanie list'ev rastenii kak biogeokhimicheskikh indikatorov sostoyaniya gorodskoi sredy [Application of leaves as biogeoindicators of urban environment state]. *Izv. Tomskogo politekh. univ. Inzhiniring georesursov* [Bull. Tomsk Polytechnic Univ. Geo Assets Engineering]. 2017. Vol. 328, no. 5. P. 114–124.

Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V. Tyazhelye metally i rasteniya [Heavy metals and plants]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. 194 p.

Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Laidinen G. F. Ustoichivost' rastenii k tyazhelym metallam [Resistance of plants to heavy metals]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 172 p.

Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Karel'skaya bereza: raznovidnost' ili samostoyatel'nyi vid? [Curly birch: a variety or a separate species?]. *Izv. vuzov. Lesn. zhurn.* [Forestry J.]. 2020. No. 1. P. 26–48. doi: 10.17238/issn0536-1036.2020.1.26

Vostrikova T. V. Citoekologicheskoe izuchenie berezy povisloi (*Betula pendula* Roth) v usloviyakh tekhnogennoi nagruzki [Cytoecological study of the silver birch (*Betula pendula* Roth) under anthropogenic load]. *Vestnik VGU, Seriya: Khimiya. Biol. Farmatsiya* [Bull. Voronezh St. Univ., Ser. Chem. Biol. Pharmacy]. 2009. No. 2. P. 95–101.

Atici Ö., Ağar G., Battal P. Changes in phytohormone contents in chickpea seeds germinating under lead or zinc stress. *Biol. Plant.* 2005. Vol. 49, no. 2. P. 215–222.

Benavides M. P., Gallego S. M., Tomaro M. L. Cadmium toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 2005. Vol. 17, no. 1. P. 21–34. doi: 10.1590/S1677-04202005000100003

Cadmium toxicity and tolerance in plants from physiology to remediation. Eds. M. Hasanuzzaman,

M. Narasimha, M. N. V. Prasad, M. Fujita. Academic Press, 2019. 619 p.

Das P., Samantaray S., Rout G. R. Studies on cadmium toxicity in plants: a Review. *Environ. Pollut.* 1997. Vol. 98, no. 1. P. 29–36. doi: 10.1016/s0269-7491(97)00110-3

Dong J., Wu F., Zhang G. Effect of cadmium on growth and photosynthesis of tomato seedlings. *J. Zhejiang Univ. Sci. B.* 2005. Vol. 6, no. 10. P. 974–98. doi: 10.1631/jzus.2005. B0974

Hassan Z., Aarts M. G. Opportunities and feasibility for biotechnological improvement of Zn, Cd or Ni tolerance and accumulation in plants. *Environ. Exp. Bot.* 2011. Vol. 72, no. 1. P. 53–63.

Kopponen P., Utriainen M., Lukkari K., Suntioinen S., Kärenlampi L., Kärenlampi S. Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soil. *Environ. Pollut.* 2001. Vol. 112. P. 89–97.

Rosselli W., Keller C., Boschi K. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil. *Plant and Soil.* 2003. Vol. 256, iss. 2. P. 265–272.

Vassilev A. Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: an overview. *J. Central Eur. Agric.* 2002. Vol. 4, no. 1. P. 65–74.

Received February 11, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Ветчинникова Лидия Васильевна

главный научный сотрудник лаб. лесных биотехнологий, д. б. н.
Институт леса КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: vetchin@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768160

Титов Александр Федорович

главный научный сотрудник Отдела комплексных научных исследований КарНЦ РАН,
руководитель лаб. экологической физиологии растений,
чл.-корр. РАН, д. б. н., проф.
Институт биологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: titov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Vetchinnikova, Lidia

Forest Research Institute,
Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: vetchin@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 768160

Titov, Alexander

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: titov@krc.karelia.ru