

УДК 631.445.5:631.445.4

Р.М. Дауд^{1,2}, С.И. Колесников³, А.А. Кузина⁴, Т.В. Минникова⁵, К.Ш. Казеев⁶, Д.Х. Нгуен⁷, Х.К. Данг^{8,9}

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АРИДНЫХ ПОЧВ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ К ЗАГРЯЗНЕНИЮ КАДМИЕМ ПО БИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Аридные почвы выполняют важные экологические функции, прежде всего, поддержание биологического разнообразия и устойчивости биосферы. Одним из приоритетных загрязнителей для них является кадмий. Аридные почвы Юга Европейской части России различаются по своей устойчивости к загрязнению кадмием и образуют следующий ряд по мере ее снижения: черноземы обыкновенные (haplic chernozem) ≥ темно-каштановые (haplic kastanozems) ≥ каштановые (haplic kastanozems) ≥ светло-каштановые (haplic kastanozems) > бурые полупустынные (haplic calcisols) > песчаные (calcaric arenosols). Чем тяжелее гранулометрический состав и больше органического вещества в исследованных почвах, тем сильнее связываются металлы и меньше проявляют токсичность. Также были разработаны региональные предельно допустимые концентрации (рПДК) кадмия в аридных почвах Юга Европейской части России на основе нарушения их экосистемных функций. Региональная ПДК кадмия для черноземов обыкновенных (haplic chernozem) и темно-каштановых почв (haplic kastanozems) составляет 3,0 мг/кг почвы, для каштановых (kastanozems haplic) – 2,4 мг/кг, для светло-каштановых (haplic kastanozems) – 1,9 мг/кг, для бурых полупустынных (haplic calcisols) – 1,6 мг/кг, для песчаных бурых полупустынных (calcaric arenosols) – 1,1 мг/кг. Разработанные рПДК могут быть использованы для нормирования содержания кадмия в аридных почвах других регионов мира. Также, разработаны прогнозные картосхемы, отражающие степени ухудшения биологического состояния аридных почв Юга России при загрязнении разными концентрациями кадмия.

Ключевые слова: каштановые почвы, бурые полупустынные почвы, биотестирование, нормирование, прогнозирование, региональные предельно допустимые концентрации

Введение. Основными антропогенными источниками загрязнения почв кадмием являются сжигание угля, нефти и нефтепродуктов, добыча и переработка цветных металлов и железа, сжигание твердых бытовых отходов, в частности поливинилхлоридного пластика, производство цемента, резины, текстиля, красителей, применение фосфатных удобрений и пестицидов, захоронение содержащих кадмий аккумуляторов и др. [Bro-Rasmussen, 1996; Jackson, Macgillivray, 1995; Jarup, 2003; Khan et al., 2017; Cadmium Toxicity ..., 2019; Pan et al., 2010].

Кадмий относят к высокотоксичным тяжелым металлам, представляющим значительную опасность для окружающей среды даже в низких концентрациях. Он имеет длительный биологический период выведения и занимает седьмое место в спис-

ке приоритетных опасных веществ [Sidhu et al., 2017a; Wagner, 1993].

Механизмами токсичности кадмия для живых организмов является ингибирование ферментов, в том числе вследствие замещения кадмием цинка [Campbell, 2006; Wuana, Okieimen, 2011], а также снижение проницаемости биологических мембран [Kabata-Pendias, 2010].

В почве основной химической формой кадмия является Cd^{2+} . В такой форме он проникает в клетки корней растений с помощью регулируемых цинком и железом транспортеров [Asgher et al., 2015; Tudoreanu, Phillips, 2004].

Подвижность и биодоступность кадмия в почве зависит, прежде всего, от таких ее свойств, как гранулометрический состав, pH, Eh, содержание

¹ Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, Россия

² Университет Тишрин, Сирия, аспирант; e-mail: ramadaoud91@yahoo.com

³ Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, зав. кафедрой экологии и природопользования, докт. с.-хоз. н., профессор; e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

⁴ Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, канд. биол. н., ст. науч. с.; e-mail: nyuta_1990@mail.ru

⁵ Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, канд. биол. н., ст. науч. с.; e-mail: loko261008@yandex.ru

⁶ Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, докт. геогр. н., профессор; e-mail: kamil_kazeev@mail.ru

⁷ Совместный Российско-вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, институт тропической экологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: danghoi110@gmail.com

⁸ Южный федеральный университет, Академия биологии и биотехнологий им. Д.И. Ивановского, кафедра экологии и природопользования, Россия

⁹ Совместный Российско-вьетнамский тропический научно-исследовательский и технологический центр, институт тропической экологии, аспирант; e-mail: danghungcuong@gmail.com

органического вещества, степень засоления. Чем тяжелее гранулометрический состав почвы, тем прочнее закрепляется кадмий. При увеличении pH кадмий из подвижной формы трансформируется в неподвижную и его биодоступность снижается. С увеличением Eh подвижность кадмия снижается. Увеличение засоленности также повышает подвижность кадмия в почве [Tang et al., 2016]. Органическое вещество адсорбирует кадмий, делая его менее подвижным [Khan et al., 2017].

Засушливые земли (аридные, семиаридные и сухие субгумидные районы) занимают 41% поверхности Земли. На них проживает более 38% населения мира, в результате чего эти территории подвергаются значительному антропогенному воздействию [Hu, Nan, 2018]. Аридные экосистемы очень важны своими экологическими функциями, в частности, поддержанием биологического разнообразия и устойчивости биосферы [Davidson, 2014; Kingsford et al., 2016; Greed et al., 2017; Menéndez-Serra et al., 2019]. Не составляют исключение и аридные экосистемы Юга Европейской части России.

Аридные почвы Юга Европейской части России представлены зональными каштановыми и бурыми полупустынными почвами, а также интразональными песчаными бурыми полупустынными [Национальный атлас ..., 2011; Казеев, Колесников, 2015]. Эти почвы различаются по устойчивости к загрязнению тяжелыми металлами (ТМ), в том числе кадмием, поскольку обладают разными экологическими свойствами, обуславливающими подвижность кадмия в почве [Казеев, Колесников, 2015].

Среди тяжелых металлов, загрязняющих окружающую среду, кадмий является одним из наиболее токсичных элементов даже при незначительных концентрациях [Guidelines ..., 2017; Goering et al., 1994]. Загрязнение почв кадмием широко распрост-

ранено в аридных районах Юга Европейской части России. Основными его источниками являются удобрения и пестициды, теплоэлектростанции, автотранспорт, бытовые отходы, сточные воды, месторождения нефти и газа, строительство нефте- и газопроводов. В отдельных случаях предельно-допустимые концентрации (ПДК) кадмия в почве этих территорий превышены в пять и более раз [Отчет о научно-производственной деятельности ..., 2016; Дьяченко, Матасова, 2016]. Загрязнение почв кадмием характерно и для других аридных территорий мира [Felix-Henningsen et al., 2007; Nan et al., 2011; Hu, Nan, 2018].

Цель работы – оценить устойчивость аридных почв Юга Европейской части России к загрязнению кадмием по биологическим показателям в модельном эксперименте.

Объекты и методы исследования. Было проведено лабораторное моделирование химического загрязнения кадмием всех основных аридных почв Юга Европейской части России, а также чернозема обыкновенного для сравнения. Места отбора и основные эколого-генетические характеристики исследованных почв представлены в табл. 1.

Корректность переноса результатов лабораторного моделирования химического загрязнения почв в натурные условия была установлена предшествующими исследованиями [Колесников и др., 2014].

Почву отбирали из верхнего 10-см слоя. В непашотных почвах основное количество металлов накапливается именно в нем [Kabata-Pendias, 2010].

Кадмий вносили в почву в количествах 1, 10, 100 предельно допустимых концентраций (ПДК) (3, 30 и 300 мг/кг, соответственно). ПДК кадмия в почве в России не разработана. ОДК кадмия в суглинистых и глинистых нейтральных почвах составляет 2 мг/кг, песчаных – 0,5 мг/кг [ГН 2.1.7.2511-09].

Таблица 1

Места отбора и эколого-генетические характеристики почв

Название почв по эколого-генетической классификации почв [Национальный ..., 2011]	Название почв по [World Reference Base ..., 2006]	Условные обозначения	Экосистема	Место отбора	Координаты	Содержание органического вещества, %	pH	Гранулометрический состав
Чернозем обыкновенный	haplic chernozem	Чо	Настоящая степь	Ростовская область, Октябрьский район, п. Персиановский	47°30'18,11" N 40°9'10,95" E	3,8	7,6	Тяжелосуглинистый
Темно-каштановая	haplic kastanozems	Кт	Сухая степь	Ростовская область, Орловский район, х. Майорский	47°2'13,91" N 42°5'23,53" E	3,5	7,6	Тяжелосуглинистый
Каштановая	haplic kastanozems	К	Сухая степь	Ростовская область, с. Ремонтное	46°34'23,24" N 43°36'28,64" E	2,8	7,8	Тяжелосуглинистый
Светло-каштановая	haplic kastanozems	Кс	Сухая степь	Республика Калмыкия, г. Элиста	46°18'58,77" N 44°22'53,96" E	1,4	8,1	Среднесуглинистый
Буряя полупустынная	haplic calcisols	Бп	Полупустыня	Республика Калмыкия, Яшкульский район, п. Хулхута	46°19'16,71" N 46°19'42,86" E	1,2	8,3	Легкосуглинистый
Песчаная буряя полупустынная	calcaric arenosols	П(бп)	Полупустыня	Астраханская область, Наримановский район, с. Новокучергановка	46°15'54,02" N 47°49'3,59" E	0,8	8,3	Песчаный

ПДК кадмия в почве, разработанная в Германии, равна 3 мг/кг [Kabata-Pendias, 2010]. Учитывая, что большинство использованных в исследовании аридных почв являются суглинистыми нейтральными, то есть буферными к загрязнению кадмием, моделировали загрязнение почв, начиная с 3 мг/кг.

Загрязнение почв кадмием происходит в большей степени в форме оксида [Kabata-Pendias, 2010], поэтому его вносили в почву в виде оксида кадмия (II). Кроме того, при использовании оксида металла, в отличие от соли, в почву не поступают сопутствующие анионы, способные повлиять на ее биологические свойства.

После загрязнения кадмием почву массой 1 кг инкубировали в пластиковых сосудах в трехкратной повторности при температуре 20–22°C и увлажнении 60% от полевой влагоемкости.

Из многочисленных показателей состояния почвы исследовали именно биологические свойства по той причине, что именно они первыми реагируют на внешнее воздействие, в том числе на загрязнение, и являются значительно более чувствительными и информативными по сравнению с другими свойствами почвы [Колесников и др., 2000]. Биологические показатели оценивали через один месяц после загрязнения. Как правило, их наибольшее ухудшение происходит в этот период, что позволяет выявить максимальную токсичность металла [Колесников и др., 2000].

Для определения биологических свойств почвы использовали общепринятые методы [Казеев и др., 2016]. Общую численность бактерий в почве определяли методом люминесцентной микроскопии, обилие бактерий рода *Azotobacter* – методом комочков обрастания на среде Эшби, активность каталазы – по скорости разложения перекиси водорода, активность дегидрогеназ – по скорости превращения хлорида трифенилтетразолия в трифенилформазан, целлюлозолитическую активность – по скорости разложения в почве хлопчатобумажного полотна, о фитотоксичности почв судили по длине корней редиса (сорт Корунд).

Все использованные биологические показатели отличаются высокой чувствительностью, отражающей степень снижения значений биологического показателя в вариантах с загрязнением по сравнению с контролем, и высокой информативностью, то есть теснотой корреляции между показателем и содержанием в почве загрязняющего вещества, что было подтверждено многочисленными исследованиями [Колесников и др., 2000, 2013, 2014].

На основе вышеперечисленных биологических показателей рассчитывали интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы [Колесников и др., 2000], который включает микробиологические, биохимические и фитотоксические параметры, характеризующие разные стороны протекающих в почве биологических процессов.

Расчет ИПБС почвы проводили следующим образом. Значения биологических показателей в незагрязненной почве (контроле) принимали за 100%,

а в загрязненной (вариантах эксперимента) выражали в процентах относительно контроля (100%). Затем рассчитывали среднее значение всех биологических показателей для каждого варианта эксперимента. Применяемая методика позволяет объединить (интегрировать) значения разных биологических показателей, имеющих разные единицы измерения, в один общий показатель.

Результаты исследования. В результате загрязнения кадмием было зафиксировано снижение всех исследованных биологических показателей аридных почв Юга Европейской части России (рис. 1): общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназы, целлюлозолитической активности, обилия бактерий рода *Azotobacter*, длины корней редиса. Степень ухудшения биологических показателей зависела от концентрации кадмия в почве.

Аридные почвы Юга Европейской части России проявили разную устойчивость к загрязнению кадмием. Был сформирован следующий ряд по мере снижения устойчивости: черноземы обыкновенные (haplic chernozem) (79) ≥ темно-каштановые (haplic kastanozems) (78) ≥ каштановые (haplic kastanozems) (77) ≥ светло-каштановые (haplic kastanozems) (73) > бурые полупустынные (haplic calcisols) (65) > песчаные бурые полупустынные (calcaric arenosols) (58). В скобках представлены значения ИПБС почв (%), загрязненных кадмием (среднее для трех доз: 1, 10 и 100 ПДК); ИПБС незагрязненных почв (контроль) принят за 100%. Чем выше значение ИПБС в скобках, тем в меньшей степени снижаются биологические свойства почвы при ее загрязнении кадмием. Как видно из полученного ряда устойчивости почв, чем тяжелее гранулометрический состав и больше органического вещества в исследованных почвах (см. табл. 1), тем сильнее связывается кадмий и меньше проявляет токсичность по отношению к биологическим свойствам почв. Щелочно-кислотные и окислительно-восстановительные условия в исследованных почвах различаются не столь существенно, а, следовательно, не оказывают такого значительного влияния на подвижность в них кадмия и его токсичность. Аналогичные закономерности связи экотоксичности тяжелых металлов с гранулометрическим составом почв и содержанием в них органического вещества были получены для черноземов [Колесников и др., 2013], предгорных и горных почв Кавказа [Колесников и др., 2009].

Темно-каштановые почвы отличаются тяжелосуглинистым гранулометрическим составом, высоким содержанием органического вещества (3,5%), нейтральным pH (см. табл. 1). Эти свойства способствуют закреплению кадмия почвой и его меньшему влиянию на ее биологические свойства.

Для каштановых почв характерен также тяжелосуглинистый гранулометрический состав. Однако содержание органического вещества в них меньше (2,8%), соответственно, подвижность кадмия в них больше, чем в темно-каштановых почвах (3,5%).

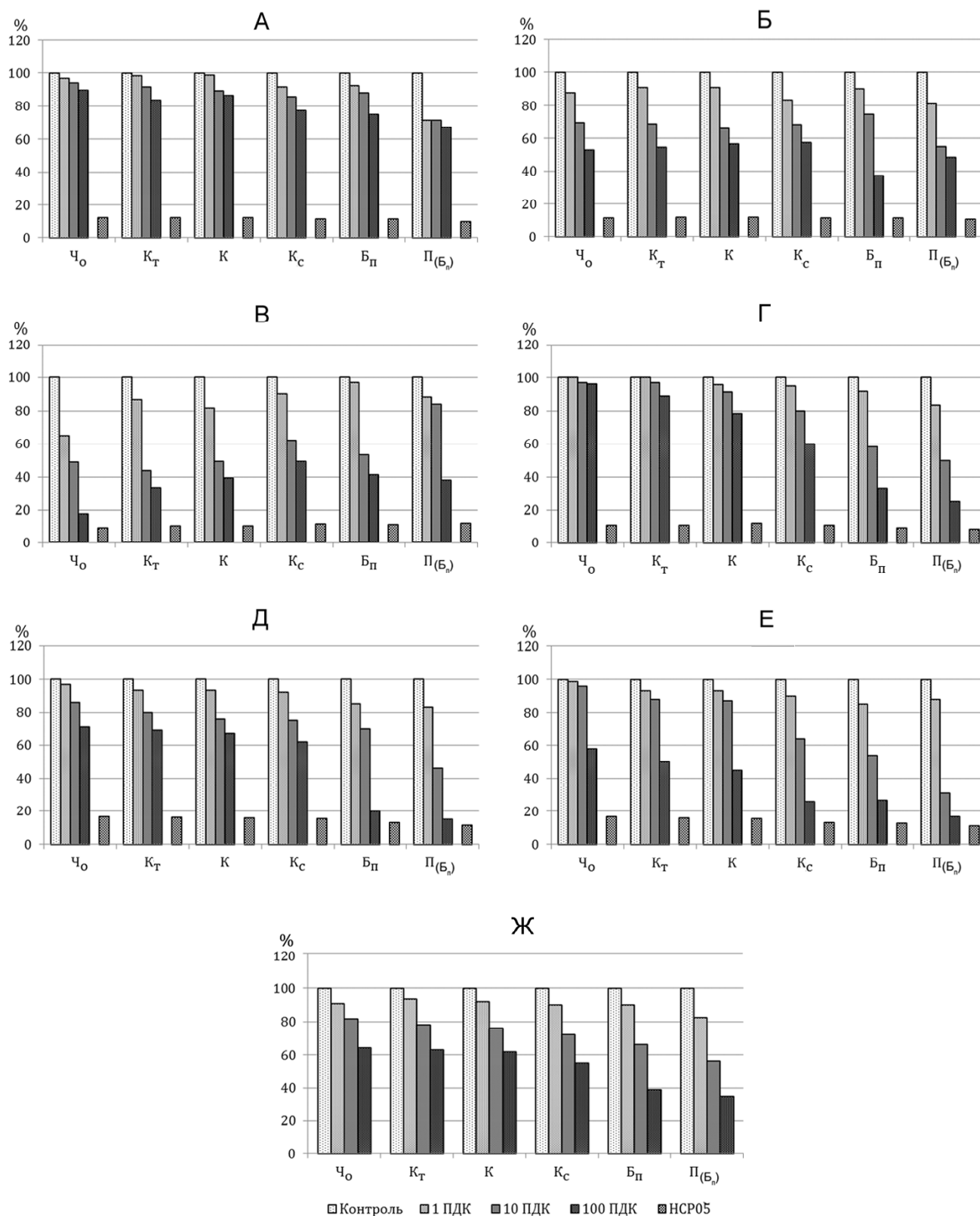


Рис. 1. Влияние загрязнения кадмием аридных почв Юга Европейской части России на биологические показатели, % от контроля: А – активность каталазы, Б – активность дегидрогеназ, В – общая численность бактерий, Г – обилие бактерий рода *Azotobacter*, Д – длина корней редиса, Е – целлюлолитическая активность, Ж – интегральный показатель биологического состояния (ИПБС), НСР – наименьшая существенная разность. Почва: Чo – черноземы обыкновенные, Кт – темно-каштановая, К – каштановая, Кс – светло-каштановая, Бп – бурая полупустынная, П(Бп) – песчаная

Fig. 1. The impact of cadmium pollution on the biological properties of arid soils in the South of the European part of Russia, % of control: A – Activity of catalase, Б – Activity of dehydrogenases, В – Total number of bacteria, Г – Abundance of *Azotobacter* bacteria, Д – Root length (phytotoxicity), Е – Cellulolytic activity, Ж – Integral indicator of the biological state of soil (IIBS), LSD – Least significant difference

Для светло-каштановых почв свойственен еще более легкий (среднесуглинистый) гранулометрический состав и еще меньшее содержание органического вещества (1,4%), и следовательно, еще более высокая подвижность кадмия.

Бурые полупустынные почвы имеют легкосуглинистый гранулометрический состав, более легкий, чем у всех каштановых почв, и более низкое содержание органического вещества (1,2%). Это обуславливает высокую подвижность кадмия в этих почвах.

Песчаные бурые полупустынные почвы отличаются самым легким из всех исследованных почв гранулометрическим составом – песчаным. И самым низким содержанием органического вещества (0,8%). В результате подвижность кадмия в этих почвах наибольшая. Соответственно, на них в наибольшей степени проявляются последствия загрязнения кадмием.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности и информативности использованных биологических показателей и целесообразности их применения для оценки устойчивости аридных почв к загрязнению кадмием.

Проведенное исследование позволило предложить региональные нормативы его предельно допустимого содержания в аридных почвах Юга Европейской части России на основе нарушения экологических и сельскохозяйственных функций почв.

Предыдущими исследованиями [Колесников и др., 2002] было установлено, что при химическом загрязнении почвы происходит нарушение ее экосистемных (биогеоценотических) функций. В зависимости от степени загрязнения в почве нарушаются либо все экосистемные функции, либо некоторые из них. Это зависит от концентрации загрязняющего вещества. При химическом загрязнении почвы нарушение (срыв) экосистемных функций происходит в определенной очередности. Первыми нарушаются информационные функции, затем – биохимические, физико-химические, химические и целостные, в последнюю очередь – физические. Установленную закономерность очередности целесообразно использовать при экологическом нормировании загрязнения почв. В качестве индикатора нарушения той или иной группы экосистемных функций почвы хорошо зарекомендовал себя интегральный показатель биологического состояния почвы. Как было установ-

лено ранее, при снижении ИПБС менее чем на 5%, нарушения экосистемных функций почвы не происходит. Уменьшение ИПБС на 5–10% диагностирует нарушение информационных функций, на 10–25% – биохимических, физико-химических, химических и целостных, более чем на 25% – физических [Колесников и др., 2002].

Целью экологического нормирования является предотвращение нарушения основных экосистемных функций почвы. Следовательно, снижение ИПБС более чем на 10% свидетельствует о серьезных нарушениях в функционировании почвы. Таким образом, концентрация загрязняющего почву вещества, которая вызывает снижение ИПБС почвы на 10%, может считаться рПДК этого вещества, превышение которой недопустимо.

Для расчета концентраций загрязняющего вещества, вызывающего снижение ИПБС почвы в той или иной степени, были рассчитаны уравнения регрессии, описывающие зависимость снижения значений ИПБС от содержания в почве кадмия (табл. 2). Уравнения регрессии позволяют рассчитать концентрации загрязняющего вещества (кадмия), вызывающие нарушение тех или иных групп экосистемных функций почвы.

По результатам исследования разработана схема экологического нормирования загрязнения аридных почв Юга Европейской части России кадмием (табл. 3). Региональная ПДК кадмия в черноземах обыкновенных (haplic chernozem) и темно-каштановых почвах (haplic kastanozems) составляет 3,0 мг/кг кадмия в почве, каштановых (haplic kastanozems) – 2,4 мг/кг, светло-каштановых (haplic kastanozems) – 1,9 мг/кг, бурых полупустынных (haplic calcisols) – 1,6 мг/кг, песчаных бурых полупустынных (calcaric arenosols) – 1,1 мг/кг. Разработанные рПДК могут быть использованы не только для аридных почв Юга Европейской части России, но и для аналогичных аридных почв других регионов мира.

По результатам исследования разработаны прогнозные картосхемы ухудшения биологического состояния аридных почв Юга Европейской части России при их загрязнении разными дозами кадмия: 3, 30 и 300 мг/кг (рис. 2). Например, если концентрация кадмия в черноземе обыкновенном составит 3 мг/кг, то его биологическое состояние, рассчитанное через ИПБС, ухудшится на 9%, 30 мг/кг – на 18%, 300 мг/кг – на 36% (табл. 4).

Таблица 2

Зависимость снижения значений ИПБС от содержания в почве кадмия

Почва	Уравнение регрессии
Черноземы обыкновенные (haplic chernozem)	$y = -5,213 \ln x + 96,339, R^2 = 1$
Темно-каштановые (haplic kastanozems)	$y = -5,652 \ln x + 96,858, R^2 = 1$
Каштановые (haplic kastanozems)	$y = -5,785 \ln x + 95,916, R^2 = 1$
Светло-каштановые (haplic kastanozems)	$y = -6,809 \ln x + 95,042, R^2 = 1$
Бурые полупустынные (haplic calcisols)	$y = -9,215 \ln x + 95,122, R^2 = 1$
Песчаные бурые полупустынные (calcaric arenosols)	$y = -9,877 \ln x + 91,407, R^2 = 1$

Таблица 3

Схема экологического нормирования загрязнения кадмием аридных почв Юга Европейской части России по степени нарушения экосистемных (биогеоценотических) функций почв

Почвы*	Незагрязненные	Слабозагрязненные	Среднезагрязненные	Сильнозагрязненные
Степень снижения ИПБС почвы**	<5%	5–10%	10–25%	>25%
Нарушаемые экосистемные функции***	–	Информационные	Химические, физико-химические, биохимические; целостные	Физические
Почва	Содержание кадмия в почве, мг/кг			
Черноземы обыкновенные (haplic chernozem)	<1,3	1,3–3	3–50	>50
Темно-каштановые (haplic kastanozems)	<1,3	1,3–3	3–40	>40
Каштановые (haplic kastanozems)	<1,1	1,1–2,4	2,4–30	>30
Светло-каштановые (haplic kastanozems)	<1	1–1,9	1,9–14	>14
Бурые полупустынные (haplic calcisols)	<1	1–1,6	1,6–6	>6
Песчаные бурые полупустынные (calcaric arenosols)	<0,8	0,8–1,1	1,1–4	>4

Примечание: * Классификация почв по [Колесников и др., 2002], ** Определение ИПБС почв по S.I. [Kolesnikov et al., 2019], *** Классификация экосистемных функций почвы по [Добровольский, Никитин, 2006].

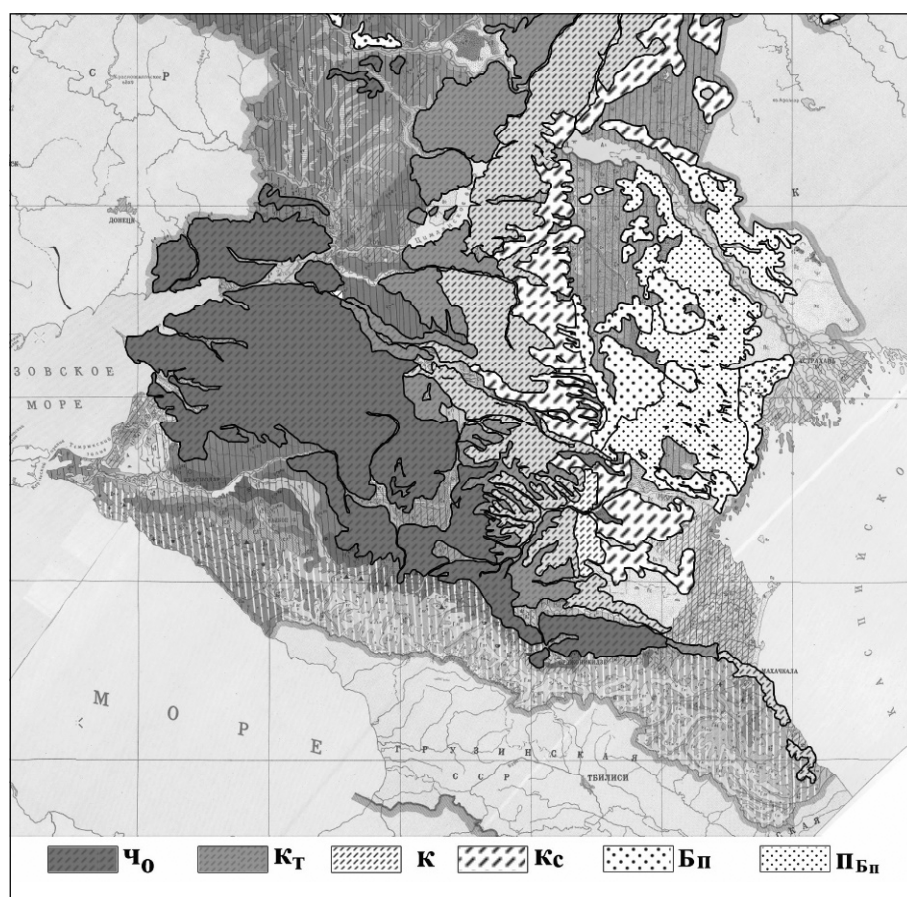


Рис. 2. Прогнозная картограмма степени ухудшения биологического состояния (в %) аридных почв Юга Европейской части России при их загрязнении 1, 10 и 100 ПДК кадмия (3, 30 и 300 мг/кг, соответственно). Почва: Ч₀ – черноземы обыкновенные, К_т – темно-каштановая, К – каштановая, К_с – светло-каштановая, Б_п – бурая полупустынная, П_{бп} – песчаная

Fig. 2. Cartogram of predicted degree of deterioration (%) of the biological state of arid soils in the South of the European part of Russia if contaminated by 1, 10 and 100 MPC cadmium (3, 30 and 300 mg/kg, respectively)

Таблица 4

Ухудшение биологического состояния (в %) аридных почв Юга Европейской части России при их загрязнении 1, 10 и 100 ПДК кадмия

Почва	Доза загрязнения кадмием		
	1 ПДК (3 мг/кг)	10 ПДК (30 мг/кг)	100 ПДК (300 мг/кг)
Черноземы обыкновенные	9	18	36
Темно-каштановые	6	22	37
Каштановая	8	24	38
Светло-каштановая	10	28	45
Буряя полупустынная	10	34	61
Песчаная	17	44	65

Выводы:

– аридные почвы Юга Европейской части России проявили разную устойчивость к загрязнению кадмием. Был получен следующий ряд почв по мере снижения их устойчивости к загрязнению: черноземы обыкновенные (haplic chernozem) (79) ≥ темно-каштановые (haplic kastanozems) (78) ≥ каштановые (haplic kastanozems) (77) ≥ светло-каштановые (haplic kastanozems) (73) > бурые полупустынные (haplic calcisols) (65) > песчаные бурые полупустынные (arenosols calcaric) (58). Чем тяжелее гранулометрический состав и больше органического вещества в исследованных почвах, тем сильнее связываются металлы и меньше проявляют токсичность.

– разработаны региональные предельно допустимые концентрации (рПДК) кадмия в аридных поч-

вах Юга Европейской части России на основе нарушения их экосистемных функций. Региональная ПДК кадмия для черноземов обыкновенных (haplic chernozem) и темно-каштановых почв (haplic kastanozems) составляет 3,0 мг/кг кадмия в почве, каштановых (haplic kastanozems) – 2,4 мг/кг, светло-каштановых (haplic kastanozems) – 1,9 мг/кг, бурых полупустынных (haplic calcisols) – 1,6 мг/кг, песчаных бурых полупустынных (arenosols calcaric) – 1,1 мг/кг. Разработанные рПДК могут быть использованы для нормирования содержания кадмия в аридных почвах других регионов мира.

– разработаны прогнозные картосхемы степени ухудшения биологического состояния аридных почв Юга России при их загрязнении разными дозами кадмия.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания (Южный федеральный университет, проект № 0852-2020-0029) и государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант Президента РФ НШ-2511.2020.11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы / Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. М., 2009. 10 с.

Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учебник об экологических функциях почв. М.: Наука, 2006. 362 с.

Дьяченко В.В., Матасова И.Ю. Региональные кларки химических элементов в почвах европейской части юга России // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1159–1166.

Казеев К.Ш., Колесников С.И. Атлас почв Азово-Черноморского бассейна. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. 80 с.

Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. 356 с.

Колесников С.И., Жаркова М.Г., Самохвалова Л.С., Кутузова И.В., Налета Е.В., Зубков Д.А., Казеев К.Ш. Оценка экологичности тяжелых металлов и нефти по биологическим показателям чернозема // Экология. 2014. № 3. С. 163–173.

Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на эколого-биологические свойства чернозема обыкновенного // Экология. 2000. № 3. С. 193–201.

Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами // Почвоведение. 2002. № 12. С. 1509–1514.

Колесников С.И., Тлехас З.Р., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Изменение биологических свойств почв Адыгеи при химическом загрязнении // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1499–1505.

Колесников С.И., Ярославцев М.В., Спивакова Н.А., Казеев К.Ш. Сравнительная оценка устойчивости биологических свойств разных подтипов черноземов юга России к загрязнению Cr, Cu, Ni, Pb (в модельном эксперименте) // Почвоведение. 2013. № 2. С. 195–200.

Национальный атлас почв Российской Федерации // С.А. Шоба, Г.В. Добровольский, И.О. Алябина и др. М.: АСТ, 2011. 632 с.

Отчет о научно-производственной деятельности за 2016 год ФГБУ «ГЦАС «Астраханский»: отчет НИР. Астрахань: ФГБУ «ГЦАС «Астраханский», 2016.

Asgher M., Khan M.I.R., Anjum N.A., Khan N.A. Minimizing toxicity of cadmium in plants – role of plant growth regulators. *Protoplasma*, 2015, vol. 252, p. 399–413.

Bro-Rasmussen F. Contamination by persistent chemicals in food chain and human health. *Sci. Total Environ*, 1996, vol. 188, p. 45–60. DOI: 10.1016/0048-9697(96)05276-X.

Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants From Physiology to Remediation. Hasanuzzaman M., Majeti Narasimha V.P., Masayuki F. (Eds.), Elsevier, 2019, p. 163–183. DOI: 10.1016/C2017-0-02050-5.

Campbell P.G.C. Cadmium-A priority pollutant. *Environmental Chemistry*, 2006, vol. 3, no. 6, p. 387–388.

Davidson N.C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Mar. Freshw. Res.*, 2014, vol. 65, p. 934–941.

Felix-Henningsen P., Urushadze T.F., Narimannidze E.I., Wichmann L., Steffens D., Kalandadze B. Heavy metal pollution of soils and food crops due to mining wastes in an irrigation district south of Tbilisi, eastern Georgia. *Annals of Agrarian Science*, 2007, vol. 5, no. 3, p. 11–27.

Goering P.L., Waalkes M.P., Klaassen C.D. Handbook of experimental pharmacology, vol. 115. *Toxicology of Metals, Biochemical Effects*. Goyer R.A., Cherian M.G. (Eds.). Springer, New York, 1994, p. 189–214.

Greed I.F., Lane C.R., Serran J.N., Alexander L.C., McLaughlin D.L., Raanan-Kiperwas H., Rains M.C., Rains K.C., Smith L. Enhancing protection for vulnerable waters. *Nat. Geosci.*, 2017, vol. 10, no. 11, p. 809–815.

Guidelines for Drinking-water Quality, 4th Edition Incorporating the First Addendum. World Health Organization (WHO), Geneva (License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO), 2017.

Hu Y., Nan Z. Soil Contamination in Arid Region of Northwest China: Status Mechanism and Mitigation. *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China*. Luo Y., Tu C. (Eds.). Springer, Singapore, 2018, p. 365–374.

Jackson T., Macgillivray A. Accounting for cadmium: tracking emissions of cadmium from the global economy. *Chem. Ecol.*, 1995, vol. 11, no. 3, p. 137–181. DOI: 10.1080/02757549508039067.

Jarup L. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.*, 2003, vol. 68, no. 1, p. 167–182.

Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010, 548 p.

Khan M.A., Khan S., Khan A., Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 601, p. 1591–1605.

Kingsford R.T., Bassett A., Jackson L. Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst.*, 2016, vol. 26, p. 892–916.

Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, p. 191–544.

Menéndez-Serra M., Triadó-Margarit X., Castañeda C., Herrero J., Casamayor O.E. Microbial composition, potential functional roles and genetic novelty in gypsum-rich and hypersaline soils of Monegros and Gallocanta (Spain). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 650, no. 1, p. 343–353.

Nan Z.R., Liu X.W., Zhao Z.J., Wang S.L., Yang Y.M., Wang Z.W. Chemical behavior and ecological risk assessment of heavy metals in arid oasis region. Chinese Environmental Science Press, Beijing, 2011.

Pan J., Plant J.A., Voulvoulis N., Oates C.J., Ihlenfeld C. Cadmium levels in Europe: implications for human health. *Environ. Geochem. Health*, 2010, vol. 32, no. 1, p. 1–12.

Sidhu G.P.S., Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K. Tolerance and hyperaccumulation of cadmium by a wild, unpalatable herb *Coronopus didymus* (L.) Sm. (Brassicaceae). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2017a, vol. 135, p. 209–215.

Tang X., Li Q., Wu M., Lin L., Scholz M. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China. *J. Environ. Manag.*, 2016, vol. 181, p. 646–662.

Tudoreanu L., Phillips C.J.C. Modelling cadmium uptake and accumulation in plants. *Adv. Agron*, 2004, vol. 84, p. 121–157.

Wagner G.J. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron*, 1993, vol. 51, p. 173–212. World Reference Base for Soil Resources. FAO, Rome, 2006, 128 p.

Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, Article ID 402647, 20 p. DOI: 10.5402/2011/402647.

Поступила в редакцию 06.05.19

После доработки 10.05.2020

Принята к публикации 25.08.2020

R.M. Daoud^{1,2}, S.I. Kolesnikov³, A.A. Kuzina⁴, T.V. Minnikova⁵,
K.Sh. Kazeev⁶, D.H. Nguet⁷, H.K. Dang^{8,9}

ASSESSMENT OF THE CADMIUM POLLUTION RESISTANCE OF ARID SOILS IN THE SOUTH OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA USING BIOLOGICAL INDICATORS

Arid soils perform important ecological functions, primarily maintaining biodiversity and sustainability of the biosphere. Cadmium is among the priority pollutants for arid soils. The arid soils of the South of the European part of Russia differ in their resistance to cadmium pollution and form the following sequence (the soils are arranged in the descending order of their resistance): ordinary chernozems (haplic chernozem) ≥ dark brown (haplic kastanozems) ≥ chestnut (haplic kastanozems) ≥ light chestnut (haplic

¹ Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Russia

² University of Tishreen, Syria, postgraduate student; e-mail: ramadaoud91@yahoo.com

³ Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Professor, Head of the Department of Ecology and Nature Management, D.Sc. in Agriculture; e-mail: kolesnikov@sfedu.ru

⁴ Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; e-mail: nyuta_1990@mail.ru

⁵ Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Senior Scientific Researcher, PhD. in Biology; e-mail: loko261008@yandex.ru

⁶ Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: kamil_kazeev@mail.ru

⁷ Vietnam-Russian Tropical Center, Institute of Tropical Ecology, Director, Associate Professor, PhD in Geography; e-mail: danghoi110@gmail.com

⁸ Southern Federal University, D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Department of Ecology and Environmental Management, Russia

⁹ Vietnam-Russian Tropical Center, Institute of Tropical Ecology, postgraduate student; e-mail: danghungcuong@gmail.com

kastanozems)> brown semi-desert (haplic calcisols)> sandy (calcaric arenosols). The heavier the particle size and the higher the organic matter content in studied soils, the more bound and less toxic the metals are. Also, regional maximum permissible concentrations (rMPC) of cadmium in arid soils of the south of the European part of Russia were suggested basing on the violation of their ecosystem functions. Regional MPC of cadmium for ordinary chernozem (haplic chernozem) and dark chestnut soils (haplic kastanozems) is 3,0 mg/kg of soil, 2,4 mg/kg for chestnut (kastanozems haplic), 1,9 mg/kg for light chestnut (haplic kastanozems), 1,6 mg/kg for brown semi-desert (haplic calcisols), and 1,1 mg/kg for sandy brown semi-desert (calcaric arenosols). The developed rMPC can be used to standardize cadmium content in arid soils of other regions of the world. Also, prognostic maps of the degree of deterioration of the biological state of arid soils under different levels of cadmium pollution have been compiled for southern Russia.

Key words: chestnut soils, brown semi-desert soils, biotesting, standardization, forecasting, regional maximum allowable concentrations

Acknowledgements. The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a state assignment (Southern Federal University, project No. 0852-2020-0029) and state support of the leading scientific schools of the Russian Federation (grant of the President of the Russian Federation NSh-2511.2020.11).

REFERENCES

- Asgher M., Khan M.I.R., Anjum N.A., Khan N.A. Minimising toxicity of cadmium in plants—role of plant growth regulators. *Protoplasma*, 2015, vol. 252, p. 399–413.
- Bro-Rasmussen F. Contamination by persistent chemicals in food chain and human health. *Sci. Total Environ.*, 1996, vol. 188, p. 45–60. DOI: 10.1016/0048-9697(96)05276-X.
- Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants From Physiology to Remediation. Hasanuzzaman M., Majeti Narasimha V.P., Masayuki F. (Eds.), Elsevier, 2019, p. 163–183. DOI: 10.1016/C2017-0-02050-5.
- Campbell P.G.C. Cadmium—A priority pollutant, *Environmental Chemistry*, 2006, vol. 3, no. 6, p. 387–388.
- Davidson N.C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Mar. Freshw. Res.*, 2014, vol. 65, p. 934–941.
- Dobrovolskij G.V., Nikitin E.D. *Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv* [Soil ecology. The doctrine of the ecological functions of soils] Moscow, Nauka Publ., 2006, 362 p. (In Russian)
- D'yachenko V.V., Matasova I.Yu. Regional clarkes of chemical elements in soils of southern European Russia. *Eurasian Soil Science*, 2016, vol. 49, no. 10, p. 1091–1098.
- Felix-Henningsen P., Urushadze T.F., Narimannidze E.I., Wichmann L., Steffens D., Kalandadze B. Heavy metal pollution of soils and food crops due to mining wastes in an irrigation district south of Tbilisi, eastern Georgia *Annals of Agrarian Science*, 2007, vol. 5, no. 3, p. 11–27.
- Goering P.L., Waalkes M.P., Klaassen C.D. Handbook of experimental pharmacology, vol. 115. *Toxicology of Metals, Biochemical Effects*. Goyer R.A., Cherian M.G. (Eds.), Springer, New York, 1994, p. 189–214.
- Greed I.F., Lane C.R., Serran J.N., Alexander L.C., McLaughlin D.L., Raanan-Kiperwas H., Rains M.C., Rains K.C., Smith L. Enhancing protection for vulnerable waters. *Nat. Geosci.*, 2017, vol. 10, no. 11, p. 809–815.
- Hu Y., Nan Z. Soil Contamination in Arid Region of Northwest China: Status Mechanism and Mitigation. *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China*. Luo Y., Tu C. (Eds.), Springer, Singapore, 2018, p. 365–374.
- Hygienic Standard 2.1.7.2511-09. Approximate permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil: *Hygienic standards*. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rosпотребнадзор, 2009, 10 p.
- Jackson T., Macgillivray A. Accounting for cadmium: tracking emissions of cadmium from the global economy. *Chem. Ecol.*, 1995, vol. 11, no. 3, p. 137–181. DOI: 10.1080/02757549508039067.
- Jarup L. Hazards of heavy metal contamination. *Br. Med. Bull.*, 2003, vol. 68, no. 1, p. 167–182.
- Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th Edition. Boca Raton, FL: Crc Press, 2010, 548 p.
- Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. *Atlas pochv Azovo-Chernomorskogo bassejna*. [Atlas of the soils of the Azov-Black Sea basin]. Rostov-on-Don, Publishing House of the Southern Federal University, 2015, 80 p. (In Russian)
- Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem*. [Methods of bio-diagnostics of terrestrial ecosystems]. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2016, 356 p.
- Khan M.A., Khan S., Khan A., Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 601, p. 1591–1605.
- Kingsford R.T., Basset A., Jackson L. Wetlands: conservation's poor cousins. *Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst.*, 2016, vol. 26, pp. 892–916.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.S., Akimenko Y.V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, p. 191–544.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F. Effects of Heavy Metal Pollution on the Ecological and Biological Characteristics of Common Chernozem. *Russian Journal of Ecology*, 2000, vol. 31(3), p. 174–181.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. Ecological Functions of Soils and the Effect of Contamination with Heavy Metals *Eurasian Soil Science*, 2002, no. 12, p. 1335–1340.
- Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Val'kov V.F., Tlekhas Z.R. Chemical Contamination of Adygea Soils and Changes in Their Biological Properties. *Eurasian Soil Science*, 2009, vol. 42, no. 12, pp. 1397–1403.
- Kolesnikov S.I., Yaroslavl'tsev M.V., Spivakova N.A. Kazeev K.Sh. Comparative Assessment of the Biological Tolerance of Chernozems in the South of Russia towards Contamination with Cr, Cu, Ni, and Pb in a Model Experiment. *Eurasian Soil Science*, 2013, vol. 46, no. 2, pp. 176–181.
- Kolesnikov S.I., Zharkova M.G., Kazeev K.Sh., Kutuzova I.V., Samokhvalova L.S., Naleta E.V., Zubkov D.A. Ecotoxicity Assessment of Heavy Metals and Crude Oil Based on Biological Characteristics of Chernozem. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 3, pp. 157–166.
- Menéndez-Serra M., Triadó-Margarit X., Castañeda C., Herrero J., Casamayor O.E. Microbial composition, potential functional roles and genetic novelty in gypsum-rich and hypersaline

soils of Monegros and Gallocanta (Spain). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 650, no. 1, p. 343–353.

Nacional'nyj atlas pochvy Rossijskoj Federacii [National Atlas of Soils of the Russian Federation]. S.A. Shoba, G.V. Dobrovol'skij, I.O. Alyabin et al., Moscow, AST Publ., 2011, 632 p. (In Russian)

Nan Z.R., Liu X.W., Zhao Z.J., Wang S.L., Yang Y.M., Wang Z.W. *Chemical behavior and ecological risk assessment of heavy metals in arid oasis region*. Chinese Environmental Science Press, Beijing, 2011.

Otchet o nauchno-proizvodstvennoj deyatel'nosti za 2016 god FGBU «GCAS «Astrahanskij»: otchet NIR [Report on research and production activities for 2016, FSBI «GTSAS «Astrakhansky»: research report] Astrakhan: FGBU «GTSAS «Astrakhansky», 2016. (In Russian)

Pan J., Plant J.A., Voulvoulis N., Oates C.J., Ihlenfeld C. Cadmium levels in Europe: implications for human health. *Environ. Geochem. Health*, 2010, vol. 32, no. 1, p. 1–12.

Sidhu G.P.S., Singh H.P., Batish D.R., Kohli R.K. Tolerance and hyperaccumulation of cadmium by a wild, unpalatable herb

Coronopus didymus (L.) Sm. (Brassicaceae). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2017a, vol. 135, p. 209–215.

Tang X., Li Q., Wu M., Lin L., Scholz M. Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China. *J. Environ. Manag.*, 2016, vol. 181, p. 646–662.

Tudoreanu L., Phillips C.J.C. Modelling cadmium uptake and accumulation in plants. *Adv. Agron.*, 2004, vol. 84, p. 121–157.

Wagner G.J. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Adv. Agron.*, 1993, vol. 51, p. 173–212.

WHO, 2017. *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th Edition Incorporating the First Addendum. World Health Organization, Geneva (License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO).

World Reference Base for Soil Resources. FAO, Rome, 2006, 128 pp.

Wuana R.A., Okieimen F.E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, Article ID 402647, 20 p. DOI: 10.5402/2011/402647.

Received 06.05.2019

Revised 10.05.2020

Accepted 25.08.2020