

ЭКОЛОГИЯ

Обзорная статья

УДК 631.453

doi: 10.31774/2658-7890-2022-4-4-12-26

Оценка возможности возделывания сельскохозяйственных культур при загрязнении почв тяжелыми металлами

Александр Николаевич Бабичев¹, Рита Евгеньевна Юркова²,
Лидия Михайловна Докучаева³

^{1, 2, 3}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация

¹babichevan2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1146-7530>

²rita6161@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8275-5834>

³dokuchaeva_lm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-7640>

Аннотация. Цель: оценить возможность возделывания сельскохозяйственных культур на почвах, загрязненных тяжелыми металлами. **Обсуждение.** Определена опасность накопления загрязняющих веществ в системе «почва – растения». Рассмотрены способы инактивации тяжелых металлов в почве путем улучшения ее свойств, повышения ее буферности. Возделывание сельскохозяйственных культур возможно на почвах, загрязненных тяжелыми металлами, но после оценки их содержания на участках. Земли допускаются к освоению при фоновых уровнях загрязнения тяжелыми металлами и нейтральной реакции почвенной среды, но при применении апробированных систем удобрений. На почвах с наличием тяжелых металлов в границах предельно допустимых концентраций (ПДК) следует проводить комплексные мероприятия в соответствии со свойствами почв, включающие химическую мелиорацию, внесение органических и минеральных удобрений, и включать в севообороты культуры, мало накапливающие элементы-загрязнители (бобовые, зерновые и технические культуры). Почвы, которые содержат тяжелые металлы выше ПДК и на которых невозможно получить доброкачественную продукцию, следует использовать для возделывания культур, продукция которых может быть применена в качестве сырья для промышленности (лен, хлопок и др.). **Выводы:** анализ научных источников показал, что на почвах, загрязненных тяжелыми металлами, возможно возделывание сельскохозяйственных культур, но следует придерживаться вышеизложенных положений.

Ключевые слова: оценка, сельскохозяйственные культуры, тяжелые металлы, загрязнение, свойства почв, предельно допустимая концентрация

Для цитирования: Бабичев А. Н., Юркова Р. Е., Докучаева Л. М. Оценка возможности возделывания сельскохозяйственных культур при загрязнении почв тяжелыми металлами // Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 4. С. 12–26. <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-4-12-26>.

ECOLOGY

Review article

Capability assessment of crop growing on soils contaminated with heavy metals

Alexandr N. Babichev¹, Rita Ye. Yurkova², Lidiya M. Dokuchayeva³

^{1, 2, 3}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹babichevan2006@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1146-7530>

²rita6161@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8275-5834>

³dokuchaeva_lm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4831-7640>

Abstract. Purpose: to assess the possibility of growing crops on soils contaminated with heavy metals. **Discussion.** The danger of pollutants accumulation in the “soil – plants” system is determined. The ways of inactivation of heavy metals in soil by improving its properties and increasing its buffering capacity are considered. Agricultural crop cultivation is possible on soils contaminated with heavy metals after assessing their content on the plots. Lands are allowed for development with background levels of contamination with heavy metals and a neutral reaction of the soil medium, but with the use of proven fertilizer systems. On soils with the heavy metals presence within the limits of maximum permissible concentrations (MPC), complex measures should be carried out in accordance with soil properties, including chemical reclamation, the organic and mineral fertilizers application and crops accumulating little pollutants (legumes, cereals and industrial crops) should be included in crop rotations. Soils that contain heavy metals above the MPC and on which it is impossible to obtain good-quality products should be used for cultivating crops which can be used as raw materials for industry (flax, cotton, etc.). **Conclusions:** the analysis of scientific sources showed that it is possible to grow crops on soil contaminated with heavy metals, but the above mentioned provisions should be followed.

Keywords: assessment, agricultural crops, heavy metals, contamination, soil properties, maximum allowable concentration

For citation: Babichev A. N., Yurkova R. Ye., Dokuchayeva L. M. Capability assessment of crop growing on soils contaminated with heavy metals. *Ecology and Water Management*. 2022;4(4):12–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2022-4-4-12-26>.

Введение. Особое место среди загрязнителей окружающей среды занимают тяжелые металлы (ТМ). По классификации Н. Реймерса, тяжелыми считаются металлы с плотностью более 8 г/см³ – Pb, Cu, Zn, Ni, Cd, Co, Sb, Sn, Bi, Hg [1]. Они относятся к наиболее распространенным и токсичным загрязняющим веществам (ЗВ) и могут вызывать онкологические, иммунологические и другие заболевания. В организм человека около 70 % ТМ поступает с продуктами питания.

На сельскохозяйственных угодьях высокие концентрации этих загрязнителей обнаруживаются в придорожных полосах до 200 м, а также на территориях, где применялись в качестве удобрений различные органические отходы. Также ТМ могут поступать в почву с пестицидами, гербицидами, удобрениями, промышленными выбросами и т. д. [2, 3]. Вместо улучшения пахотных земель возможно попадание в почву свинца, меди, висму-

та и других ТМ с некоторыми мелиорантами (отдельные структурообразователи почвы). Даже если ТМ находятся в них в допустимых концентрациях, обладая способностью аккумулироваться в почве, они могут достигать предельных значений и выше [4]. На таких полях содержание ТМ в почвах намного превышает фоновые значения, а в продукции возделываемых культур их концентрация достигает уровней выше максимально допустимых (МДУ). Известно, что цинк, свинец и кадмий наиболее доступны для растений, поэтому велики риски накопления этих элементов в опасных концентрациях в сельскохозяйственной продукции [5–10].

Отмечается, что увлечение осадками сточных вод в качестве дешевого удобрения также может привести к устойчивому загрязнению почв ТМ и накоплению их в продукции растениеводства [11]. Одним из источников загрязнения этими поллютантами могут быть и оросительные воды.

Накапливаясь в почве в больших количествах, ТМ способны изменять многие ее свойства [12]. Сильное загрязнение может привести к изменению даже таких консервативных признаков почвы, как гумусное состояние, структура, pH среды и др. [13].

Цель исследований – оценить возможность возделывания сельскохозяйственных культур на почвах, загрязненных ТМ.

Обсуждение. Концентрация ТМ в почве, а соответственно и в растениях, во многом зависит от ее физико-химических свойств. Накопление ТМ снижается в ряду почв от легкого гранулометрического состава (песчаные) к тяжелому (глинистые, суглинистые) почти в 1,5–2,5 раза. Это связано с тем, что такие элементы, как свинец, кадмий, цинк, медь, никель, адсорбируются на поверхности частиц глинистых минералов и становятся недоступными растениям.

ТМ прочно удерживаются органическим веществом, в частности, фульвокислотами. С увеличением количества гумуса в почве содержание ТМ в растениях уменьшается.

В кислых почвах в силу их повышенной миграционной способности доступность растениям увеличивается. Уменьшение кислотности почв способствует снижению перехода ТМ в растения.

Для того чтобы получать незагрязненную продукцию, необходимо:

- осуществлять мониторинг содержания ТМ на землях сельхозназначения и следить за качеством оросительной воды;
- проводить постоянно контроль за содержанием ТМ в выращиваемой продукции и кормах сельскохозяйственных животных.

При освоении земель для возделывания сельскохозяйственных культур рекомендуется проводить обследование экологического состояния почв для выявления степени их загрязнения токсичными элементами. В практике оценки загрязнения почв важен учет подвижных форм химических элементов, как наиболее доступных для растений, в соответствии с установленными предельно допустимыми концентрациями (ПДК) в почве и методами их оценки [14–16].

Степень загрязнения почв ТМ устанавливается путем сравнения с ПДК для подвижных форм соответствующего элемента в почве как наиболее мобильной части ТМ или его фоновым содержанием [15, 17].

При содержании ТМ выше ПДК в почве необходимо проведение комплекса специальных мероприятий, включающего подбор культур, агромериторативные и агрохимические мероприятия для снижения кислотности почв и регулирования рН почвенной среды, накопления органики в почве, обеспечения сбалансированного минерального питания растений [18, 19].

При правильном подборе культур, менее накапливающих ТМ, можно добиться двух- и трехкратного снижения концентрации ТМ в возделываемой продукции.

Растения разных видов обладают неодинаковой способностью накапливать ТМ. Наиболее высокое их накопление отмечено в овощах и силосных культурах. Мало ТМ поступает в бобовые, злаковые и технические

культуры. Наибольшее количество их накапливается в корнях, затем в стеблях, листьях и меньше всего в зерне [20–22]. Легко поглощаются и накапливаются такие элементы, как цинк, кадмий, марганец, молибден. Свинец, ртуть, хром накапливаются менее активно.

Для выращивания сельскохозяйственных культур на загрязненных землях в первую очередь необходимо нейтрализовать почвенную кислотность и повысить содержание гумуса. Затем разместить культуры, у которых в пищу идут части растений, слабо накапливающие ТМ (томаты, бахчевые, картофель). Если комплексное окультуривание загрязненных почв экономически нецелесообразно, на них следует разместить технические культуры.

Особенно опасно накопление ЗВ в культурах, продукция которых идет в пищу человека, например, зерновых. Исследования накопления ТМ зерном растений, растущих на различных типах почв, выявили, что в зерне пшеницы и ячменя, возделываемых на серой лесной почве, содержание их было намного выше, чем в зерне растений, выросших на черноземе выщелоченном. У овса выявлена противоположная зависимость. Эти данные свидетельствуют о том, что накопление ТМ зависит не только от видов растений, но и от типов почв. К тому же почвы, обладающие большей поглощательной способностью, более прочно удерживают ТМ, что сдерживает их поступление в растение [23].

Агромелиоративные мероприятия играют большую роль в снижении концентрации ТМ в почве. Снизить их поступление в растениеводческую продукцию из загрязненной почвы можно двумя способами:

- химическим – осаждением ионов ТМ при их реакции с элементами, входящими в состав ряда удобрений и мелиорантов, с образованием труднорастворимых веществ;
- физико-химическим – путем адсорбции их почвенно-поглощающим комплексом.

Цеолит, обладающий адсорбционными свойствами, снизил поступле-

ние кадмия в сено вико-овсяной смеси на 66 %, а содержание свинца уменьшилось в зерне ячменя на 69 % благодаря известняковой муке [24].

При загрязнении почв ТМ известкование существенно снижает содержание их в растениях. В то же время регулированием рН почвы не получается безопасная по санитарно-гигиеническим нормам продукция [25].

Большой инактивирующей способностью обладают компосты, содержащие мелиорирующую и удобрительную основы. Так, исследования на черноземах обыкновенных террасовых показали, что компост, приготовленный из птичьего помета (Пп), поглотил в первый год в слое почвы 0–20 см от 37,5 % Cu до 61,4 % Zn, а в последующие годы всего соответственно 3–8 %. Компост из Пп и глауконита (Гл) в первый год уменьшил содержание этих металлов на 19–33 %, во второй год – на 56–64 %, в третий год – на 65–68 %. Совместное внесение трех компонентов (Пп + фосфогипс (Ф) + Гл) привело к поглощению металлов в первый год от 50,8 до 70 %, во второй – 49,7–75 %, в третий год – 52–84 %. Продукция, полученная в этих вариантах, экологически чистая [26].

Соединение апатита, биоугля и органических удобрений в комбинированное средство и применение его для восстановления почвы, загрязненной ТМ, уменьшают перенос ТМ и изменяют структуру почвенного микробного сообщества [27].

Внесение навоза, цеолита и извести позволило снизить подвижность ТМ в светло-серой лесной почве [28]. При загрязнении почв кадмием лучший результат получен на фоне внесения извести (3 т/га) и навоза (40 т/га). Чтобы возделывать на загрязненных почвах сельскохозяйственные культуры, необходимо проводить на них мероприятия по накоплению гумуса, т. е. вносить органические удобрения, проводить сидерацию [29].

ТМ особенно прочно фиксируются верхним горизонтом, богатым гумусом. Важная роль в детоксикации ТМ принадлежит органическим удобрениям, которые с ними образуют органоминеральные соединения низкой

растворимости, недоступные растениям. На дерново-подзолистой почве применение двойной дозы (80 т/га) подстилочного навоза снизило в 2,4 раза содержание меди, в 4,6 раза – цинка и в 3 раза – свинца по сравнению с вариантом без навоза.

Большие дискуссии вызывает наличие ТМ в минеральных удобрениях, изготовленных из побочных продуктов промышленности, и органических удобрениях [30, 31]. Однако допустимые нормы присутствия ТМ из минеральных удобрений в почве значительно ниже предельно установленных. Особую озабоченность также вызывает наличие кадмия в больших количествах в фосфорных удобрениях и навозе. Навоз еще вызывает беспокойство потому, что 90 % кадмия, попадающего в организм животного, возвращается в органическое удобрение. Об ограниченном применении этих удобрений речи нет, так как при длительных исследованиях не отмечено опасного уровня накопления кадмия в почвах [32].

Другие исследования показывают, что кадмий, не накапливаясь в почве, поступает сразу в растение из-за его большой подвижности в кислой среде, поэтому в почвах следует регулировать pH среды [33, 34].

Минеральные удобрения по-разному влияют на содержание ТМ в почвах. Установлено, что применение минеральных удобрений в дозах, рассчитанных на планируемый урожай, не приводит к накоплению ТМ в почве. Кислые минеральные удобрения, изменяя кислотно-щелочные условия, способствуют увеличению подвижности ТМ, усиливая их доступность растениям [35].

Внесение минеральных удобрений в агроценозах Краснодарского края в рекомендуемых дозах обеспечивает получение экологически безопасной продукции [36]. На черноземах выщелоченных Воронежской области при длительном применении минеральных удобрений содержание ТМ остается в пределах допустимых уровней загрязнения [37].

Содержание цинка уменьшилось 1,4–3,0 раза при внесении удобрений.

Исследования показали, что при внесении органических и минеральных удобрений накопление ТМ в урожае сельскохозяйственных культур было весьма незначительным или обнаруживались лишь их следы [33]. Негативное воздействие ТМ возможно снизить использованием научно обоснованных средств химизации (мелиорантов, органических и минеральных удобрений).

Выводы. Возделывание сельскохозяйственных культур возможно на почвах, загрязненных ТМ, но после оценки их содержания на участках.

Земли допускаются к освоению при фоновых уровнях загрязнения ТМ и нейтральной реакции почвенной среды, но при применении апробированных систем удобрений.

На почвах с наличием ТМ в пределах ПДК следует проводить комплексные мероприятия в соответствии со свойствами почв, включающие химическую мелиорацию, внесение органических и минеральных удобрений, и включать в севообороты культуры, мало накапливающие элементы-загрязнители (бобовые, зерновые и технические культуры).

Почвы, которые содержат ТМ выше ПДК и на которых невозможно получить доброкачественную продукцию, следует использовать для возделывания культур, продукция которых может быть применена в качестве сырья для промышленности (лен, хлопок и др.).

Список источников

1. Реймерс Н. Ф. Азбука природы. Микроэнциклопедия биосферы. М.: Знание, 1980. 118 с.
2. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год / отв. ред. Г. М. Черногаева. М.: Росгидромет, 2022. 220 с.
3. Горшкова Е. «Тяжелый след»: подсчитана концентрация тяжелых металлов в почве после внесения агрохимикатов [Электронный ресурс]. 2021. URL: <https://www.agroxxi.ru/gazeta-zaschita-rastenii/zrast/-tjzhelyi-sled-podschitana-koncentracija-tjzhelyh-metallov-v-pochve-posle-vnesenija-agrohimikatov.html?ysclid=18oeixb715799322073> (дата обращения: 01.09.2022).
4. Справочник по оценке почв / В. Ф. Вальков, Н. В. Елисеев, И. И. Имгрунт, К. Ш. Казеев, С. И. Колесников. Майкоп: Адыгея, 2004. 236 с.
5. Нольфин Н. А., Солоненко М. А., Кучумова Н. С. Накопление тяжелых металлов в растениях в условиях экологически неблагоприятных территорий // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XX Междунар. науч.-практ. конф., г. Томск, 20–23 мая 2019 г. / ТПУ. Томск, 2019. С. 471–472.

6. Шагитова М. Н. Влияние высоких концентраций подвижных форм кадмия в почве на качество зерна яровой пшеницы // Охрана окружающей среды – основа безопасности страны: материалы междунар. науч. экол. конф., г. Краснодар, 29–31 марта 2022 г. / КубГАУ. Краснодар, 2022. С. 348–350.

7. Селюкова С. В. Тяжелые металлы в агроценозах // Достижения науки и техники АПК. Т. 38, № 8. 2020. С. 85–93. DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10815.

8. Барышникова О. С., Казьмина Е. А., Голикова К. Д. Анализ содержания тяжелых металлов в системе почва – растение // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2020. № 2. С. 22–26.

9. Иванов В. Б., Александрова В. В., Цыганова В. И. Оценка накопления тяжелых металлов в растениях // Глобальные проблемы научной цивилизации, пути совершенствования: материалы XV Науч.-практ. конф., 24 февр. 2022 г. Ставрополь: Параграф, 2022. С. 423–429.

10. Горобец С. Н. Экологическая оценка накопления тяжелых металлов в растениях // Научные достижения: теория, методология, практика: сб. науч. тр. по материалам XXXII Междунар. науч.-практ. конф., г. Анапа, 28 июня 2021 г. / Науч.-исслед. центр экон. и соц. процессов. Анапа, 2021. С. 138–141.

11. Kominko H., Gorazda K., Wzorek Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 305. 114417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114417>.

12. Сердюкова А. Ф., Барабанщиков Д. А. Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами // Молодой ученый. 2017. № 51(185). С. 131–135.

13. Рэуце К., Кырстя С. Борьба с загрязнением почвы / под ред. В. К. Штефана. М.: Агропромиздат, 1986. 221 с.

14. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» [Электронный ресурс]: постановление Гл. гос. санитар. врача РФ от 28 янв. 2021 г. № 3 (ред. от 14 февр. 2022 г.). Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

15. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Электронный ресурс]: постановление Гл. гос. санитар. врача РФ от 28 янв. 2021 г. № 2 (ред. от 14 февр. 2022 г.). Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

16. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

17. Руководство по контролю и регулированию почвенного плодородия орошаемых земель / В. Н. Щедрин, Г. Т. Балакай, Л. М. Докучаева, Р. Е. Юркова, О. Ю. Шалашова, Г. И. Табала; под ред. В. Н. Щедрина. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2017. 137 с.

18. Тихойкина И. М., Воронков А. С. К вопросу о способах детоксикации почв, загрязненных тяжелыми металлами // Природные ресурсы центрального региона России и их рациональное использование: материалы II Науч.-практ. конф., г. Орел, 14 нояб. 2018 г. / ОГУ им. И. С. Тургенева. Орел, 2019. С. 127–131.

19. Ильинский А. В. Исследования накопления тяжелых металлов в фитомассе однолетних трав при различных приемах агрохимической мелиорации // Евразийский союз ученых. 2021. № 5(86). С. 18–21. <https://doi.org/10.31618/10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.86.1385>.

20. Влияние ионов тяжелых металлов на рост и накопление биомассы растениями ячменя / А. С. Талыра, С. Г. Скугорева, А. В. Маркова, А. А. Камнева, Н. В. Кручинина, Т. Я. Ашихмина // Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XII Всерос. науч.-практ. конф., г. Киров, 13–14 апр. 2017 г. / ВятГУ. Киров, 2017. С. 154–158.

21. Переволоцкая Т. В., Анисимов В. С. Накопление тяжелых металлов растениями ячменя (зерно) в условиях техногенного загрязнения // Аграрная Россия. 2019. № 9. С. 34–40. DOI: 10.30906/1999-5636-2019-9-34-40.

22. Гайдукова Н. Г., Шабанова И. В., Перепелин М. А. К вопросу доступности тяжелых металлов озимой пшенице, выращиваемой на черноземе выщелоченном // Энтузиасты аграрной науки: сб. тр. по материалам всерос. науч. практ. конф., г. Краснодар, 5–6 сент. 2019 г. / КубГАУ. Краснодар, 2019. С. 181–185.

23. Котова Т. В. Содержание тяжелых металлов в зерновых культурах в зависимости от типа почв // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2008. № 6. С. 46–48.

24. Леднев А. В., Ложкин А. В., Пушкарева И. В. Реакция сельскохозяйственных культур, произрастающих на загрязненных тяжелыми металлами почвах, на внесение мелиорантов и удобрений // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29, № 6. С. 15–17.

25. Известкование почв, загрязненных тяжелыми металлами / А. Н. Небольсин, З. П. Небольсина, Ю. В. Алексеев, Л. В. Яковлева // Агрохимия. 2004. № 3. С. 48–54.

26. Юркова Р. Е., Долина Е. В. Эффективность органо-минеральных компостов при инаktivации тяжелых металлов в черноземах обыкновенных террасовых // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. ст. / ФГНУ «РосНИИПМ». Новочеркасск: Геликон, 2010. Вып. 43. С. 82–88.

27. Combined apatite, biochar, and organic fertilizer application for heavy metal contaminated soil remediation reduces heavy metal transport and alters soil microbial community structure / Y. Hong, D. Li, C. Xie, X. Zheng, J. Yin, Z. Li, K. Zhang, Y. Jiao, B. Wang, Y. Hu, Z. Zhu // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 851. 158033. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158033>.

28. Влияние известкования и органического удобрения на содержание свинца в сельскохозяйственных культурах / Л. А. Лебедева, С. Н. Лебедев, Н. Л. Елемская, Г. А. Графская // Агрохимия. 1998. № 3. С. 62–66.

29. Когут Б. М., Семенов В. М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 103–124. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>.

30. Алиева К. А. Влияние высоких доз аммиачной селитры на накопление тяжелых металлов в растениях томата // Здоровые почвы – гарант устойчивого развития: материалы науч.-практ. конф., г. Курск, 18–19 апр. 2022 г. / КГУ. Курск, 2022. С. 15–16.

31. Ямалтдинова В. Р., Васбиева М. Т., Фомин Д. С. Влияние систем удобрения на агрохимические показатели и накопление тяжелых металлов в почве и яровой пшенице (*Triticum aestivum* L.) // Проблемы агрохимии и экологии. 2020. № 3. С. 39–43. DOI: 10.26178/AE.2020.78.61.004.

32. Турекельдиева Р. Т. Накопление кадмия в почве с фосфорными удобрениями [Электронный ресурс]. URL: http://www.rusnauka.com/15_NPN_2013/Biologia/4_139195.doc.htm (дата обращения: 08.09.2022).

33. Влияние различных систем удобрения на накопление тяжелых металлов в сельскохозяйственной продукции / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Ф. В. Моисеенко, М. Г. Драганская // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2006. № 5. С. 22–29.

34. Носовская И. И., Соловьев Г. А., Егоров В. С. Влияние длительного систематического применения различных форм минеральных удобрений и навоза на накопление

в почве и хозяйственный баланс кадмия, свинца, никеля и хрома // *Агрохимия*. 2001. № 1. С. 82–91.

35. Дубовик Д. В., Дубовик Е. В. Влияние минеральных удобрений на содержание тяжелых металлов в почве на склонах // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016. № 4. С. 60–62.

36. Шхапацев А. К., Ашинов Ю. Н., Кононова Т. В. Агроэкологическая оценка систематического применения средств химизации в земледелии на накопление тяжелых металлов в почве // *Вестник АГУ*. 2018. № 2(221). С. 113–117.

37. Горбунова Н. С., Стулин А. Ф. Содержание тяжелых металлов при длительном применении удобрений в агроценозах кукурузы на черноземах выщелоченных // *Вестник ВГУ: химия, биология, фармация*. 2016. № 4. С. 49–54.

References

1. Reimers N.F., 1980. *Azbuka prirody. Mikroentsiklopediya biosfery* [The ABC of Nature. Microencyclopedia of the Biosphere]. Moscow, Znanie Publ., 118 p. (In Russian).

2. Chernogaev G.M., 2022. *Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2021 god* [Overview of the Environment State and Pollution in the Russian Federation for 2021]. Moscow, Rosgidromet, 220 p. (In Russian).

3. Gorshkova E., 2021. “Tyazhelyy sled”: *podschitana kontsentratsiya tyazhelykh metallov v pochve posle vneseniya agrokhimikatov* [“Heavy trace”: The concentration of heavy metals in soil was calculated after the agrochemicals application], available: <https://www.agroxxi.ru/gazeta-zaschita-rastenii/zrast/-tjzhelyi-sled-podschitana-koncentracija-tjzhelykh-metallov-v-pochve-posle-vneseniya-agrokhimikatov.html?ysclid=l8oeixb7l5799322073> [accessed 01.09.2022]. (In Russian).

4. Valkov V.F., Eliseev N.V., Imgrunt I.I., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., 2004. *Spravochnik po otsenke pochv* [Soil Assessment Guide]. Maykop, Adygeya Publ., 236 p. (In Russian).

5. Nolfin N.A., Solonenko M.A., Kuchumova N.S., 2019. *Nakoplenie tyazhelykh metallov v rasteniyakh v usloviyakh ekologicheskoi neblagopriyatnykh territoriy* [Heavy metals accumulation in plants on environmentally unfavorable territories]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke: materialy XX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Chemistry and Chemical Technology in the XXI Century: Proc. of the XX International Scientific-Practical Conf.]. Tomsk, TPU, pp. 471–472. (In Russian).

6. Shagitova M.N., 2022. *Vliyanie vysokikh kontsentratsiy podvizhnykh form kadmiya v pochve na kachestvo zerna yarovoy pshenitsy* [Influence of high concentrations of mobile forms of cadmium in soil on the spring wheat grain quality]. *Okhrana okruzhayushchey sredy – osnova bezopasnosti strany: materialy mezhdunar. nauchnoy ekologicheskoy konferentsii* [Environmental Conservation is the Basis of the Country’s Security: Proc. of the International Scientific Ecological Conference]. Krasnodar, KubGAU, pp. 348–350. (In Russian).

7. Selyukova S.V., 2020. *Tyazhelye metally v agrotsenozakh* [Heavy metals in agro-cenoses]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of APK], vol. 38, no. 8, pp. 85–93, DOI: 10.24411/0235-2451-2020-10815. (In Russian).

8. Baryshnikova O.S., Kazmina E.A., Golikova K.D., 2020. *Analiz sodержaniya tyazhelykh metallov v sisteme pochva – rastenie* [Analysis of the content of heavy metals in the soil-plant system]. *Modeli i tekhnologii prirodoobustroystva (regional'nyy aspekt)* [Models and Technologies of Environmental Management (Regional Aspect)], no. 2, pp. 22–26. (In Russian).

9. Ivanov V.B., Alexandrova V.V., Tsyganova V.I., 2022. *Otsenka nakopleniya tyazhelykh metallov v rasteniyakh* [Assessment of the heavy metals accumulation in plants]. *Global'nye problemy nauchnoy tsivilizatsii, puti sovershenstvovaniya: materialy XV Nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Global Problems of Scientific Civilization, Ways of Improvement: Proc. of the XV Scientific and Practical Conference]. Stavropol, Paragraph Publ., pp. 423–429. (In Russian).

10. Gorobets S.N., 2021. *Ekologicheskaya otsenka nakopleniya tyazhelykh metallov v rasteniyakh* [Environmental assessment of the accumulation of heavy metals in plants]. *Nauchnye dostizheniya: teoriya, metodologiya, praktika: sb. nauch. tr. po materialam XXXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Scientific Achievements: Theory, Methodology, Practice: Proc. of the XXXII International Scientific-Practical Conference]. Scientific Research Economic Center and Social Processes, Anapa, pp. 138-141. (In Russian).

11. Kominko H., Gorazda K., Wzorek Z., 2022. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. *Journal of Environmental Management*, vol. 305, 114417, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114417>.

12. Serdyukova A.F., Barabanshchikov D.A., 2017. *Posledstviya zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami* [Consequences of soil pollution with heavy metals]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], no. 51(185), pp. 131-135. (In Russian).

13. Reutse K., Kyrstya S., 1986. *Bor'ba s zagryazneniem pochvy* [Soil Pollution Control]. Moscow, Agropromizdat Publ., 221 p. (In Russian).

14. *Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 2.1.3684-21 "Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k sodержaniyu territoriy gorodskikh i sel'skikh poseleniy, k vodnym ob'ektam, pit'evoy vode i pit'evomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukhу, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy"* [On approval of sanitary rules and norms SanPiN 2.1.3684-21 "Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation production, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures"]. Resolution of Chief State Medical Officer of the Russian Federation of 28 Jan., 2021, no. 3, as amended on February 14, 2022. (In Russian).

15. *Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya"* [On approval of sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans"]. Resolution of Chief State Medical Officer of the Russian Federation of 28 Jan. 2021, no. 2, as amended on February 14, 2022. (In Russian).

16. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'kho-zugodiy i produktsii rastenievodstva* [Guidelines for Determination Heavy Metals in Agricultural Soils and Crop Production]. Moscow, TsINAO, 1992, 61 p. (In Russian).

17. Shchedrin V.N., Balakay G.T., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E., Shalashova O.Yu., Tabala G.I., 2017. *Rukovodstvo po kontrolyu i regulirovaniyu pochvennogo plodorodiya oroshaemykh zemel'* [Guidelines for the Control and Regulation of Soil Fertility of Irrigated Lands]. Novocherkassk, RosNIIPM, 137 p. (In Russian).

18. Tikhonkina I.M., Voronkov A.S., 2019. *K voprosu o sposobakh detoksikatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami* [On the issue of detoxification methods of soils contaminated with heavy metals]. *Prirodnye resursy tsentral'nogo regiona Rossii i ikh ratsional'noe ispol'zovanie: materialy II Nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Natural Resources of the Central Region of Russia and Their Rational Use: Proc. of II Scientific-Practical Conference]. OSU named after I.S. Turgenev, Orel, pp. 127-131. (In Russian).

19. Ilyinsky A.V., 2021. *Issledovaniya nakopleniya tyazhelykh metallov v fitomasse odnoletnikh trav pri razlichnykh priemakh agrokhimicheskoy melioratsii* [Study of the accumulation of heavy metals in the phytomass of annual herbs at various methods of agrochemical reclamation various methods of agrochemical reclamation]. *Evrasiyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], no. 5(86), pp. 18-21, <https://doi.org/10.31618/10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.86.1385>. (In Russian).

20. Talyara A.S., Skugoreva S.G., Markova A.V., Kamneva A.A., Kruchinina N.V., Ashikhmina T.Ya., 2017. *Vliyanie ionov tyazhelykh metallov na rost i nakoplenie biomassy rasteniyami yachmenya* [Effect of heavy metal ions on the growth and accumulation of barley plant biomass]. *Ekologiya rodnogo kraya: problemy i puti ikh resheniya: materialy XII Vseros. nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecology of the Native Land: Problems and Ways to Solve Them: Proc. of the XII All-Russian Scientific-Practical Conference]. Vyatka State University, Kirov, pp. 154-158. (In Russian).

21. Perevolotskaya T.V., Anisimov V.S., 2019. *Nakoplenie tyazhelykh metallov rasteniyami yachmenya (zerno) v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya* [Accumulation of heavy metals by barley plants (grain) under conditions of technogenic pollution]. *Agrarnaya Rossiya* [Agrarian Russia], no. 9, pp. 34-40, DOI: 10.30906/1999-5636-2019-9-34-40. (In Russian).

22. Gaidukova N.G., Shabanova I.V., Perepelin M.A., 2019. *K voprosu dostupnosti tyazhelykh metallov ozimoy pshenitse, vyrashchivaemoy na chernozeme vyshchelochennom* [On issue of heavy metals accessibility to winter wheat grown on leached chernozem]. *Entuziasty agrarnoy nauki: sb. tr. po materialam vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Enthusiasts of Agrarian Science: Proc. of the All-Russian Scientific Practical Conference]. KubGAU, Krasnodar, pp. 181-185. (In Russian).

23. Kotova T.V., 2008. *Soderzhanie tyazhelykh metallov v zernovykh kul'turakh v zavisimosti ot tipa pochv* [The content of heavy metals in grain crops depending on the type of soil]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bull. of Krasnoyarsk State Agrarian University], no. 6, pp. 46-48. (In Russian).

24. Lednev A.V., Lozhkin A.V., Pushkareva I.V., 2015. *Reaktsiya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur, proizrastayushchikh na zagryaznennykh tyazhelymi metallami pochvakh, na vnesenie meliorantov i udobreniy* [Response of crops growing on soils contaminated by heavy metals to application of ameliorants and fertilizers]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of the APK], vol. 29, no. 6, pp. 15-17. (In Russian).

25. Nebolsin A. N., Nebolsina Z. P., Alekseev Yu. V., Yakovleva L. V., 2004. *Izvestkovaniye pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami* [Liming of soils contaminated with heavy metals]. *Agrokimiya* [Agrochemistry], no. 3, pp. 48-54. (In Russian).

26. Yurkova R.E., Dolina E.V., 2010. *Effektivnost organo-mineralnykh kompostov pri inaktivatsii tyazhelykh metallov v chernozemakh obyknovennykh terrasovykh* [Efficiency of organo-mineral composts in the inactivation of heavy metals in ordinary terraced chernozems]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture]. Novocherkassk, Helikon Publ., iss. 43, pp. 82-88. (In Russian).

27. Hong Y., Li D., Xie C., Zheng X., Yin J., Li Z., Zhang K., Jiao Y., Wang B., Hu Y., Zhu Z., 2022. Combined apatite, biochar, and organic application fertilizer for heavy metal co-contaminated soil remediation reduces heavy metal transport and alters soil microbial community structure. *Science of the Total Environment*, vol. 851, 158033, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158033>.

28. Lebedeva L.A., Lebedev S.N., Elemskaya N.L., Grafskaya G.A., 1998. *Vliyanie izvestkovaniya i organicheskikh udobreniy na sodержание kadmiya v rasteniyakh* [Effect of liming and organic fertilizers on the content of cadmium in plants]. *Agrokimiya* [Agrochemistry], no. 3, pp. 62-66. (In Russian).

29. Kogut B.M., Semenov V.M., 2020. *Otsenka nasyshchennosti pochvy organicheskim uglerodom* [Estimation of soil saturation with organic carbon]. *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V. V. Dokuchaeva* [Bull. of Soil Institute named after V. V. Dokuchaev], iss. 102, pp. 103-124, <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-102-103-124>. (In Russian).

30. Alieva K.A., 2022. *Vliyanie vysokikh doz ammiachnoy selitry na nakoplenie tyazhelykh metallov v rasteniyakh tomata* [Influence of high doses of ammonium nitrate on the accumulation of heavy metals in tomato plants]. *Zdorovye pochvy – garant ustoychivogo razvitiya*:

materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Healthy Soils – a Guarantee of Sustainable Development: Proc. of Scientific Practical Conference]. Kursk, KSU, pp. 15-16. (In Russian).

31. Yamaltdinova V.R., Vasbieva M.T., Fomin D.S., 2020. *Vliyanie sistem udobreniya na agrokhimicheskie pokazateli i nakoplenie tyazhelykh metallov v pochve i yarovoy pshenitse (Triticum aestivum L.)* [Influence of fertilizer systems on agrochemical indicators and accumulation of heavy metals in soil and spring wheat (*Triticum aestivum L.*)]. *Problemy agrokhimii i ekologii* [Problems of Agrochemistry and Ecology], no. 3, pp. 39-43, DOI: 10.26178/AE.2020.78.61.004. (In Russian).

32. Turekeldieva R.T., 2022. *Nakoplenie kadmiya v pochve s fosfornymi udobreniyami* [Accumulation of cadmium in soil with phosphate fertilizers], available: http://www.rusnauka.com/15_NPN_2013/Biologia/4_139195.doc.htm [accessed 08.09.2022]. (In Russian).

33. Belous N.M., Shapovalov V.F., Moiseenko F.V., Draganskaya M.G., 2006. *Vliyanie razlichnykh sistem udobreniya na nakoplenie tyazhelykh metallov v sel'skokhozyaystvennoy produkcii* [Influence of various fertilizer systems on accumulation of heavy metals in agricultural products]. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bull. of Bryansk State Agricultural Academy], no. 5, pp. 22-29. (In Russian).

34. Nosovskaya I.I., Soloviev G.A., Egorov V.S., 2001. *Vliyanie dlitel'nogo sistematicheskogo primeneniya razlichnykh form mineral'nykh udobreniy i navoza na nakoplenie v pochve i khozyaystvennyy balans kadmiya, svintsa, nikelya i khroma* [Influence of long-term systematic application of various forms of mineral fertilizers and manure on the accumulation in the soil and the economic balance of cadmium, lead, nickel and chromium]. *Agrokhiimiya* [Agrochemistry], no. 1, pp. 82-91. (In Russian).

35. Dubovik D.V., Dubovik E.V., 2016. *Vliyanie mineral'nykh udobreniy na sodержание tyazhelykh metallov v pochve na sklonakh* [Influence of mineral fertilizers on the content of heavy metals in soil on slopes]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bull. of Kursk State Agricultural Academy], no. 4, pp. 60-62. (In Russian).

36. Shkhatpatsev A.K., Ashinov Yu.N., Kononova T.V., 2018. *Agroekologicheskaya otsenka sistematicheskogo primeneniya sredstv khimizatsii v zemledelii na nakoplenie tyazhelykh metallov v pochve* [Agri-environmental impact assessment of systematic application of chemicals in farming on accumulation of heavy metals in soil]. *Vestnik AGU* [Bull. of ASU], no. 2(221), pp. 113-117. (In Russian).

37. Gorbunova N.S., Stulin A.F., 2016. *Soderzhanie tyazhelykh metallov pri dlitel'nom primenenii udobreniy v agrotsenozakh kukuruzy na chernozemakh vyshchelochennykh* [The content of heavy metals during long-term application of fertilizers in corn agroecosystems on leached chernozem]. *Vestnik VGU: khimiya, biologiya, farmatsiya* [Bull. of VSU: Chemistry, Biology, Pharmacy], no. 4, pp. 49-54. (In Russian).

Информация об авторах

А. Н. Бабичев – ведущий научный сотрудник, доктор сельскохозяйственных наук;

Р. Е. Юркова – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук;

Л. М. Докучаева – ведущий научный сотрудник, кандидат сельскохозяйственных наук.

Information about the authors

A. N. Babichev – Leading Researcher, Doctor of Agricultural Sciences;

R. Ye. Yurkova – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences;

L. M. Dokuchayeva – Leading Researcher, Candidate of Agricultural Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

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

Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 4. С. 12–26.
Ecology and water management. 2022. Vol. 4, no. 4. P. 12–26.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.09.2022; одобрена после рецензирования 24.10.2022; принята к публикации 15.11.2022.

The article was submitted 30.09.2022; approved after reviewing 24.10.2022; accepted for publication 15.11.2022.