

Читать
онлайн
Read
online

Кузина А.А., Храпай Е.С., Колесников С.И., Минникова Т.В., Казеев К.Ш.

Определение экологически безопасной концентрации хрома в горно-луговой чернозёмовидной почве в окрестностях горнодобывающего предприятия

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. Хром (Cr) относится к наиболее токсичным тяжёлым металлам. Пульпа Урупского горно-обогатительного комбината (ГОК) содержит Cr в высоких концентрациях (до 1370 мг/кг), при этом ПДК Cr в почве (0,05 мг/кг) не согласуется с его естественным содержанием (до 130 мг/кг). Для оценки воздействия хвостохранилища Урупского ГОК на прилегающие горно-луговые чернозёмовидные почвы целесообразно определить экологически безопасное содержание Cr.

Материалы и методы. Моделировали загрязнение Cr (VI) горно-луговой чернозёмовидной почвы в лабораторных условиях. Хром вносили в почву в концентрациях 10; 25; 50; 100; 250; 500 мг/кг. Срок экспозиции модельного эксперимента составил 30 сут при постоянных показателях влажности и температуры. По окончании этого периода во всех образцах горно-луговой чернозёмовидной почвы были определены биологические показатели.

Результаты. Загрязнение Cr горно-луговой чернозёмовидной почвы приводит к угнетению показателей её биологической активности. Установлена обратная зависимость между концентрацией Cr и биологическими показателями почвы. Вблизи горнодобывающего предприятия экологически безопасной концентрацией Cr в горно-луговой чернозёмовидной почве следует считать 125 мг/кг.

Ограничения исследования. Экологически безопасные концентрации могут быть использованы как локальный экологический норматив содержания Cr в почве в районе горно-обогатительного комбината.

Заключение. Предложенная экологически безопасная концентрация Cr в горно-луговой чернозёмовидной почве может быть рекомендована к использованию в природоохранной, сельскохозяйственной и научной деятельности.

Ключевые слова: хром; загрязнение; Урупский горно-обогатительный комбинат; тяжёлые металлы; биотестирование; экосистемные функции почв; устойчивость почв; нормирование; прогнозирование; экологические нормативы

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Кузина А.А., Храпай Е.С., Колесников С.И., Минникова Т.В., Казеев К.Ш. Определение экологически безопасной концентрации хрома в горно-луговой чернозёмовидной почве в окрестностях горнодобывающего предприятия. *Гигиена и санитария*. 2025; 104(2): 146–150. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-2-146-150> <https://elibrary.ru/ffnhoo>

Для корреспонденции: Кузина Анна Андреевна, e-mail: nyuta_1990@mail.ru

Участие авторов: Кузина А.А. — сбор данных литературы, написание текста, редактирование; Храпай Е.С. — проведение лабораторных анализов, написание текста, редактирование; Колесников С.И. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Минникова Т.В., Казеев К.Ш. — сбор материала и обработка данных, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-74-01071, <https://rscf.ru/project/23-74-01071/> в Южном федеральном университете.

Поступила: 15.04.2024 / Поступила после доработки: 23.05.2024 / Принята к печати: 19.06.2024 / Опубликовано: 07.03.2025

Anna A. Kuzina, Ekaterina S. Khrapai, Sergey I. Kolesnikov, Tatiana V. Minnikova,
Kamil Sh. Kazeev

Determination of environmentally safe chromium concentration in mountain-meadow chernozem-likes soil in the vicinity of a mining enterprise

Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Chromium (Cr) is one of the most toxic heavy metals. The pulp of the Urup Mining and Processing Plant (MPP) contains a high concentration of Cr up to 1370 mg/kg. At the same time, the maximum permissible concentration of Cr in the soil (0.05 mg/kg) is not consistent with its natural content in the soil (up to 130 mg/kg). To assess the impact of the Urup MPP tailing dump on the adjacent mountain-meadow chernozem-likes soils, it is advisable to determine the environmentally safe Cr content.

Materials and methods. Cr (VI) contamination of mountain meadow chernozem soil was simulated in laboratory conditions. Chromium was introduced into the soil in concentrations 10, 25, 50, 100, 250, 500 mg/kg. The exposure period of the model experiment was 30 days while maintaining constant humidity and temperature. At the end of this period, in all samples of mountain meadow chernozem soil there were determined biological indicators: the number of soil bacteria, indicators of enzyme activity, root length and germination of radishes.

Results. Cr contamination of mountain-meadow chernozem-likes soil was found to lead to inhibition of biological parameters. An inverse relationship has been established between the Cr concentration and the biological parameters of the soil. In the vicinity of a mining enterprise in a mountain-meadow chernozem-likes soil, a concentration of 125 mg/kg should be taken as an environmentally safe Cr concentration.

Limitations. Environmentally safe concentrations can be used primarily as a local environmental standard for the Cr content in the soil in the area of the mining and processing plant.

Conclusion. The proposed environmentally safe concentration of Cr around a copper mining enterprise can be recommended for use by institutions in the field of environmental protection, agricultural and scientific activities.

Keywords: chromium; pollution; Urup Mining and Processing plant; heavy metals; biotesting; ecosystem functions of soils; soil stability; rationing; forecasting; environmental standards

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of the conclusion of the biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Kuzina A.A., Khrapai E.S., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Kazeev K.S. Determination of environmentally safe chromium concentration in mountain-meadow chernozem-like soil in the vicinity of a mining enterprise. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2025; 104(2): 146–150. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2025-104-2-146-150> <https://elibrary.ru/fnhoo> (In Russ.)

For correspondence: Anna A. Kuzina, e-mail: nyuta_1990@mail.ru

Contribution: Kuzina A.A. — collection of literature data, writing text, editing; Khrapai E.S. — laboratory analysis, writing text, editing; Kolesnikov S.I. — concept and design of research, writing text, editing; Minnikova T.V., Kazeev K.S. — collection material and data processing, editing. All authors — are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 23-74-01071, <https://rscf.ru/project/23-74-01071/> at the Southern Federal University.

Received: April 15, 2024 / Revised: May 23, 2024 / Accepted: June 19, 2024 / Published: March 7, 2025

Введение

Хром (Cr) относится к наиболее токсичным тяжёлым металлам, встречающимся в природе. Он широко используется в промышленных процессах [1], и в результате антропогенной деятельности за последние несколько десятилетий загрязнение наземных и водных экосистем, особенно шестивалентным Cr (VI), усилилось [2]. Хром угнетает прорастание семян, подавляет основные ферментативные процессы и снижает усвоение питательных веществ, скорость фотосинтеза, что в итоге нарушает процессы нормального роста и развития растений [3–6]. Присутствие Cr (VI) в почве вызывает окислительный дисбаланс и приводит к мутагенезу, снижает биомассу надземной и корневой частей растений, препятствует цветению, завязыванию плодов, ухудшает качество продовольственного зерна, снижает урожайность сельскохозяйственных культур [7]. Отмечается высокий канцерогенный риск для человека при загрязнении окружающей среды Cr (VI) [8–10].

Урупский горно-обогатительный комбинат (ГОК), крупнейшее предприятие обогащения медного колчедана на юге России, располагается в Карачаево-Черкесской Республике, в предгорьях Северного Кавказа. В рамках федерального проекта «Чистая страна» национального проекта «Экология» с 2019 по 2021 г. первая очередь хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината выведена из эксплуатации и рекультивирована. При этом деятельность комбината не останавливалась, а новое хвостохранилище было оборудовано в нескольких метрах от рекультивированного в русле р. Орловки [11]. Пульпа горнодобывающего предприятия содержит в высоких концентрациях Zn, Cu, Cr, Co, Ni, Pb, As, Sr, V и другие элементы [12]. Выбросы пыли и сточных вод как результат техногенной деятельности комбината неизбежно приводят к загрязнению окружающей среды, в том числе почвенного покрова. По нашим данным, концентрация Cr в пульпе Урупского ГОК достигает 1369,6 мг/кг. Удалённые от хвостохранилища участки фоновой почвы содержат Cr в концентрациях 109–118 мг/кг, а вблизи хвостохранилища — до 156 мг/кг. Превышение содержания Cr в почве около хвостохранилища по сравнению с фоном составляет 1,3–1,4 раза. По сравнению с цинком и медью это меньше в 14 и 10 раз соответственно, но больше концентраций других тяжёлых металлов. По показателю токсичности хром значительно превосходит указанные элементы [13], поэтому его содержание в горно-луговой чернозёмовидной почве вблизи хвостохранилищ Урупского ГОК требует мониторинга и нормирования — установления экологически безопасной концентрации.

В настоящее время экологически безопасные (допустимые) концентрации Cr в почве достоверно не определены. Существующие в Российской Федерации предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно до-

пустимые концентрации (ОДК) химических веществ направлены на защиту человека, так как основаны на санитарно-гигиеническом нормировании. При этом ПДК Cr в почве (0,05 мг/кг) не согласуется с его естественным содержанием (до 130 мг/кг). Для оценки воздействия хвостохранилища Урупского ГОК на прилегающие горно-луговые чернозёмовидные почвы целесообразно определить экологически безопасное содержание в ней Cr.

Цель работы — определение экологически безопасной концентрации Cr в горно-луговой чернозёмовидной почве в окрестностях горнодобывающего предприятия.

Материалы и методы

На территории, прилегающей к хвостохранилищу Урупского ГОК, расположены горно-луговые чернозёмовидные почвы (*Mollic Leptosols Eutric*) [14]. Образцы почв для модельного эксперимента отбирали на расстоянии 1 км в восточном направлении от хвостохранилища. На данном участке почвы не подвержены влиянию ГОК. Для закладки опыта отбирали верхний слой почвы, поскольку именно там аккумулируются все тяжёлые металлы. Горно-луговая чернозёмовидная почва имеет среднесуглинистый гранулометрический состав, содержание гумуса 12%, pH 6,9.

В лабораторных условиях подготовку почвы проводили по следующей методике: почву, отобранную в естественных условиях и высушенную до воздушно-сухого состояния, просеивали через сита с ячейками от 3 до 5 мм. Далее почву навески по 500 г помещали в пластиковые сосуды. Для эксперимента выбрана форма шестивалентного Cr (VI), так как установлено более токсичное его воздействие на живые организмы в сравнении с Cr (III) [16–18]. Следовательно, необходимо разрабатывать экологически безопасные концентрации по химической форме элемента, проявляющей наибольшее негативное воздействие на почву. Кроме того, Cr (VI) в отличие от других форм хорошо растворим и биодоступен [19]. В этом случае загрязнение почв Cr (III) в количестве, не превышающем экологически безопасной концентрации более токсичного Cr (VI), будет безопасным. Также установлено, что техногенное загрязнение почвы шестивалентным Cr встречается значительно чаще, чем трёхвалентным [20, 21]. Основная часть Cr, как и большинства тяжёлых металлов, поступает в почву в форме оксидов, поэтому загрязнение моделировали CrO₃ [15]: вносили в концентрациях 10; 25; 50; 100; 250; 500 мг/кг (по Cr). Повторность каждого варианта модельного эксперимента была трёхкратной. Срок экспозиции составил 30 сут при постоянной влажности (25%) и температуре (плюс 22 °C). Установлено, что в этот период тяжёлые металлы проявляют наибольшую токсичность, затем биологические показатели постепенно восстанавливаются [1, 22].

Таблица 1 / Table 1

Биологические параметры горно-луговой чернозёмовидной почвы при загрязнении хромом
Biological parameters of the mountain meadow chernozem soil with chromium contamination

Показатель Indicator	Концентрация хрома, мг/кг Chromium concentration, mg/kg							НСП ₀₅
	Фон Background	10	25	50	100	250	500	
Активность каталазы (мл O ₂ /г/мин) Catalase activity (ml O ₂ /g/min)	4.7	4.2	3.9	3.5	3.1	2.7	2.1	0.2
Активность дегидрогеназ (мг ТФФ/г/24 ч) Dehydrogenases activity (mg TPF/g/24 h)	11.5	9.3	8.6	7.8	6.3	5.9	4.9	0.7
Общая численность бактерий, млрд/г The total bacteria count, billion/g	4.1	3.9	3.4	3.2	2.9	2.1	1.7	0.3
Обилие бактерий рода <i>Azotobacter</i> , % комочков обрастания Abundance of bacteria of the genus <i>Azotobacter</i> , % of fouling lumps	52	47	43	39	35	30	25	3.8
Длина корней редиса, % от контроля Radish root length, % of control	2.6	2.3	2.1	2.0	1.8	1.6	1.1	0.2
Всхожесть редиса, % от контроля Radish germination, % of control	77.7	72	64	55	40	28	28	5.0

По окончании тридцатидневного периода во всех почвенных образцах определяли общепринятыми методами основные показатели биологического состояния, такие как активность каталазы и дегидрогеназ, общую численность бактерий, обилие бактерий рода *Azotobacter*, всхожесть и длину корней редиса [1].

Критерием степени нарушения экосистемных функций почвы служил интегральный показатель её биологического состояния (ИПБС), рассчитанный по формуле (1):

$$\text{ИПБС} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N}, \tag{1}$$

где X_1, X_2, X_3, X_n – процентное значение для каждого биологического параметра от контроля (100%); N – число показателей.

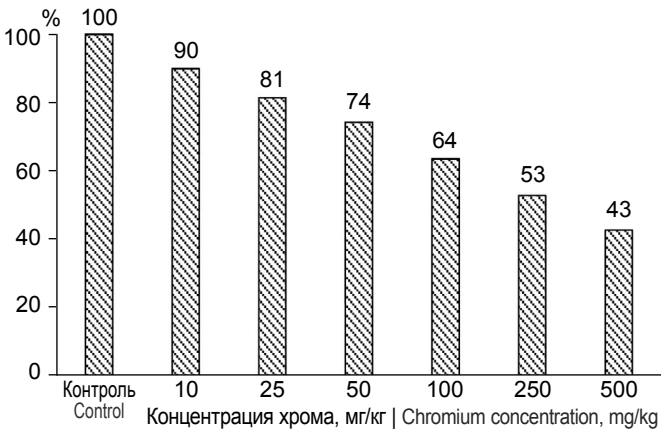
Обработку результатов выполняли в компьютерной программе Statistica 12.0.

Результаты

Установлено, что внесение Сг в исследованную почву приводит к угнетению биологических показателей (табл. 1). Ферментативная активность подавлялась уже при внесении 10 мг/кг Сг: активность каталазы снизилась на 11%, активность дегидрогеназ – на 19%. Дальнейшее повышение содержания Сг приводило к подавлению активности каталазы и дегидрогеназ при концентрации 25 мг/кг на 17 и 25%, при 50 мг/кг – на 26 и 32%, при 100 мг/кг – на 34 и 45%, при 250 мг/кг – на 43 и 49%, при 500 мг/кг – на 55 и 57% соответственно.

Обилие бактерий *Azotobacter* и общая численность бактерий статистически достоверно снизились при внесении Сг в концентрации 25 мг/кг на 16 и 17% соответственно. Увеличение концентрации Сг до 50 мг/кг привело к угнетению данных показателей на 21 и 25%, при 100 мг/кг – на 28 и 33%, при 250 мг/кг – на 48 и 42%, при 500 мг/кг – на 58 и 52% относительно фоновых значений.

Наряду с негативным влиянием на почвенную микрофлору Сг также оказывал ингибирующее действие на высшие растения. Эксперименты на редисе показали, что увеличение концентрации Сг в почве приводило к угнетению всхожести семян и уменьшению длины корней на 18% при концентрации Сг 25 мг/кг, на 29 и 22% соответственно при 50 мг/кг. При внесении Сг 100 мг/кг всхожесть редиса была ниже контроля на 49%, длина корней – на 29%. Увеличение концентрации хрома до 250 мг/кг и 500 мг/кг приводило к большему угнетению роста и развития растений (см. табл. 1). Ингибирование роста и развития растений при внесении



Изменение ИПБС почвы в районе горнодобывающего предприятия при загрязнении хромом, % от контроля.

The change in the IIBS of the soil in the copper mining enterprise with chromium contamination, % of the control.

Сг (VI) подтверждают и другие исследователи. Более 90% из 45 генотипов томатов (*Solanum lycopersicum*) продемонстрировали снижение и задержку прорастания в течение 14 дней при внесении 78 мг/л Сг (VI) [23].

Для обобщения полученных результатов на основании изученных биологических показателей определён ИПБС горно-луговой чернозёмовидной почвы для каждой вносимой концентрации (см. рисунок). На рисунке прослеживается обратная зависимость между дозой вносимого Сг и биологическими показателями почвы.

Обсуждение

Проведённое исследование позволило рассчитать экологически безопасную концентрацию Сг в горно-луговой чернозёмовидной почве вблизи Урупского горнодобывающего предприятия. В предыдущих исследованиях [1] было предложено использовать при экологическом нормировании содержания поллютантов в почве поэтапное нарушение её экосистемных функций по мере увеличения концентраций загрязняющих веществ. Критерием нарушения экосистемных функций может служить ИПБС исследуемой почвы.

По уравнению регрессии $y = 824,07x^{-0,469}$; $R^2 = 0,987$, отражающему зависимость между концентрацией Сг в почве и ИПБС, вычислены концентрации Сг, приводящие к сбою определённых групп экосистемных функций (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Экологическое нормирование содержания хрома в горно-луговой чернозёмовидной почве в окрестностях горнодобывающего предприятия по степени нарушения экосистемных функций**Ecological regulation of Cr content in mountain meadow chernozem soil in the vicinity of a mining enterprise according to the degree of disturbance of ecosystem functions**

Уровень загрязнения почв The level of soil pollution	Процент снижения ИПБС Percentage of decrease in Integral index of its biological state (IIBS)	Экосистемные функции почвы, нарушенные при данном загрязнении [24] Ecosystem functions of the soil disrupted by this pollution [24]	Содержание Cr в почве, мг/кг Cr content in the soil, mg/kg
Чистая почва / Clean soil	< 5	—	< 120
Низкий / Low	5–10	Информационные / Information	120–125
Высокий / High	10–25	Химические, физико-химические, биохимические; целостные Chemical, physico-chemical, biochemical; holistic	125–180
Катастрофический Catastrophic	> 25	Физические / Physical	> 180

Как видно из табл. 2, при содержании в горно-луговой чернозёмовидной почве Cr ниже 120 мг/кг её экологические функции не нарушены; концентрации Cr 120 мг/кг и более вызывают нарушения информационных экологических функций; концентрации 125 мг/кг и более приводят к сбою химических, физико-химических, биохимических почвенных функций. Превышение показателя 180 мг/кг ведёт к нарушению всех экосистемных функций горно-луговой чернозёмовидной почвы — как вышеупомянутых, так и физических.

Поскольку важнейшими экологическими функциями почвы, определяющими её плодородие, являются химические, физико-химические, биохимические и целостные, было предложено принять экологически безопасной концентрацию Cr, которая снижает ИПБС не более чем на 10% [25]. Таким образом, в горно-луговой чернозёмовидной почве экологически безопасной следует считать концентрацию Cr, равную 125 мг/кг, и не допускать её превышения.

Полученное значение экологически безопасной концентрации для Cr (VI) в горно-луговой чернозёмовидной почве (125 мг/кг) может быть использовано в качестве локального экологического норматива (локальной ПДК) содержания Cr в почве для территорий действующего и рекультивированного хвостохранилищ Урупского ГОК.

Заключение

Загрязнение Cr (VI) горно-луговой чернозёмовидной почвы приводит к угнетению её биологических показателей и экосистемных функций. Установлена обратная зависимость между концентрацией вносимого Cr и биологическими показателями почвы. Вблизи горнодобывающего предприятия в горно-луговой чернозёмовидной почве (*Mollic Leptosols Eutric*) экологически безопасной концентрацией Cr следует считать 125 мг/кг. Предложенная экологически безопасная концентрация Cr в районе горнодобывающего предприятия может быть рекомендована к использованию в сфере природоохранной, сельскохозяйственной и научной деятельности.

Литература

(п.п. 1–7, 10, 14–21, 23 см. References)

- Адриановский В.И., Липатов Г.Я., Кузьмина Е.А., Злыгостева Н.В. Смертность от злокачественных новообразований работающих в комплексной переработке отходов металлургии меди. *Гигиена и санитария*. 2020; 99(1): 32–6. <https://elibrary.ru/oonlkn>
- Ракитский В.Н., Юдина Т.В., Егорова М.В., Кутакова Н.С. Неинвазивные методы исследования влияния выбросов предприятий цветной металлургии на здоровье человека. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(12): 1192–5. <https://elibrary.ru/vxrztf>
- Минприроды КЧР. Нацпроект «Экология»: Федеральный проект «Чистая страна»; 2022. Доступно: https://oosvr09.ru/n_p/1045-federalnyy-proekt-chistaya-strana.html
- Храпай Е.С., Кузина А.А., Колесников С.И., Минникова Т.В., Казеев К.Ш. Оценка содержания тяжелых металлов в почве рекультивированного хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024; (4): 56–68. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_4_0_56 <https://elibrary.ru/admieq>
- Мощенко Д.И., Кузина А.А., Колесников С.И. Сравнительная оценка устойчивости черноземов Центрального Предкавказья и Кавказа к загрязнению свинцом, хромом, медью, никелем и нефтью. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020; 12(1): 75–87. <https://elibrary.ru/moctfc>
- Колесников С.И., Тимошенко А.Н., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Мясникова М.А. Оценка экотоксичности наночастиц меди, никеля и цинка по биологическим показателям чернозема. *Почвоведение*. 2019; (8): 986–92. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080094> <https://elibrary.ru/bwjkiis>
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. *Экология почв. Учение об экологических функциях почв*. М.: Наука; 2006.
- Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. *Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения*. Ростов-на-Дону: Ростиздат; 2006. <https://elibrary.ru/xippfxf>

References

- Kolesnikov S., Minnikova T., Kazeev K., Akimenko Y., Evstegneeva N. Assessment of the ecotoxicity of pollution by potentially toxic elements by biological indicators of haplic chernozem of Southern Russia (Rostov region). *Water Air Soil. Pollut.* 2022; 233(1): 18. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05496-3>
- Prasad S., Yadav K.K., Kumar S., Gupta N., Cabral-Pinto M.M.S., Rezania S., et al. Chromium contamination and effect on environmental health and its remediation: A sustainable approaches. *J. Environ. Manage.* 2021; 285: 112174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112174>
- Farid M., Ali S., Rizwan M., Ali Q., Saeed R., Nasir T., et al. Phyto-management of chromium contaminated soils through sunflower under exogenously applied 5-aminolevulinic acid. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; 151: 255–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.017>
- Ali S., Mir R.A., Tyagi A., Manzar N., Kashyap A.S., Mushtaq M., et al. Chromium toxicity in plants: signaling, mitigation, and future perspectives. *Plants (Basel)*. 2023; 12(7): 1502. <https://doi.org/10.3390/plants12071502>
- Ao M., Chen X., Deng T., Sun S., Tang Y., Morel J.L., et al. Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: A critical review. *J. Hazard Mater.* 2022; 424(Pt. A): 127233. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127233>
- Rath A., Das A.B. Chromium stress induced oxidative burst in Vigna mungo (L.) Hepper: physio-molecular and antioxidative enzymes regulation in cellular homeostasis. *Physiol. Mol. Biol. Plants*. 2021; 27(2): 265–79. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-00941-3>
- Stambulka U.Y., Bayliak M.M., Lushchak V.I. Chromium (VI) toxicity in legume plants: modulation effects of rhizobial symbiosis. *Biomed. Res. Int.* 2018; 2018: 8031213. <https://doi.org/10.1155/2018/8031213>
- Adrianovsky V.I., Lipatov G.Ya., Kuzmina E.A., Zlygosteva N.V. Mortality due to malignant tumors in workers employed in the complex processing of copper metallurgical waste. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99(1): 32–6. <https://elibrary.ru/oonlkn> (in Russian)

9. Rakitskii V.N., Yudina T.V., Egorova M.V., Kutakova N.S. Noninvasive methods for studying the influence of nonferrous metallurgy emissions on human health. *Gigiena i Sanitariia (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2017; 96(12): 1192–5. <https://elibrary.ru/vxrztf> (in Russian)
10. Hall A.L., Kromhout H., Schüz J., Peters S., Portengen L., Vermeulen R., et al. Laryngeal cancer risks in workers exposed to lung carcinogens: exposure-effect analyses using a quantitative job exposure matrix. *Epidemiology*. 2020; 31(1): 145–54. <https://doi.org/10.1097/ede.0000000000001120>
11. Ministry of Natural Resources of the KCR. National Project “Ecology”: Federal project “Clean Country”. Available at: https://oosvr09.ru/n_p/1045-federalnyy-proekt-chistaya-strana.html (in Russian)
12. Khrapai E.S., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Minnikova T.V., Kazeev K.Sh. Heavy metal content of soils at tailings pond after reclamation at Urup mining and processing plant. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2024; (4): 56–68. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_4_0_56 <https://elibrary.ru/admieq> (in Russian)
13. Moshchenko D.I., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I. Comparative assessment of the black soils sustainability in the central Caucasus and the Caucasus to pollution with lead, chromium, copper, nickel and oil. *Ustoichivoe razvitiye gornyykh territorii*. 2020; 12(1): 75–87. <https://elibrary.ru/moctfc> (in Russian)
14. IUSS Working Group. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna; 2022.
15. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4th ed. Boca Raton: Crc Press; 2010.
16. Wei Y., Usman M., Farooq M., Adeel M., Haider F.U., Pan Z., et al. Removing hexavalent chromium by nano zero-valent iron loaded on attapulgite. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022; 233(2): 48. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05513-z>
17. Mamais D., Noutsopoulos C., Kavallari I., Nyktari E., Kaldis A., Panousi E., et al. Biological groundwater treatment for chromium removal at low hexavalent chromium concentrations. *Chemosphere*. 2016; 152: 238–44. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.02.124>
18. Farid M., Ali S., Akram N.A., Rizwan M., Abbas F., Bukhari S.A.H., et al. Phyto-management of Cr-contaminated soils by sunflower hybrids: physiological and biochemical response and metal extractability under Cr stress. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2017; 24(20): 16845–59. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9247-3>
19. Wendan X., Ye X., Yang X., Zhu Z., Sun C., Zhang Q., et al. Isolation and characterization of chromium (VI)-reducing *Bacillus* Sp. FY1 and *Arthrobacter* Sp. WZ2 and their bioremediation potential. *Bioremed. J.* 2017; 21(2): 100–8. <https://doi.org/10.1080/10889868.2017.1282939>
20. Caporale A.G., Violante A. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments *Curr. Pollut. Rep.* 2016; (2): 15–27. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0024-y>
21. Shahid M., Shamshad S., Rafiq M., Khalid S., Bibi I., Niazi N.K., et al. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere*. 2017; 178: 513–33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.074>
22. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.S., Akimenko Y.V., Myasnikova M.A. Ecotoxicity of copper, nickel, and zinc nanoparticles assessment on the basis of biological indicators of chernozems. *Euras. Soil Sci.* 2019; 52(8): 982–7. <https://doi.org/10.1134/S106422931908009X> <https://elibrary.ru/aalhc>
23. Hafiz M.F., Ma L. Effect of chromium on seed germination, early seedling growth and chromium accumulation in tomato genotypes. *Acta Physiologiae Plantarum*. 2021; 43(100). <https://doi.org/10.1007/s11738-021-03267-5>
24. Dobrovolsky G.V., Nikitin E.D. *Ecology of Soils. The Doctrine of the Ecological Functions of Soils [Ekologiya pochv. Uchenie ob ekologicheskikh funktsiyakh pochv]*. Moscow: Nauka; 2006. (in Russian)
25. Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Valkov V.F. *Ecological Status and Functions of Soils in Conditions of Chemical Pollution [Ekologicheskoe sostoyanie i funktsii pochv v usloviyakh khimicheskogo zagryazneniya]*. Rostov-na-Donu: Rostizdat; 2006. <https://elibrary.ru/xippfx> (in Russian)

Сведения об авторах

Кузина Анна Андреевна, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: nyuta_1990@mail.ru
Храпай Екатерина Сергеевна, студент, лаборант-исследователь ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: katerinap1996@mail.ru

Колесников Сергей Ильич, доктор с.-х. наук, профессор, зав. каф. ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Минникова Татьяна Владимировна, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: loko261008@yandex.ru

Казеев Камил Шагидулович, доктор геогр. наук, профессор, директор Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», 344090, Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: kazeev@sfedu.ru

Information about the authors

Anna A. Kuzina, PhD (Biology), Senior Researcher, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8816-5288>
E-mail: nyuta_1990@mail.ru

Ekaterina S. Khrapai, student, Laboratory Assistant Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3910-7644>
E-mail: katerinap1996@mail.ru

Sergey I. Kolesnikov, DSc (Agriculture), Professor, Head of Chair, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5860-8420>
E-mail: kolesnikov@sfedu.ru

Tatiana V. Minnikova, PhD (Biology), Leading Researcher, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9453-7137>
E-mail: loko261008@yandex.ru

Kamil Sh. Kazeev, DSc (Geography), Professor, Director of D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0252-6212> E-mail: kazeev@sfedu.ru