

ОЦЕНКА ЭКОТОКСИЧНОСТИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, МЕТАЛЛОИДОВ И НЕМЕТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ОТХОДАХ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н.А. Евстегнеева¹, С.И. Колесников¹, Т.В. Минникова¹, А.Н. Тимошенко¹

¹ Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,
e-mail: evstegneeva@sfedu.ru

Аннотация: Деятельность предприятий горной промышленности приводит к значительному загрязнению окружающей среды тяжелыми металлами, металлоидами и неметаллами. На Кавказе наибольший вклад в техногенное загрязнение вносят Урупский и Тырнаузский горно-обогатительные комбинаты, Мизурская горно-обогатительная фабрика, заводы «Электроцинк» и «Победит». Основная доля загрязняющих веществ, поступающих от этих источников загрязнения, накапливается в почве. Наиболее распространенными почвами в зоне влияния указанных источников загрязнения являются бурые лесные почвы. Дана сравнительная оценка опасности загрязнения 28 тяжелыми металлами, металлоидами и неметаллами, содержащимися в отходах предприятий горной промышленности, по степени снижения общей численности бактерий в бурой лесной слабонасыщенной почве. Загрязнение моделировали в лабораторных условиях. ПТЭ вносили в форме оксидов в концентрациях 10 и 100 мг элемента на 1 кг почвы. Общую численность бактерий определяли методом прямой люминесцентной микроскопии. Потенциально токсичные химические элементы ранжированы по степени опасности для почвенных бактерий бурой лесной слабонасыщенной почвы при концентрации 10 мг/кг: Se > Te ≥ Cr ≥ Ag = Co ≥ Ge ≥ Cd ≥ W ≥ Hg = Tl ≥ Sc ≥ Sb > Ni ≥ Bi ≥ B = Sn = Yb ≥ Cu = Nb ≥ Sr > Y > Mo ≥ Ga ≥ Pb = V ≥ Zn ≥ F > Mn; при концентрации 100 мг/кг: Cr ≥ Se = Te ≥ Ag ≥ Co ≥ Cd = Hg ≥ Sc ≥ Sb = Tl ≥ Ge ≥ W ≥ Sn ≥ B ≥ Ni ≥ Nb = Sr = Yb ≥ Bi > Y ≥ Pb > Cu ≥ V ≥ Zn ≥ Ga ≥ Mn = Mo ≥ F. Наиболее опасными поллютантами для почвенных бактерий проявили себя хром, селен, теллур и серебро.

Ключевые слова: химическое загрязнение, почва, тяжелые металлы, металлоиды, неметаллы, биотестирование, численность бактерий.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-24-01041) в Южном федеральном университете.

Для цитирования: Евстегнеева Н. А., Колесников С. И., Минникова Т. В., Тимошенко А. Н. Оценка экотоксичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов, содержащихся в отходах предприятий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 73–85. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_73.

Toxicity estimate of heavy metals, metalloids and nonmetals contained in mineral mining waste

N.A. Evstegneeva¹, S.I. Kolesnikov¹, T.V. Minnikova¹, A.N. Timoshenko¹

¹ D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: evstegneeva@sfedu.ru

Abstract: Mining activities lead to severe pollution of the environment with metals, metalloids and nonmetals. In the Caucasus, the largest induced pollution results from performance of Urup and Tyrnyauz mining and processing integrated works, Mizur concentration factory, as well as Electrozinc and Pobedit plants. Pollutants from these sources mostly accumulate in soil. The most wide-spread soil in the influence zone of the listed pollution sources is the brown forest earth. The article offers a comparative estimation of pollution hazard for 28 heavy metals, metalloids and nonmetals contained in mineral mining and processing waste by the rate of total depopulation of bacteria in the weakly unsaturated brown forest earth. Pollution was modeled on a laboratory scale. The cryptotoxic elements were entered as oxides at concentrations of 10 and 100 mg of an element per 1 kg of soil. The total number of bacteria was determined using direct luminescence microscopy. The cryptotoxic elements were ranked by their hazard for bacteria in the weakly unsaturated brown forest earth at the concentration of 10 mg/kg: Se > Te. The most hazardous pollutants for the earth bacteria appeared to be chromium, selenium, tellurium and silver.

Key words: chemical pollution, soil, heavy metals, metalloids, nonmetals, biotesting, bacterial population.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-24-01041) in Southern Federal University.

For citation: Evstegneeva N. A., Kolesnikov S. I., Minnikova T. V., Timoshenko A. N. Toxicity estimate of heavy metals, metalloids and nonmetals contained in mineral mining waste. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5-1):73-85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_73.

Введение

Традиционные технологии добычи и переработки руд приводят к ухудшению состояния окружающей среды, загрязнению и деградации природных экосистем [1]. Площадь освоения природных ресурсов горных территорий постоянно увеличивается, что приводит к усилению техногенной нагрузки [2].

При экологическом мониторинге территорий горнодобывающего комплекса одним из наиболее информативных объектом является почвенный покров [3], так как основная доля загрязняющих ве-

ществ, поступающих от горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, аккумулируется в почве [4, 5] и со временем распространяется на всю экосистему [6].

Почвы горнопромышленных районов долгое время накапливают загрязняющие вещества, в них отмечают повышенные уровни потенциально токсичных элементов (ПТЭ) [7–9]. Большая часть ПТЭ осаждается в районе 1–3 км от источников, что приводит к высоким уровням загрязнения тяжелыми металлами, металлоидами и неметаллами на селитеб-

ной территории промышленно развитых регионов. Особенно широкий спектр загрязняющих веществ наблюдается в отходах, складываемых в хвостохранилищах [10]. Отмечено повышенное содержание Zn, Pb, Cd, Ag, Sb, Hg, Cu, Cr, Co, Mn и Ni вокруг действующих предприятий горно-металлургического комплекса [11 – 13], а также вокруг уже неэксплуатируемых месторождений [14]. В последние годы особое внимание уделяют токсичности редких элементов, таких как Y, Yb, Tl, Sc и др. [15 – 17], основными антропогенными источниками которых является горнодобывающая деятельность [18].

Опасность загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами обоснована их высокой токсичностью и способностью к биоаккумуляции [19]. К тому же для ПТЭ характерно более длительное присутствие в почве, чем в других частях биосферы [20, 21]. С развитием горной промышленности интенсивность попадания ПТЭ в почвы превышает способность адаптации живых организмов к преобразованной геохимической среде [22], что приводит к повышению токсичности этих почв для живых организмов [23, 24].

Наибольший вклад в техногенное загрязнение экосистем Кавказа вносят Урупский горно-обогатительный комбинат (ГОК) [25], Тырныаузский ГОК (г. Тырныауз, Республика Кабардино-Балкария), Мизурская горно-обогатительная фабрика (п. Мизур, Республика Северная Осетия-Алания), АО «Электроцинк» (г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания) и АО «Победит» (г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания). На территориях этих предприятий расположено около 200 млн т техногенных отходов, содержащих широкий спектр ПТЭ [26].

Известно, что содержание высоких концентраций тяжелых металлов, метал-

лоидов и некоторых неметаллов изменяет таксономическое и функциональное разнообразие бактериальных сообществ [27, 28], что может напрямую влиять на плодородие почвы. ПТЭ, влияя на рост, морфологию и метаболизм микроорганизмов, могут способствовать значительной потере разнообразия микробного сообщества [29]. Было доказано, что высокое содержание ПТЭ негативно сказывается на обилии бактерий типа *Actinobacteria*, *Planctomycetes*, *Verrucomicrobia* и *Nitrospirae* [30].

Цель исследования – сравнительная оценка экотоксичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов, содержащихся в отходах предприятий горной промышленности, по степени влияния на общую численность бактерий в почве.

Материалы и методы исследования

Наиболее распространенными почвами в зоне влияния предприятий горнодобывающего и перерабатывающего комплексов на Кавказе являются бурые лесные почвы. По международной номенклатуре World Reference Base for Soil Resources (WRB) – Haplic Cambisols Eutric [31]. Бурая лесная слабонасыщенная почва характеризуется кислой реакцией среды (pH = 5,5), низким содержанием гумуса – 4,7%, и тяжело-суглинистым гранулометрическим составом.

Образцы почвы были отобраны в Республике Адыгея (Майкопский район, п. Никель), вдали от основных источников загрязнения. Для модельного исследования использовали верхний слой почвы (0–20 см), так как в этих наиболее плодородных горизонтах накапливается основное количество загрязняющих веществ [32].

В таблице представлено фоновое содержание ПТЭ в бурой лесной слабонасыщенной почве. Определение про-

Фоновое содержание наиболее распространенных химических элементов (тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов) в черноземе обыкновенном, мг/кг
Element content in soil in background concentration in brown forest soil, mg/kg

№	Элемент	Фоновое содержание, мг/кг
1	Ag	0,094
2	B	45,0
3	Bi	0,28
4	Cd	0,10
5	Co	15,5
6	Cr	108,0
7	Cu	21,8
8	Ga	12,1
9	Mn	674,9
10	Mo	0,64
11	Nb	12,2
12	Ni	33,6
13	Pb	24,6
14	Sb	1,06
15	Sc	9,01
16	Se	1,62
17	Sn	1,73
18	Sr	96,3
19	Te	<0,50
20	Tl	0,39
21	V	81,2
22	Y	21,7
23	Yb	2,47
24	Zn	65,3

водилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в лаборатории Российского геологического исследовательского института имени А.П. Карпинского, Санкт-Петербург.

Было проведено лабораторное моделирование загрязнения 28 тяжелыми металлами, металлоидами и неметаллами, содержащимися в отходах предприятий горной промышленности.

Тяжелые металлы и металлоиды встречаются в загрязненных почвах, как правило, в форме оксидов [33]. По этой причине в бурую лесную почву вносили соединения оксидов Ag, B, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, Hg, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb, Sc, Sn, Sr, Te, Tl, V, W, Y, Yb, Zn. Неметаллы (Se и F) вносили в форме диоксида (SeO₂) и фторида (NaF), так как эти формы чаще всего присутствует в загрязненной среде [34, 35].

Оценку опасности загрязнения почвы ПТЭ проводили, сравнивая между собой одинаковые дозы для всех элементов — 10 и 100 мг на кг почвы. Внесение таких доз обосновано предположением, что на дозах менее 10 мг/кг почвы большинство исследуемых химических элементов не проявили бы токсичность из-за высоких фоновых концентраций в исследуемой почве (например, марганец), а на дозах более 100 мг/кг — проявили бы слишком высокую токсичность (например, кадмий).

Почвенные образцы инкубировали в течение 10 сут при оптимальной влажности и постоянной температуре 24—25 °С. Контролем служила незагрязненная почва.

Для сравнительной оценки опасности ПТЭ определяли общую численность бактерий по методу Д.Г. Звягинцева и П.А. Кожевина [36]. Численность бактерий, зафиксированных на предметном стекле и окрашенных раствором акридинового оранжевого (разведение 1:10 000), определяли в 20 полях зрения (для каждого препарата) в 2-кратной аналитической повторности методом прямой люминесцентной микроскопии в падающем свете. Метод считается одним из самых достоверных, так как при его использовании достигается точный подсчет количества бактерий в почве. Микроскопирование препаратов проводили на микроскопе HBO 100 Microscope Illuminating System (Zeiss).

Статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Statistica 12.0. Для определения надежности результатов была рассчитана скорость вариации (стандартное отклонение при $p \leq 0,05$).

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам лабораторного моделирования загрязнения бурой лесной слабонасыщенной почвы было установлено ингибирующее воздействие ПТЭ на общую численность почвенных бактерий. Внесение элементов в концентрации 100 мг/кг почвы сильнее ингибирует численность бактерий, чем внесение этих же элементов в концентрации 10 мг/кг почвы (рис. 1). Таким образом, снижение показателя находится в прямой зависимости от количества загрязнителя.

На рис. 2. представлена сравнительная оценка токсичности ПТЭ в бурой лесной почве при загрязнении в концентрации 10 мг/кг почвы. После сравнения опасности элементов был построен

ряд токсичности тяжелых металлов, металлоидов и неметаллов: $Se > Te \geq Cr \geq \geq Ag = Co \geq Ge \geq Cd \geq W \geq Hg = Tl \geq Sc \geq \geq Sb > Ni \geq Bi \geq B = Sn = Yb \geq Cu = Nb \geq \geq Sr > Y > Mo \geq Ga \geq Pb = V \geq Zn \geq F > Mn$.

При внесении 10 мг на кг почвы наибольшее ингибирование численности бактерий вызывают Se, Te, Cr, Ag и Co – на 56–66% ниже контрольного образца. Содержание 10 мг/кг Mn, F и Zn снизило численность бактерий только на 19–23% относительно незагрязненной почвы, проявив наименьшую токсичность среди других ПТЭ.

Повышение дозы ПТЭ до 100 мг/кг действует более токсично на численность бактерий бурой лесной почвы по сравнению с 10 мг/кг ПТЭ. На рис. 3 представлен ряд изменения общей численности бактерий в бурой лесной почве при внесении ПТЭ в концентрации 100 мг/кг почвы: $Cr \geq Se = Te \geq Ag \geq Co \geq \geq Cd = Hg \geq Sc \geq Sb = Tl \geq Ge \geq W \geq Sn \geq \geq B \geq Ni \geq Nb = Sr = Yb \geq Bi > Y \geq Pb > > Cu \geq V \geq Zn \geq Ga \geq Mn = Mo \geq F$.

Наибольший негативный эффект проявили 4 элемента: Cr, Se, Te, Ag, ингиби-

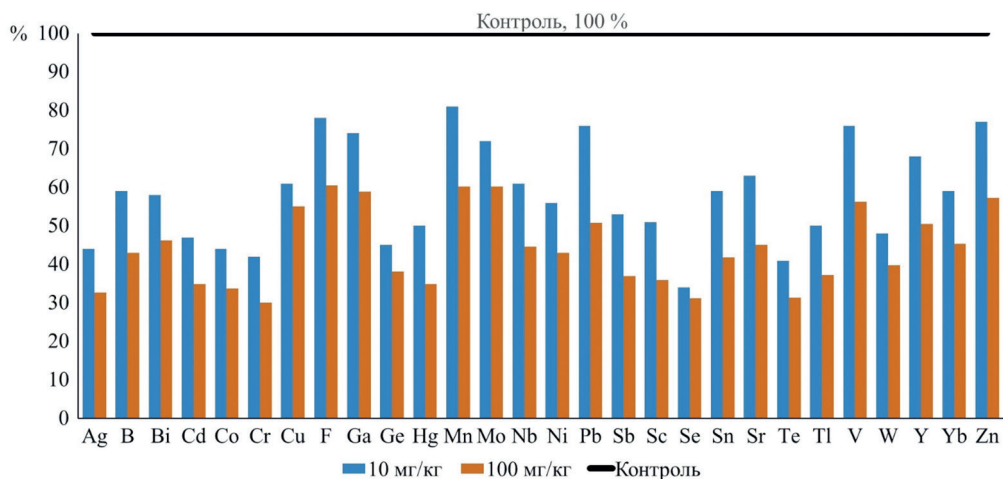


Рис. 1. Общая численность бактерий в бурой лесной почве после загрязнения потенциально токсичными химическими элементами, % от контроля

Fig. 1. The total number of bacteria in brown forest soil after contamination with potentially toxic chemical elements, % of the control

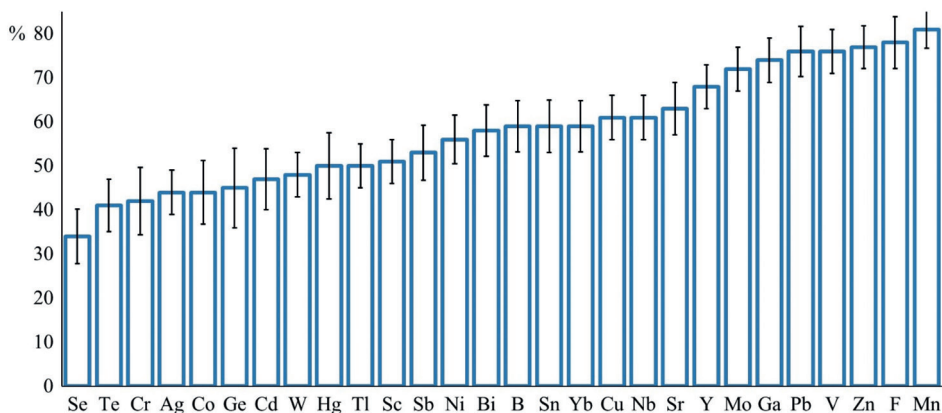


Рис. 2. Ранжирование потенциально токсичных химических элементов по изменению общей численности бактерий в бурой лесной почве при загрязнении в концентрации 10 мг/кг почвы, % от контроля
 Fig. 2. Change in number of soil bacteria induced in brown forest soil by potentially toxic chemical elements in concentration of 10 mg/kg of soil, % of control

руа показатель на 67 – 70% относительно контроля. Наименьшая токсичность выявлена в образцах почвы, загрязненных Mn, Mo, F в концентрации 100 мг/кг почвы на 39 – 40% ниже контрольного образца.

Сравнительная оценка опасности загрязнения ПТЭ, содержащимися в отходах предприятий горной промышленности, бурых лесных почв Кавказа показала, что к наиболее токсичным химическим

элементам по степени снижения численности почвенных бактерий относятся элементы из разных химических групп: тяжелые металлы (хром, серебро и кобальт), металлоиды (теллур) и неметаллы (селен).

Результаты исследования подтверждают предыдущими работами, в которых также было установлено наибольшее токсическое действие теллура, селена, серебра и хрома на биологические

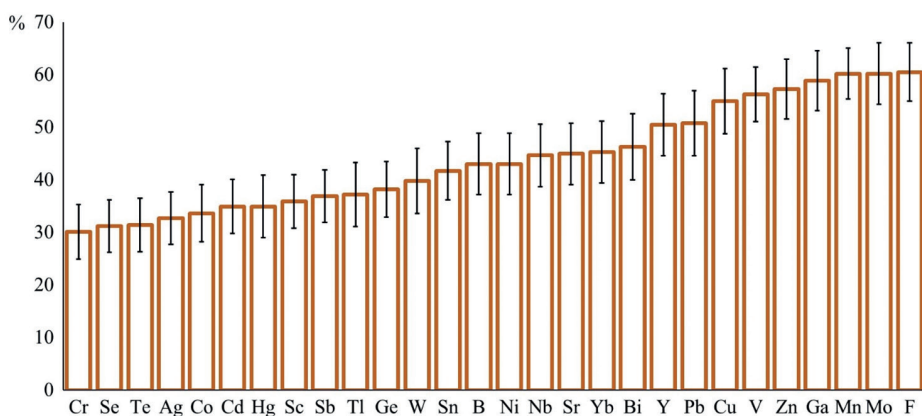


Рис. 3. Ранжирование потенциально токсичных химических элементов по изменению общей численности бактерий в бурой лесной почве при загрязнении в концентрации 100 мг/кг почвы, % от контроля
 Fig. 3. Change in number of soil bacteria induced in brown forest soil by potentially toxic chemical elements in concentration of 100 mg/kg of soil, % of control

функции чернозема обыкновенного и серопесков [37 – 39].

Заключение

Установлено негативное влияние загрязнения бурой лесной слабонасыщенной почвы тяжелыми металлами, металлоидами и неметаллами на общую численность почвенных бактерий. Снижение численности бактерий в бурой лесной почве происходит в прямой зависимости от концентрации поллютанта в почве.

Потенциально токсичные химические элементы ранжированы по степени опас-

ности для почвенных бактерий бурой лесной слабонасыщенной почвы:

- при концентрации 10 мг/кг:

$Se > Te \geq Cr \geq Ag = Co \geq Ge \geq Cd \geq W \geq Hg = Tl \geq Sc \geq Sb > Ni \geq Bi \geq B = Sn = Yb \geq Cu = Nb \geq Sr > Y > Mo \geq Ga \geq Pb = V \geq Zn \geq F > Mn;$

- при концентрации 100 мг/кг:

$Cr \geq Se = Te \geq Ag \geq Co \geq Cd = Hg \geq Sc \geq Sb = Tl \geq Ge \geq W \geq Sn \geq B \geq Ni \geq Nb = Sr = Yb \geq Bi > Y \geq Pb > Cu \geq V \geq Zn \geq Ga \geq Mn = Mo \geq F.$

Наиболее опасными поллютантами для почвенных бактерий являются хром, селен, теллур и серебро.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Ю. С., Хадзарагова Е. А., Соколов А. А., Шарипзянова Г. Х., Таскин А. В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 178 – 188. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188.

2. Голик В. И., Урумова Ф. М., Масленников С. А., Небылова Я. Г. К проблеме химизации окружающей среды при добыче металлических руд в горных регионах // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 8. – С. 53 – 59. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-8-53-59.

3. Елохин В. А. Геохимическая трансформация почв в зоне влияния шлакового отвала за период 2006 – 2020 гг. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11-1. – С. 98 – 110. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_98.

4. Алборов И. Д., Тедеева Ф. Г., Гуцаев Ф. Х., Бурдзиева О. Г., Гегелашвили М. В. Влияние горнодобывающего комплекса на качество среды обитания в условиях горных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 32 – 39. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-32-39.

5. Опекунова М. Г., Сомов В. В., Папан Э. Э. Загрязнение почв в районе воздействия горнорудных предприятий башкирского Зауралья // Почвоведение. – 2017. – № 6. – С. 744 – 758. DOI: 10.7868/80032180X17060089.

6. Петров Ю. С., Соколов А. А., Раус Е. В. Математическая модель оценки техногенного ущерба от функционирования горных предприятий // Устойчивое развитие горных территорий. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 554 – 559. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-554-559.

7. Chen L., Wang J., Beiyuan J., Guo X., Wu H., Fang L. Environmental and health risk assessment of potentially toxic trace elements in soils near uranium (U) mines. A global meta-analysis // Science of the Total Environment. 2021, vol. 816, article 151556. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151556.

8. Kasemodel M. C., Sakamoto I. K., Varesche M. B. A., Rodrigues V. G. S. Potentially toxic metal contamination and microbial community analysis in an abandoned Pb and Zn mining waste deposit // Science of the Total Environment. 2019, vol. 675, pp. 367 – 379. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.223.

9. *Timofeev I., Kosheleva N., Kasimov N.* Contamination of soils by potentially toxic elements in the impact zone of tungsten-molybdenum ore mine in the Baikal region. A survey and risk assessment // *Science of the Total Environment*. 2018, vol. 642, pp. 63–76. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.042.

10. *Майорова Л. П., Черенцова А. А., Крупская Л. Т., Голубев Д. А., Колобанов К. А.* Оценка техногенного загрязнения воздушного бассейна при пылении хвостохранилищ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 1. – С. 5–20. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-5-20.

11. *Li P., Lin C., Cheng H., Duan X., Lei K.* Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015, vol. 113, pp. 391–399. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.12.025.

12. *Chileshe M. N., Syampungani S., Festin E. S., Tigabu M., Daneshvar A., Odén P. C.* Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration // *Journal of Forestry Research*. 2020, vol. 31, no. 4, pp. 1283–1293. DOI: 10.1007/s11676-019-00921-0.

13. *Kazapoe R. W., Amuah E. E. Y., Dankwa P., Ibrahim K., Mville B. N., Abubakari S., Bawa N.* Compositional and source patterns of potentially toxic elements (PTEs) in soils in southwestern Ghana using robust compositional contamination index (RCCI) and k-means cluster analysis // *Environmental Challenges*. 2021, vol. 5, article 100248. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100248.

14. *Qiao D., Wang G., Li X., Wang S., Zhao Y.* Pollution, sources and environmental risk assessment of heavy metals in the surface AMD water, sediments and surface soils around unexploited Rona Cu deposit, Tibet, China // *Chemosphere*. 2020, vol. 248, article 125988. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125988.

15. *Mihajlovic J., Rinklebe J.* Rare earth elements in German soils. A review // *Chemosphere*. 2018, vol. 205, pp. 514–523. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.059.

16. *da Silveira Pereira W. V., Ramos S. J., Melo L. C. A., de Souza Braz A. M., Dias Y. N., de Almeida G. V., Fernandes A. R.* Levels and environmental risks of rare earth elements in a gold mining area in the Amazon // *Environmental Research*. 2022, vol. 211, article 113090. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113090.

17. *Liu J., Wang L., Wang J., Zhang Q., Wei X., Lin Y., Xiao T.* Quantification of smelter-derived contributions to thallium contamination in river sediments: Novel insights from thallium isotope evidence // *Journal of Hazardous Materials*. 2022, vol. 424, article 127594. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127594.

18. *Atibu E. K., Lacroix P., Sivalingam P., Ray N., Giuliani G., Mulaji C. K., Poté J.* High contamination in the areas surrounding abandoned mines and mining activities: an impact assessment of the Dilala, Luilu and Mpingiri rivers, Democratic Republic of the Congo // *Chemosphere*. 2018, vol. 191, pp. 1008–1020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.052.

19. *Galhardi J. A., de Mello J. W. V., Wilkinson K. J.* Environmental and health risk assessment of agricultural areas adjacent to uranium ore fields in Brazil // *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, vol. 42, no. 11, pp. 3965–3981. DOI: 10.1007/s10653-020-00659-3.

20. *Sun L., Guo D., Liu K., Meng H., Zheng Y., Yuan F., Zhu G.* Levels, sources, and spatial distribution of heavy metals in soils from a typical coal industrial city of Tangshan, China // *Catena*. 2019, vol. 175, pp. 101–109. DOI: 10.1016/j.catena.2018.12.014.

21. *Алборов И. Д., Бурдзиева О. Г., Тедеева Ф. Г., Гегелашвили М. В.* Экологическая напряженность в зонах добычи цветных металлов на Северном Кавказе // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2020. – № 11-1. – С. 18–31. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-18-31.

22. *Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Хадзарагова Е. А., Плиева М. Т.* Учет экологических аспектов при оценке влияния тяжелых металлов на здоровье работников горнодобываю-

щих предприятий и населения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 106–117. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-106-117.

23. Wang L., Xie X., Li Q., Yu Z., Hu G., Wang X., Liu J. Accumulation of potentially toxic trace elements (PTEs) by native plant species growing in a typical gold mining area located in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau // Environmental Science and Pollution Research. 2022, vol. 29, no. 5, pp. 6990–7000. DOI: 10.1038/s41598-022-17461-z.

24. Adimalla N. Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution // Environmental Geochemistry and Health. 2020, vol. 42, no. 1, pp. 59–75. DOI: 10.1007/s10653-019-00270-1.

25. Салпагарова С. И., Салпагарова З. И. Воздействие Урупского горнообогатительного комбината на окружающую среду // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2018. – Т. 12. – № 1. – С. 88–93. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-1-88-93.

26. Алборов И. Д., Тедеева Ф. Г., Бурдзиева О. Г. Экологические аспекты сохранения техногенных месторождений цветных металлов на Северном Кавказе // Устойчивое развитие горных территорий. – 2021. – Т. 13. – № 2. – С. 265–272. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-265-272.

27. Lemmel F., Maunoury-Danger F., Fanesi A., Leyval C., Cébron A. Soil properties French soils displaying an anthropisation gradient // Microbial Ecology. 2019, vol. 77, no. 4, pp. 993–1013. DOI: 10.1007/s00248-018-1297-7.

28. Guo H., Nasir M., Lv J., Dai Y., Gao J. Understanding the variation of microbial community in heavy metals contaminated soil using high throughput sequencing // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2017, vol. 144, pp. 300–306. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.06.048.

29. Luo Y., Pang J., Li C., Sun J., Xu Q., Ye J., Shi J. Long-term and high-bioavailable potentially toxic elements (PTEs) strongly influence the microbiota in electroplating sites // Science of the Total Environment. 2022, vol. 814, article 151933. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151933.

30. Sazykina M. A., Minkina T. M., Konstantinova E. Y., Khmelevtsova L. E., Azhogina T. N., Antonenko E. M., Sazykin I. S. Pollution impact on microbial communities composition in natural and anthropogenically modified soils of Southern Russia // Microbiological Research. 2022, vol. 254, article 126913. DOI: 10.1016/j.micres.2021.126913.

31. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition published in 2022 by the International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.

32. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – A review // Environmental Pollution. 2019, vol. 249, pp. 200–207. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.020.

33. Dutta S., Datta A., Zaid A., Bhat J. A. Metalloids and their impact on the environment / Metalloids in plants: Advances and future prospects. 2020, pp. 19–26. DOI: 10.1002/9781119487210.ch2.


34. Okonji S. O., Achari G., Pernitsky D. Environmental impacts of selenium contamination: a review on current-issues and remediation strategies in an aqueous system // Water. 2021, vol. 13, no. 11, article 1473. DOI: 10.3390/w13111473.

35. Devi G., Kushwaha A., Goswami L., Chakrabarty S., Kaur H., Sathe S. S., Sarma H. P. Toxicity assessment of fluoride-contaminated soil and wastewater in solanum tuberosum // Water, Air, & Soil Pollution. 2022, vol. 233, no. 7, pp. 1–14. DOI: 10.1007/s11270-022-05694-7.

36. Казеев К. Ш., Колесников С. И., Акименко Ю. В., Даденко Е. В. Методы биодиагностики наземных экосистем. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – С. 356.

37. 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, and Soil Pollution. 2022, vol. 233, no. 1, article 18. DOI: 10.1007/s11270-021-05496-3.

38. Евстегнеева Н. А., Колесников С. И., Минникова Т. В., Тимошенко А. Н., Цепина Н. И., Казеев К. Ш. Сравнительная оценка токсичности химических элементов по численности бактерий в серопесках // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. — 2022. — № 3 (215). — С. 120–128. DOI: 10.18522/1026-2237-2022-3-120-128.

39. Kolesnikov S. I., Popovich A. A., Kazeev K. Sh., Val'kov V. F. The influence of fluorine, boron, selenium, and arsenic pollution on the biological properties of ordinary chernozems // Eurasian Soil Science. 2008, vol. 41, no. 4, pp. 400–404. DOI: 10.1134/S1064229308040066. 

REFERENCES

1. Petrov Yu. S., Khadzaragova E. A., Sokolov A. A., Sharipzyanova G. Kh., Taskin A. V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy: Outlines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11-1, pp. 178–188. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188.

2. Golik V. I., Urumova F. M., Maslennikov S. A., Nebylova Ya. G. To the problem of environmental chemistation in the production of metal ores in mountain regions. *Occupational Safety in Industry.* 2020, no. 8, pp. 53–59. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-8-53-59.

3. Elokhin V. A. Geochemical transformation of soil in the influence zone of ash dump in 2006–2020. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11-1, pp. 98–110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_98.

4. Alborov I. D., Tedeeva F. G., Gutsaev F. H., Burdzieva O. G., Gegelashvili M. V. Effects of the mining sector on the quality of the living environment in mountainous terrains. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11-1, pp. 32–39. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-32-39.

5. Opekunova M. G., Somov V. V., Papyan E. E. Soil contamination in the impact zone of mining enterprises in the Bashkir Transural Region. *Soil Science Faculty.* 2017, no. 6, pp. 744–758. [In Russ]. DOI: 10.7868/80032180X17060089.

6. Petrov Y. S., Sokolov A. A., Raus E. V. A mathematical model for estimating technogenic losses from the operation of mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2019, vol. 11, no. 4, pp. 554–559. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11-4-554-559.

7. Chen L., Wang J., Beiyuan J., Guo X., Wu H., Fang L. Environmental and health risk assessment of potentially toxic trace elements in soils near uranium (U) mines. A global meta-analysis. *Science of the Total Environment.* 2021, vol. 816, article 151556. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151556.

8. Kasemodel M. C., Sakamoto I. K., Varesche M. B. A., Rodrigues V. G. S. Potentially toxic metal contamination and microbial community analysis in an abandoned Pb and Zn mining waste deposit. *Science of the Total Environment.* 2019, vol. 675, pp. 367–379. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.223.

9. Timofeev I., Kosheleva N., Kasimov N. Contamination of soils by potentially toxic elements in the impact zone of tungsten-molybdenum ore mine in the Baikal region. A survey and risk assessment. *Science of the Total Environment.* 2018, vol. 642, pp. 63–76. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.042.

10. Mayorova L. P., Cherentsova A. A., Krupskaya L. T., Golubev D. A., Kolobanov K. A. Assessment of manmade air pollution due to dusting at mine tailings storage facilities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 5–20. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-5-20.

11. Li P., Lin C., Cheng H., Duan X., Lei K. Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 2015, vol. 113, pp. 391–399. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2014.12.025.

12. Chileshe M. N., Syampungani S., Festin E. S., Tigabu M., Daneshvar A., Odén P. C. Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration. *Journal of Forestry Research*. 2020, vol. 31, no. 4, pp. 1283 – 1293. DOI: 10.1007/s11676-019-00921-0.
13. Kazapoe R. W., Amuah E. E. Y., Dankwa P., Ibrahim K., Mville B. N., Abubakari S., Bawa N. Compositional and source patterns of potentially toxic elements (PTEs) in soils in south-western Ghana using robust compositional contamination index (RCCI) and k-means cluster analysis. *Environmental Challenges*. 2021, vol. 5, article 100248. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100248.
14. Qiao D., Wang G., Li X., Wang S., Zhao Y. Pollution, sources and environmental risk assessment of heavy metals in the surface AMD water, sediments and surface soils around unexploited Rona Cu deposit, Tibet, China. *Chemosphere*. 2020, vol. 248, article 125988. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125988.
15. Mihajlovic J., Rinklebe J. Rare earth elements in German soils. A review. *Chemosphere*. 2018, vol. 205, pp. 514 – 523. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.059.
16. da Silveira Pereira W. V., Ramos S. J., Melo L. C. A., de Souza Braz A. M., Dias Y. N., de Almeida G. V., Fernandes A. R. Levels and environmental risks of rare earth elements in a gold mining area in the Amazon. *Environmental Research*. 2022, vol. 211, article 113090. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113090.
17. Liu J., Wang L., Wang J., Zhang Q., Wei X., Lin Y., Xiao T. Quantification of smelter-derived contributions to thallium contamination in river sediments: Novel insights from thallium isotope evidence. *Journal of Hazardous Materials*. 2022, vol. 424, article 127594. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127594.
18. Atibu E. K., Lacroix P., Sivalingam P., Ray N., Giuliani G., Mulaji C. K., Poté J. High contamination in the areas surrounding abandoned mines and mining activities: an impact assessment of the Dilala, Lulu and Mpingiri rivers, Democratic Republic of the Congo. *Chemosphere*. 2018, vol. 191, pp. 1008 – 1020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.052.
19. Galhardi J. A., de Mello J. W. V., Wilkinson K. J. Environmental and health risk assessment of agricultural areas adjacent to uranium ore fields in Brazil. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, vol. 42, no. 11, pp. 3965 – 3981. DOI: 10.1007/s10653-020-00659-3.
20. Sun L. Guo D., Liu K., Meng H., Zheng Y., Yuan F., Zhu G. Levels, sources, and spatial distribution of heavy metals in soils from a typical coal industrial city of Tangshan, China. *Catena*. 2019, vol. 175, pp. 101 – 109. DOI: 10.1016/j.catena.2018.12.014.
21. Alborov I. D., Burdzieva O. G., Tedeeva F. G., Gegelashvili M. V. Ecological stress in nonferrous metal mining regions in the North Caucasus. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11-1, pp. 18 – 31. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-18-31.
22. Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Khadzaragova E. A., Plieva M. T. Evaluation of population and mine personnel health impacts of heavy metals with regard to local ecology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11-1, pp. 106 – 117. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-106-117.
23. Wang L., Xie X., Li Q., Yu Z., Hu G., Wang X., Liu J. Accumulation of potentially toxic trace elements (PTEs) by native plant species growing in a typical gold mining area located in the northeast of Qinghai-Tibet Plateau. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022, vol. 29, no. 5, pp. 6990 – 7000. DOI: 10.1038/s41598-022-17461-z.
24. Adimalla N. Heavy metals contamination in urban surface soils of Medak province, India, and its risk assessment and spatial distribution. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020, vol. 42, no. 1, pp. 59 – 75. DOI: 10.1007/s10653-019-00270-1.
25. Salpagarova S. I., Salpagarova Z. I. The environmental impacts of urupsky mining complex. *Proceedings of Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. 2018, vol. 12, no. 1, pp. 88 – 93. [In Russ]. DOI: 10.31161/1995-0675-2018-12-1-88-93.
26. Alborov I. D., Tedeeva F. G., Burdzieva O. G. Ecological aspects of the technogenic deposits preservation of non-ferrous metals in the North Caucasus. *Sustainable Development of*

Mountain Territories. 2021, vol. 13, no. 2, pp. 265 – 272. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-265-272.

27. Lemmel F., Maunoury-Danger F., Fanesi A., Leyval C., Cébron A. Soil properties French soils displaying an anthropisation gradient. *Microbial Ecology*. 2019, vol. 77, no. 4, pp. 993 – 1013. DOI: 10.1007/s00248-018-1297-7.

28. Guo H., Nasir M., Lv J., Dai Y., Gao J. Understanding the variation of microbial community in heavy metals contaminated soil using high throughput sequencing. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2017, vol. 144, pp. 300 – 306. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.06.048.

29. Luo Y., Pang J., Li C., Sun J., Xu Q., Ye J., Shi J. Long-term and high-bioavailable potentially toxic elements (PTEs) strongly influence the microbiota in electroplating sites. *Science of the Total Environment*. 2022, vol. 814, article 151933. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151933.

30. Sazykina M. A., Minkina T. M., Konstantinova E. Y., Khmelevtsova L. E., Azhogina T. N., Antonenko E. M., Sazykin I. S. Pollution impact on microbial communities composition in natural and anthropogenically modified soils of Southern Russia. *Microbiological Research*. 2022, vol. 254, article 126913. DOI: 10.1016/j.micres.2021.126913.

31. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4th edition published in 2022 by the International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.

32. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – A review. *Environmental Pollution*. 2019, vol. 249, pp. 200 – 207. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.03.020.

33. Dutta S., Datta A., Zaid A., Bhat J. A. Metalloids and their impact on the environment. *Metalloids in plants: Advances and future prospects*. 2020, pp. 19 – 26. DOI: 10.1002/9781119487210.ch2.

34. Okonji S. O., Achari G., Pernitsky D. Environmental impacts of selenium contamination: a review on current-issues and remediation strategies in an aqueous system. *Water*. 2021, vol. 13, no. 11, article 1473. DOI: 10.3390/w13111473.

35. Devi G., Kushwaha A., Goswami L., Chakrabarty S., Kaur H., Sathe S. S., Sarma H. P. Toxicity assessment of fluoride-contaminated soil and wastewater in solanum tuberosum. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022, vol. 233, no. 7, pp. 1 – 14. DOI: 10.1007/s11270-022-05694-7.

36. Kazeev K. Sp., Kolesnikov S. I., Akimenko Yr. V., Dadenko E. V. *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem* [Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems], Rostov-na-Donu, Izd-vo YUFU, 2016, pp. 356.

37. 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, and Soil Pollution*. 2022, vol. 233, no. 1, article 18. DOI: 10.1007/s11270-021-05496-3.

38. Evstegneeva N. A., Kolesnikov S. I., Minnikova T. V., Timoshenko A. N., Tsepina N. I., Kazeev K. Sh. Comparative Assessment of the Toxicity of Chemical Elements by the Number of Bacteria in Sierosands. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Science*. 2022, no. 3 (215), pp. 120 – 128. [In Russ]. DOI: 10.18522/1026-2237-2022-3-120-128.

39. Kolesnikov S. I., Popovich A. A., Kazeev K. Sh., Val'kov V. F. The influence of fluorine, boron, selenium, and arsenic pollution on the biological properties of ordinary chernozems. *Eurasian Soil Science*. 2008, vol. 41, no. 4, pp. 400 – 404. DOI: 10.1134/S1064229308040066.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евстегнеева Наталья Андреевна¹ – аспирант,
e-mail: evstegneeva@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3133-7629,

*Колесников Сергей Ильич*¹ — д-р с.-х. наук,
профессор, зав. кафедрой,
e-mail: kolesnikov@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5860-8420,
*Минникова Татьяна Владимировна*¹ — канд. биол. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: loko261008@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9453-7137,
*Тимошенко Алена Николаевна*¹ — канд. биол. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: aly9215@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5589-2171,

¹ Академия биологии и биотехнологии
им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет.

Для контактов: Евстегнеева Н.А., e-mail: evstegneeva@sfedu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*N.A. Evstegneeva*¹, Graduate Student,
e-mail: evstegneeva@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3133-7629,
*S.I. Kolesnikov*¹, Dr. Sci. (Agric.),
Professor, Head of Chair,
e-mail: kolesnikov@sfedu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5860-8420,
*T.V. Minnikova*¹, Cand. Sci. (Biol.),
Leading Researcher,
e-mail: loko261008@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9453-7137,
*A.N. Timoshenko*¹, Cand. Sci. (Biol.),
Leading Researcher,
e-mail: aly9215@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5589-2171,

¹ D.I. Ivanovsky Academy of Biology
and Biotechnology, Southern Federal University,
344090, Rostov-on-Don, Russia.

Corresponding author: N.A. Evstegneeva, e-mail: evstegneeva@sfedu.ru.

Получена редакцией 10.01.2023; получена после рецензии 02.03.2023; принята к печати 10.04.2023.
Received by the editors 10.01.2023; received after the review 02.03.2023; accepted for printing 10.04.2023.

