

ВЛИЯНИЕ ДОБЫЧИ ПЛАТИНЫ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БУРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ

А.Н. Тимошенко¹, С.И. Колесников¹, Н.А. Евстегнеева¹, Т.В. Минникова¹, К.Ш. Казеев¹

¹ Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского,
Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: aly9215@mail.ru

Аннотация: Металлы платиновой группы являются перспективными для горнодобывающей промышленности, спрос на большинство из них, как ожидается, будет только расти. Северный Кавказ обладает высоким металлогеническим потенциалом Pt и является перспективным для добычи благородных металлов, в том числе Pt. Для прогнозирования возможных неблагоприятных экологических последствий влияния Pt, поступающей из отходов горно-обогатительных комбинатов, на состояние окружающей среды целесообразно изучение нарушения экосистемных функций почв. В зоне влияния горнодобывающих предприятий распространены бурые лесные почвы. В модельном эксперименте было показано влияние Pt в концентрациях 0,01; 0,1; 1; 10 и 100 мг/кг на экологическое состояние бурой лесной слабонасыщенной почвы. Установлено изменение биологических показателей состояния почвы: общей численности бактерий, активности каталазы и дегидрогеназ, всхожести и длины корней редиса при загрязнении Pt. Наиболее чувствительными показателями были общая численность бактерий, всхожесть и длина корней редиса. Загрязнение Pt в концентрациях 0,01 и 0,1 мг/кг приводит к нарушению основных функций бурой лесной почвы. Более высокое содержание Pt в почве приводит к нарушению всех функций почвы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке ПДК Pt в почве.

Ключевые слова: платинодобывающие предприятия, почвы, загрязнение, платина, биотестирование, устойчивость, экологические функции почв, Кавказ, прогнозирование, экотоксичность.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-74-00080, <https://rscf.ru/project/22-74-00080/>.

Для цитирования: Тимошенко А. Н., Колесников С. И., Евстегнеева Н. А., Минникова Т. В., Казеев К. Ш. Влияние добычи платины на экологическое состояние бурой лесной почвы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 5. – С. 90–103. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_90.

Impact of platinum production on ecology of brown forest soil

A.N. Timoshenko¹, S.I. Kolesnikov¹, N.A. Evstegneeva¹, T.V. Minnikova¹, K.Sh. Kazeev¹

¹ D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology,
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: aly9215@mail.ru

Abstract: Platinum group metals are the promising resource material in the mining industry, and their demand is expected to grow year by year. The Northern Caucasus has a high potential of Pt metallogeny and noble metal production, including Pt. For predicting potential environmental adversities of Pt entrance from mining and processing waste, it is expedient to explore how the functions of soils are damaged in ecosystems. In the influence zone of test mines, the soil is generally brown forest soil. The model experiment illustrates the impact of Pt at concentrations of 0.01, 0.1, 1, 10 and 100 mg/kg on the ecology of brown forest weakly unsaturated soils. The biological parameters of the soil get changed, namely, total number of bacteria, activity of catalase and dehydrogenase, viability and root length of radish polluted with Pt. The most sensitive parameters are the total number of bacteria, and the radish viability and root length. Contamination with Pt at concentrations of 0.01 and 0.1 mg/kg injures the main functions of the brown forest soil. The higher contents of Pt in soil disables all soil functions. The results are usable in development of Pt MAC values for soil.

Key words: platinum mines, soil, pollution, platinum, biotesting, sustainability, ecological functions of soils, Caucasus, prediction, eco-toxicity.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 22-74-00080, <https://rscf.ru/project/22-74-00080/>.

For citation: Timoshenko A. N., Kolesnikov S. I., Evstegneeva N. A., Minnikova T. V., Kazeev K. Sh. Impact of platinum production on ecology of brown forest soil. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(5):90-103. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_5_0_90.

Введение

Горнодобывающая промышленность является важной и растущей частью современной промышленности. Платиновая промышленность является жизненно важным и стратегическим сектором горнодобывающей промышленности для экономики во всем мире. Большая часть мирового производства металлов платиновой группы (МПГ) находится в Южной Африке [1]. Исходя из данных Национального информационного центра полезных ископаемых по минеральным ресурсам США, другие страны, такие как Россия, Канада, Зимбабве и США, играют меньшую, но немаловажную роль. Согласно данным российской статистики по добыче платины, с 2010 по 2022 гг. Россия является вторым по величине производителем платины (Pt). Значительное количество российской Pt добывается на двух россыпных месторождениях в дальневосточном регионе:

Кондерском руднике в Хабаровском крае и Корякском руднике на Камчатке. Территория Северного Кавказа обладает высоким металлогеническим потенциалом золота, платины и палладия и является перспективной для добычи благородных металлов, в том числе Pt [2, 3]. Pt встречается в рудах Зодского месторождения золота, а также в рудах многих других месторождений Кавказа. Темпы роста добычи Pt растут с каждым годом. Но вместе с ростом добычи растут и риски негативных последствий, связанных с загрязнением окружающей среды Pt. Планируемое создание Худесского горно-обогатительного комбината может стать дополнительным источником поступления Pt в почву. Предприятия горной промышленности являются не только крупнейшими производителями ценных металлов, но и источниками загрязнения окружающей среды. Экологическое давление со стороны горнодобывающей

деятельности, например, в платиновом секторе, возникает из-за тонкоизмельченного шлама с перерабатывающих заводов. Интенсивная добыча полезных ископаемых и связанная с ними деятельность (например, перерабатывающие заводы, металлургические заводы) могут привести к антропогенному увеличению концентраций платины, превышающих фоновые уровни. Исследования показали повышенные уровни Pt в окружающей среде плавильных заводов, шахт и перерабатывающих заводов [4–6]. Установлено превышение содержания платины относительно незагрязненных территорий в почвах районов, расположенных рядом с металлургическими заводами, зарегистрированные концентрации Pt составляли 0,625–0,698 мг/кг в сравнении с фоновым уровнем в данном субъекте – 0,0027 мг/г [7].

Несмотря на то, что горнодобывающая промышленность представляет угрозу для состояния окружающей среды, информации о возможных негативных последствиях и способах снижения их недостаточно. Имеются исследования, посвященные разработке способов снижения воздействия горнодобывающей отрасли на водные экосистемы [8], влиянию тяжелых металлов на почвенные экосистемы [9–11]. Основная доля загрязняющих веществ, в том числе Pt, поступающей от источников горнодобывающей промышленности, накапливается в почве.

Долгое время в исследованиях игнорировалось изучение металлов платиновой группы, поскольку считалось, что они нетоксичны для человека и стабильны при незначительном воздействии на окружающую среду [12]. Опасность загрязнения почв Pt была установлена относительно недавно и не изучена в полной мере. Исследования, конкретно касающиеся токсичности платины, по-

явились совсем недавно и, хотя в настоящее время появляются новые публикации, все еще редки.

Установлено, что платина обладает высокой токсичностью, что оказывает негативное воздействие на живые организмы и может привести к нарушению функционирования экосистем. Особую обеспокоенность вызывает способность платины накапливаться в растениях [13, 14], что может привести к ее попаданию в организм человека и нарушению его функционирования. Платина потенциально опасна для здоровья людей, являясь причиной многих болезней, таких как астма, аллергии, риниты, конъюнктивиты [15]. Также платина обладает антибактериальной активностью [16–18].

Установлено, что платина может оказывать негативное влияние не только на живые организмы естественных экосистем [19, 20], но также и на показатели роста сельскохозяйственных растений [13, 21, 22], что приводит к снижению плодородия почв и нарушению экологических и сельскохозяйственных функций почв.

Наиболее встречающиеся почвы около предприятий горнодобывающей промышленности на Северном Кавказе – бурые лесные слабоненасыщенные, поэтому важной задачей представляется оценить последствия загрязнения данного типа почвы.

Учитывая растущую важность использования платины в горнодобывающей промышленности, крайне важно понимать возможные негативные последствия, связанные с поступлением платины в почву. Несмотря на актуальность проблемы, в мире до сих пор не разработаны нормативы содержания Pt в почве. Проведенное исследование будет способствовать установлению ПДК Pt в почве.

Цель работы – оценить экотоксичность Pt, содержащейся в отходах пред-

приятый горной промышленности, и негативное влияние на экологическое состояние бурой лесной слабоненасыщенной почвы.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования была использована бурая лесная слабоненасыщенная почва — по международной номенклатуре WRB — *Haplic Cambisols Eutric* [23]. Данная почва часто встречается в зоне влияния предприятий горнодобывающего и перерабатывающего комплексов на Кавказе. Для моделирования эксперимента отбирали почву, не подверженную влиянию горнодобывающей промышленности, в п. Никель (Республика Адыгея, Майкопский район).

Образцы почвы отбирали из горизонтов 0—10 см. По литературным данным, именно в этом слое аккумулируется основное количество загрязняющих веществ [24]. В почву вносили следующие концентрации Pt — 0,01; 0,1; 1; 10 и 100 мг/кг. Фоновое содержание Pt в почве составляло 0,0005 мг/кг. Средние концентрации Pt в литосфере составляют 0,001—0,01 мг/кг для [25]. Содержание Pt в верхней части континентальной коры очень низкое: примерно 0,0005 мкг/кг. Уже сейчас в некоторых регионах зафиксировано превышение содержания в почве относительно фона Pt в 690—14 000 раз, что обосновывает выбор данных концентраций.

Pt вносили в почву в форме оксида — PtO. Использование данной химической формы обеспечивает исключение влияния на свойства почвы и биоту сопутствующих анионов. Для моделирования эксперимента использовали 300 г почвы в каждом инкубационном сосуде и внесли Pt в исследуемых концентрациях. За контроль принимали почву без внесения загрязняющего вещества. В период инкубации относительная влажность

была примерно 25%, температура — комнатная, 20—23 °С. Спустя 30 сут от момента загрязнения определяли биологические (экотоксикологические) показатели состояния почвы: общую численность бактерий, активность каталазы и дегидрогеназ, всхожесть и длину корней редиса. Общую численность бактерий подсчитывали с помощью метода люминесцентной микроскопии [26]. В качестве тест-объекта для определения фитотоксичности почв был использован редис, который является стандартным тест-объектом ввиду небольшого размера и содержания малого запаса питательных веществ [26]. Были использованы семена редиса сорта «18 дней». Активность каталазы определяли газометрическим методом, активность дегидрогеназ — спектрофотометрически [26].

Корреляцию нескольких переменных (т.е. конечных точек токсичности и концентраций Pt в почве) оценивали с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена в программе *Statistica 13.0*.

Исходя из полученных данных был определен интегральный показатель биологического состояния (ИПБС) почвы [26]. В данном исследовании для расчета данного показателя были использованы все вышеописанные показатели, так как они проявили себя как высокоинформативные и высокочувствительные.

Полученные результаты и их обсуждение

По результатам лабораторного моделирования загрязнения Pt бурой лесной слабоненасыщенной почвы было зафиксировано снижение общей численности почвенных бактерий (см. рис. 1).

В контрольном образце общая численность бактерий составляла 2,4 млрд/г. Уже при внесении 0,01 мг/кг Pt в бурую лесную слабоненасыщенную почву отмечается снижение показателя на 25%

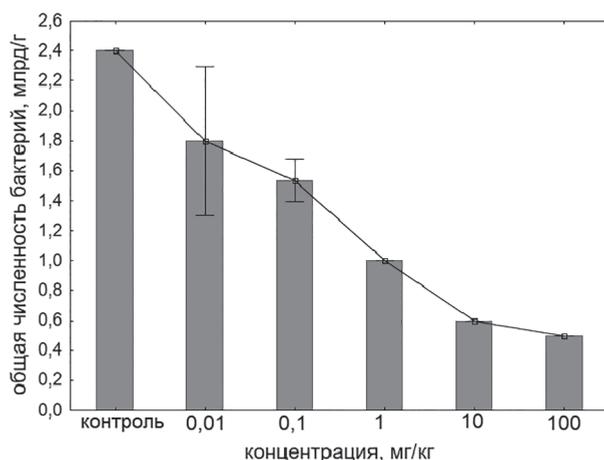


Рис. 1. Изменение общей численности бактерий в бурой лесной слабоненасыщенной почве после загрязнения Pt

Fig. 1. Change in the total number of bacteria in Haplic Cambisols Eutric after Pt pollution

(1,8 млрд/г); 0,1 мг/кг Pt снижает общую численность бактерий на 37%, 1 мг/кг — на 58%, 10 мг/кг — 75%. Максимально используемая в работе концентрация — 100 мг/кг — снижала общую численность бактерий на 79%. Полученные результаты согласуются с литературными данными. Ранее было установлено негативное влияние Pt на почвенное бактериальное сообщество в других почвах [27–30]. Однако по результатам Sahar Shar, et al. [29], влияние Pt на почвен-

ное микробное разнообразие в кислых почвах было в основном неблагоприятным при внесении Pt в концентрации 100 мг/кг. Авторы связывают этот эффект с концентрацией загрязняющего вещества. Наше же исследование выявило существенное влияние на численность бактерий даже 0,01 мг/кг Pt. Это подтверждает необходимость исследовать влияние токсичности загрязняющего вещества на свойства почв с учетом их региональных особенностей.

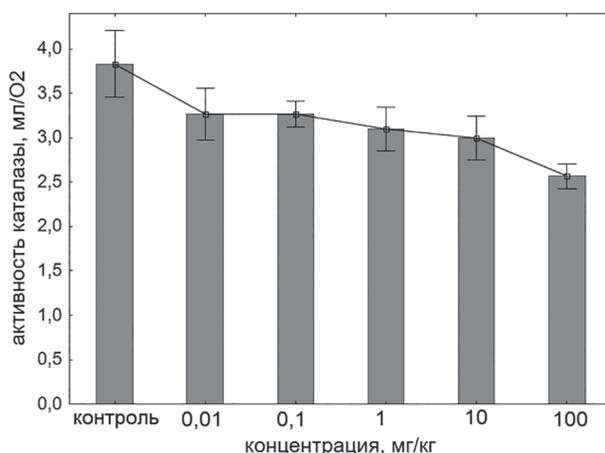


Рис. 2. Изменение активности каталазы в бурой лесной слабоненасыщенной почве после загрязнения Pt

Fig. 2. Change in catalase activity in Haplic Cambisols Eutric after Pt contamination

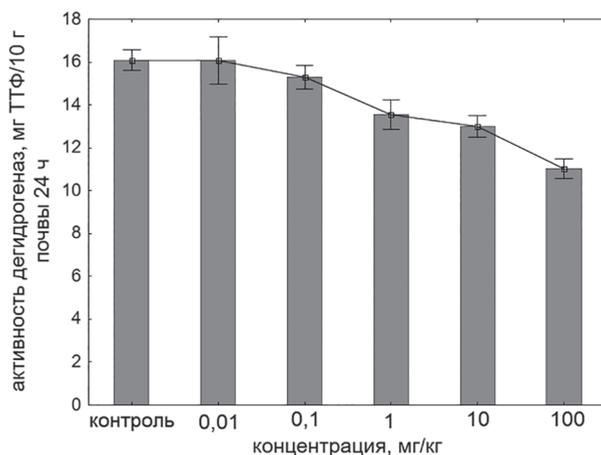


Рис. 3. Изменение активности дегидрогеназ в бурой лесной слабоненасыщенной почве после загрязнения Pt

Fig. 3. Change in dehydrogenase activity in Haplic Cambisols Eutric after Pt contamination

Анализ изменения ферментативной активности показал, что оба исследуемых фермента были чувствительны к загрязнению. Установлено, что активность каталазы начинает достоверно снижаться при внесении в почву 0,01 мг/кг Pt с 3,8 мл/O₂ (контроль) до 3,4 мл/O₂, т.е. на 11% (рис. 2). При внесении в почву 0,1 мг/кг Pt активность каталазы снижается на 15% от контроля; 1, 10 и 100 мг/кг Pt в бурой лесной слабоненасыщенной почве снижают данный показатель на 18, 22 и 33% от контроля соответственно.

Активность дегидрогеназ снижается только при внесении в почву 1 мг/кг Pt; 0,01 и 0,1 мг/кг Pt в бурой лесной слабоненасыщенной почве не оказали влияния на данный показатель (рис. 3). Pt в концентрации 1 мг/кг снижает активность дегидрогеназ с 16 мг ТТФ/10 г почвы за 24 ч (контроль) до 14 мг ТТФ/10 г почвы за 24 ч, то есть на 16%. При внесении в почву 10 и 100 мг/кг Pt активность дегидрогеназ снижается на 19 и 31% от контроля соответственно.

Таким образом, показатель активности каталазы был более чувствителен к загрязнению Pt, чем показатель активности дегидрогеназ. Ранее было выявлено,

что в зависимости от исследуемого фермента низкие концентрации Pt могут оказывать как стимулирующий, так и подавляющий эффект на ферментативную активность почв [30]. В большинстве случаев было зафиксировано снижение ферментативной активности в разных типах почв при внесении в них Pt [30, 31]. Корреляция между снижением ферментативной активности почвы и концентрацией загрязняющего вещества отмечалась ранее и для других ТМ, таких как Cu, Zn, Pb, Ni и других [32].

Показатели фитотоксичности также были чувствительны к загрязнению Pt. Зафиксировано снижение как всхожести редиса (см. рис. 4), так и длины его корней (см. рис. 5).

Всхожесть редиса снижалась на 19% уже при внесении 0,01 мг/кг Pt в бурую лесную слабоненасыщенную почву; 10 мг/кг Pt в почве не вызывали изменения данного показателя относительно концентрации 0,01 мг/кг. Только при внесении 100 мг/кг Pt в бурую лесную слабоненасыщенную почву зафиксировано снижение всхожести на 27% в сравнении с контролем и на 8% в сравнении с концентрацией 0,01 мг/кг. Таким образом,

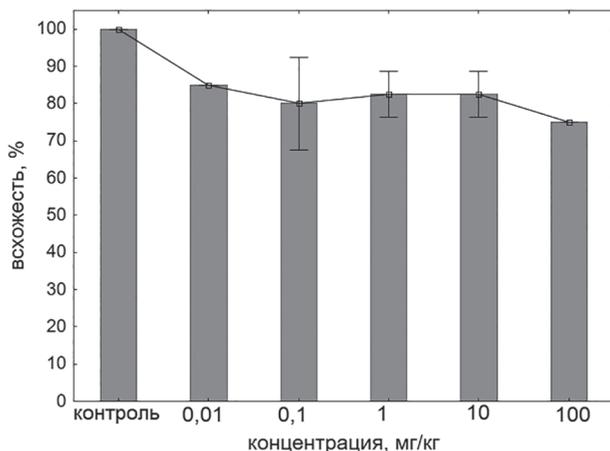


Рис. 4. Изменение всхожести редиса в бурой лесной слабоненасыщенной почве после загрязнения Pt
 Fig. 4. Change in the germination of radishes in Haplic Cambisols Eutric after Pt contamination

можно сказать, что показатель всхожести слабо коррелирует с концентрацией Pt в бурой лесной слабоненасыщенной почве.

Длина корней редиса была более чувствительна к загрязнению Pt, чем всхожесть. Максимальное снижение показателя наблюдается при внесении в бурую лесную слабоненасыщенную почву 0,1 мг/кг Pt (на 43% от контроля) и 100 мг/кг Pt (на 47% от контроля). Наибольшее снижение других показателей зарегистрировано при внесении в почву

100 мг/кг Pt. Также, в отличие от ферментативной активности почвы, длина корней редиса начала снижаться при внесении Pt в наименьшей исследуемой дозе — 0,01 мг/кг, что говорит о большей чувствительности данного показателя к загрязнению Pt. Ранее была установлена зависимость влияния Pt на растения от вида культуры [33] и от внесенной в почву концентрации Pt [34]. В большинстве случаев зафиксировано отрицательное влияние Pt на рост растений [34, 35]. В исследовании А. Kolton

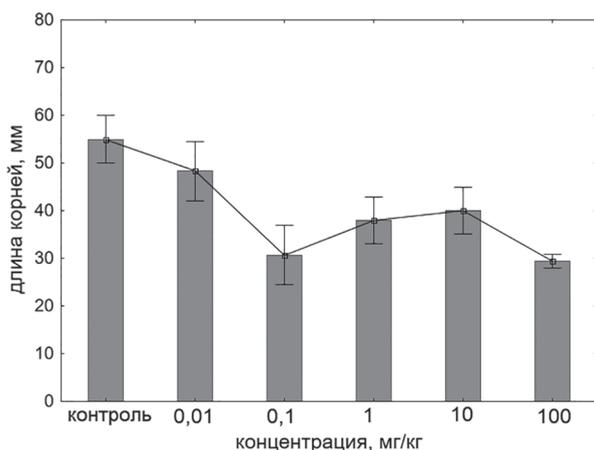


Рис. 5. Изменение длины корней редиса в бурой лесной слабоненасыщенной почве после загрязнения Pt
 Fig. 5. The change in the length of radish roots in Haplic Cambisols Eutric after Pt contamination, mm

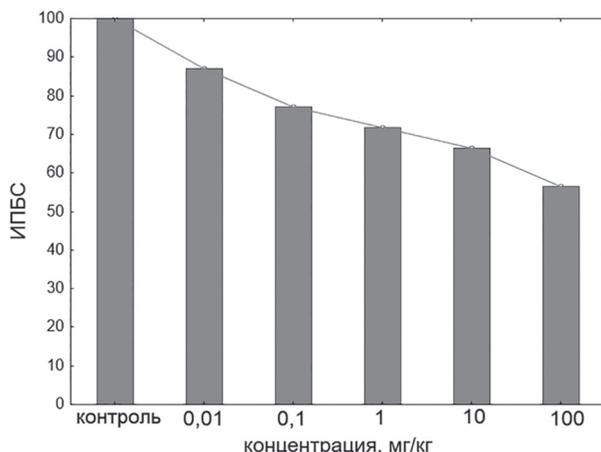


Рис. 6. Изменение интегрального показателя состояния бурой лесной слабоненасыщенной почвы после загрязнения Pt, %

Fig. 6. The change in the integral indicator of the state of Haplic Cambisols Eutric slightly unsaturated soil after Pt pollution, %

и М.А. Czaja [33] отмечается отсутствие зависимости влияния Pt на всхожесть и рост растений от внесенной концентрации, степень снижения, по результатам авторов, зависит от вида растений и формы внесения платины в почву, что противоречит нашим полученным результатам. Возможно, расхождение полученных результатов связано с формой внесения Pt в почву. Ранее упомянутые ученые для исследования токсичности Pt на растения в модельном эксперименте вносили в почву Pt в форме хлорида и нитрата, исследование же влияния оксида Pt ими проведено не было.

Установлена большая чувствительность общей численности бактерий, всхожести и длины корней редиса на загрязнение Pt в сравнении с другими исследуемыми показателями. Аналогичные результаты высокой чувствительности данных показателей отмечались для других загрязняющих веществ и иных типов почв [30, 36 – 40].

По полученным результатам был рассчитан интегральный показатель биологического состояния (ИПБС). Результаты расчетов отображены на рис. 6.

По результатам исследования, концентрация Pt 0,01 мг/кг снижает ИПБС на 13%. Отмечается, что степень снижения ИПБС коррелирует с концентрацией Pt в почве. Известно, что при снижении ИПБС на 5 – 10% происходит нарушение информационных экологических функций почвы, на 10 – 25% – биохимических, физико-химических, химических и целостных, более чем на 25% – физических [26]. В ходе анализа полученных результатов было зафиксировано снижение ИПБС бурой лесной почвы на 13% при внесении в почву 0,01 мг/кг Pt. Следующая исследуемая концентрация, 0,1 мг/кг, снижала данный показатель на 23%. Таким образом, загрязнение Pt в данных концентрациях приводит к нарушению основных функций бурой лесной почвы. Содержание 1, 10 и 100 мг/кг Pt в почве приводит к снижению ИПБС на 28, 34 и 44% соответственно, что вызывает нарушение всех вышеописанных функций почвы.

Закключение

Установлено негативное влияние Pt на биологические показатели состояния

бурой лесной слабонасыщенной поч-
вы. Снижение исследуемых показате-
лей в большинстве случаев прямо кор-
релировало с концентрацией Pt в почве.
Наиболее чувствительными показателя-
ми были микробиологические показате-
ли и показатели фитотоксичности почв.
Снижение ИПБС бурой лесной слабо-

насыщенной почвы наблюдается при
внесении в почву 0,01 мг/кг Pt и более.
Загрязнение Pt в концентрациях 0,01 и
0,1 мг/кг приводит к нарушению основ-
ных функций бурой лесной почвы.

Более высокое содержание Pt в поч-
ве приводит к нарушению всех функций
почвы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ryan G. Energy management by platinum companies in South Africa: exploring mitigation strategies for reducing the impact of electricity price increases / The 6th International Platinum Conference, 'Platinum – Metal for the Future', The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014, pp. 299 – 308.

2. Богуш И. А., Черкашин В. И. Источники благородных металлов (Au, Pt, Pd) на Северном Кавказе // Литосфера. – 2019. – № 19. – С. 465 – 471. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-3-465-471.

3. Богуш И. А., Рябов Г. В., Бурцев А. А. Колчеданы Северного Кавказа. Перспективы рудоносности Худесского месторождения // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 6 – 16. DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001.

4. Rauch S., Fatoki O. Impact of platinum group element emissions from mining and production activities // Platinum Metals in the Environment. 2015, pp. 19 – 29. DOI: 10.1007/978-3-662-44559-4_2.

5. Almécija C., Cabelo-García A., Wepener V., Prego R. Platinum group elements in stream sediments of mining zones: The Hex River (Bushveld Igneous Complex, South Africa) // Journal of African Earth Sciences. 2017, vol. 129, pp. 934 – 943. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.02.002.

6. Erasmus J. H., Malherbe W., Zimmermann S., Lorenz A. W., Nachev M., Wepener V., Sures B., Smit N. J. Metal accumulation in riverine macroinvertebrates from a platinum mining region // Science of the Total Environment. 2020, vol. 703, article 134738. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134738.

7. Rauch S., Fatoki O. S. Anthropogenic platinum enrichment in the vicinity of mines in the Bushveld Igneous Complex, South Africa // Water, Air, & Soil Pollution. 2013, vol. 224, pp. 1 – 8. DOI: 10.1007/s11270-012-1395-y.

8. Горелкина А. К., Тимошук И. В., Голубева Н. С., Беляева О. В., Михайлова Е. С. Способы снижения воздействия горнодобывающей отрасли на водные экосистемы // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 64 – 75. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_64.

9. 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.

10. Мощенко Д. И., Колесников С. И., Кузина А. А., Меженков А. А., Литвинов Ю. А. Разработка прогнозных картосхем нарушения экосистемных функций почв Центрального Предкавказья и Кавказа при их загрязнении разными концентрациями меди // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5-1. – С. 104 – 116. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_104.

11. Куликова А. А., Овчинникова Т. И. Региональный критерий отнесения горнопромышленных регионов к территориям с наибольшей подверженностью геоэкологическим изменениям // Устойчивое развитие горных территорий. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 27 – 34. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.

12. Zuzolo D., Cicchella D., Doherty A. L., Albanese S., Lima A., De Vivo B. The distribution of precious metals (Au, Ag, Pt, and Pd) in the soils of the Campania Region (Italy) // Journal of Geochemical Exploration. 2018, vol. 192, pp. 33 – 44. DOI: 10.1016/j.gexplo.2018.03.009.

13. Gawrońska H., Przybysz A., Szalacha E., Pawlak K., Brama K., Miszczak A., Stankiewicz-Kosyl M., Gawroński S. W. Platinum uptake, distribution and toxicity in *Arabidopsis thaliana* L. plants // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2018, vol. 147, pp. 982 – 989. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.09.065.

14. Egorova K. S., Sinjushin A. A., Posvyatenko A. V., Eremin D. B., Kashin A. S., Galushko A. S., Ananikov V. P. Evaluation of phytotoxicity and cytotoxicity of industrial catalyst components (Fe, Cu, Ni, Rh and Pd). A case of lethal toxicity of a rhodium salt in terrestrial plants // *Chemosphere*. 2019, vol. 223, pp. 738–747. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.043.
15. Qiang H., Li R., Ju X., Zhu R. Determination of platinum group elements in human urine and hair samples by inductively coupled plasma mass spectrometry / *International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology, IEEE 2012*. 2012, pp. 1318–1321. DOI: 10.1109/iCBEB.2012.134.
16. Kumar P. V., Jelastin Kala S. M., Prakash K. S. Green synthesis derived Pt-nanoparticles using *Xanthium strumarium* leaf extract and their biological studies // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019, vol. 7, no. 3, article 103146. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103146.
17. Lapasam A., Mawnai I. L., Banothu V., Kaminsky W., Kollipara M. R. Ruthenium, rhodium and iridium complexes containing pyrimidine based thienyl pyrazoles: Synthesis and antibacterial studies // *Journal of Organometallic Chemistry*. 2020, vol. 911, article 121155. DOI: 10.1016/j.jor-ganchem.2020.121155.
18. Baartzes N., Jordaan A., Warner D. F., Combrinck J., Taylor D., Chibale K., Smith G. S. Anti-microbial evaluation of neutral and cationic iridium (III) and rhodium (III) aminoquinoline-benzimidazole hybrid complexes // *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2020, vol. 206, article 112694. DOI: 10.1016/j.ejmech.2020.112694.
19. Iavicoli I., Leso V., Beezhold D. H., Shvedova A. A. Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks // *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2017, vol. 329, pp. 96–111. DOI: 10.1016/j.taap.2017.05.025.
20. Schertzinger G., Zimmermann S., Grabner D., Sures B. Assessment of sublethal endpoints after chronic exposure of the nematode *Caenorhabditis elegans* to palladium, platinum and rhodium // *Environmental Pollution*. 2017, vol. 230, pp. 31–39. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.06.040.
21. Zhao X., Han L., Xiao J., Wang L., Liang T., Liao X. A comparative study of the physiological and biochemical properties of tomato (*Lycopersicon esculentum* M.) and maize (*Zea mays* L.) under palladium stress // *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 705, article 135938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135938.
22. Maryška L., Jindrichova B., Siegel J., Zaruba K., Burketova L. Impact of palladium nanoparticles on plant and its fungal pathogen. A case study: *Brassica napus* – *Plenodomus lingam* // *AoB Plants*. 2023, vol. 15, no. 2, plad004. DOI: 10.1093/aobpla/plad004.
23. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Schad P., van Huysteen C., Michéli E. (Eds.). 4th edition, International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.
24. 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.
25. Greenwood N. N., Earnshaw A., Hüchmann K. *Chemie der elemente*, vol. 1. Weinheim, VCH, 1988.
26. Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., Akimenko Yu. V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019, vol. 191, no. 9. DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3.
27. Maboeta M. S., Claassens S., Rensburg P. J. The effects of platinum mining on the environment from a soil microbial perspective // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2006, no. 175, pp. 149–161. DOI: 10.1007/s11270-006-9122-1.
28. Chlumsky O., Purkrtova S., Michova H., Sykorova H., Slepicka P., Fajstavr D., Ulbrich P., Viktorova J., Demnerova K. Antimicrobial properties of palladium and platinum nanoparticles. A new tool for combating food-borne pathogens // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021, vol. 22, no. 15, article 7892. DOI: 10.3390/ijms22157892.
29. Shar S., Reith F., Ball A. S. Shahsavari E. Long-term impact of gold and platinum on microbial diversity in Australian soils // *Microbial Ecology*. 2021, no. 81, pp. 977–989. DOI: 10.1007/s00248-020-01663-x.
30. Тимошенко А. Н., Колесников С. И., Кабакова В. С., Евстегнеева Н. А., Минникова Т. В., Казеев К. Ш., Минкина Т. М. Оценка устойчивости почв к загрязнению наночастицами платины методами биодиагностики // *Почвоведение*. – 2023. – № 8. – С. 997–1006. DOI: 10.31857/S0032180X23600221.

31. Zamulina I. V., Gorovtsov A. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V. Soil organic matter and biological activity under long-term contamination with copper // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022, vol. 44, pp. 387–398. DOI: 10.1007/s10653-021-01044-4.

32. Shar S., Shahsavaria E., Reithc F., Alghamdib O. A., Yamanib H. A., Al Judaibib A., Donnere E., Vasileiadisf S., Ball A. S. Dose-related changes in respiration and enzymatic activities in soils amended with mobile platinum and gold // *Applied Soil Ecology*. 2021, vol. 157, article 103727. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103727.

33. Kotton A., Czaja M. A. Influence of platinum ions on the germination and seedling root growth of different plant species // *Geology Geophysics & Environment*. 2014, vol. 40, pp. 343–348. DOI: 10.7494/geol.2014.40.4.343.

34. Rahman M. S., Chakraborty A., Mazumdar S., Nandi N. C., Bhuiyan M. N. I., Alauddin S. M., Khan I. A., Hossain M. J. Effects of poly(vinylpyrrolidone) protected platinum nanoparticles on seed germination and growth performance of *Pisum sativum* // *Nano-Structures Nano-Objects*. 2020, vol. 21, article 100408. DOI: 10.1016/j.nanoso.2019.100408.

35. Savignan L., Faucher S., Chéry P., Lespes G. Platinum group elements contamination in soils: Review of the current state // *Chemosphere*. 2021, vol. 271, article 129517. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129517.

36. Kolesnikov S., Timoshenko A., Minnikova T., Tsepina N., Kazeev K., Akimenko Y., Shuvaeva V., Rajput V. D., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Dudnikova T., Mazarji M., Zhadobin A., Alamri S., Siddiqui M. H., Singh R. K. Impact of metal-based nanoparticles on cambisol microbial functionality, enzyme activity, and plant growth // *Plants*. 2021, vol. 10, no. 10, article 2080. DOI: 10.3390/plants10102080.

37. Шестопалов В. Л., Фоменко В. А., Соколов А. А., Мирошников А. С. Сравнительный анализ деформационных методов мониторинга сейсмической активности горных районов Черноморского побережья и Камчатки // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2021. — Т. 13. — № 4 (50). — С. 535–543. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.

38. Куликова А. А., Овчинникова Т. И. Региональный критерий отнесения горнопромышленных регионов к территориям с наибольшей подверженностью геоэкологическим изменениям // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 27–34. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.

39. Шабанов М. В., Маричев М. С., Манджиева С. С., Соколов А. А. Формирование хемоземов в условиях длительного воздействия аэропромышленных выбросов горно-металлургического комбината // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 727–740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.

40. Фоменко В. А., Соколов А. А., Лолаев А. Б., Аймбетова И. О. Некоторые результаты работ по оценке эманации радона Унальского хвостохранилища // *Устойчивое развитие горных территорий*. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 576–585. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585. **PLAG**

REFERENCES

1. Ryan G. Energy management by platinum companies in South Africa: exploring mitigation strategies for reducing the impact of electricity price increases. *The 6th International Platinum Conference, 'Platinum – Metal for the Future'*, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014, pp. 299–308.

2. Bogush I. A., Cherkashin V. I. Sources of noble metals (Au, Pt, Pd) in the North Caucasus. *Litosfera*. 2019, no. 19, pp. 465–471. [In Russ]. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-3-465-471.

3. Bogush I. A., Ryabov G. V., Burtsev A. A. Pyrites of the North Caucasus. Prospects of ore-bearing capacity of the Khudessky deposit. *Geology and geophysics of Russian South*. 2021, vol. 11, no. 3, pp. 6–16. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2021.80.87.001.

4. Rauch S., Fatoki O. Impact of platinum group element emissions from mining and production activities. *Platinum Metals in the Environment*. 2015, pp. 19–29. DOI: 10.1007/978-3-662-44559-4_2.

5. Almécija C., Cobelo-García A., Wepener V., Prego R. Platinum group elements in stream sediments of mining zones: The Hex River (Bushveld Igneous Complex, South Africa). *Journal of African Earth Sciences*. 2017, vol. 129, pp. 934–943. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.02.002.

6. Erasmus J. H., Malherbe W., Zimmermann S., Lorenz A. W., Nachev M., Wepener V., Sures B., Smit N. J. Metal accumulation in riverine macroinvertebrates from a platinum mining region. *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 703, article 134738. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134738.

7. Rauch S., Fatoki O. S. Anthropogenic platinum enrichment in the vicinity of mines in the Bushveld Igneous Complex, South Africa. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2013, vol. 224, pp. 1–8. DOI: 10.1007/s11270-012-1395-y.
8. Gorelkina A. K., Timoshchuk I. V., Golubeva N. S., Belyaeva O. V., Mikhailova E. S. Reduction of impact of mining on water ecosystems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 7, pp. 64–75. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_64.
9. 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, no. 5-1, pp. 73–85. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_73.
10. Moshchenko D. I., Kolesnikov S. I., Kuzina A. A., Mezhenkov A. A., Litvinov Yu. A. Prognostic map charts of ecosystem functioning violation in soil in the Central Ciscaucasia and the Caucasus in contamination with different copper concentrations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5-1, pp. 104–116. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_104.
11. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. A regional criterion for classifying mining regions as territories with the greatest exposure to geoecological changes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 27–34. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.
12. Zuzolo D., Cicchella D., Doherty A. L., Albanese S., Lima A., De Vivo B. The distribution of precious metals (Au, Ag, Pt, and Pd) in the soils of the Campania Region (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*. 2018, vol. 192, pp. 33–44. DOI: 10.1016/j.gexplo.2018.03.009.
13. Gawrońska H., Przybysz A., Szalacha E., Pawlak K., Brama K., Miszczak A., Stankiewicz-Kosyl M., Gawroński S. W. Platinum uptake, distribution and toxicity in *Arabidopsis thaliana* L. plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018, vol. 147, pp. 982–989. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.09.065.
14. Egorova K. S., Sinjushin A. A., Posvyatenko A. V., Eremin D. B., Kashin A. S., Galushko A. S., Ananikov V. P. Evaluation of phytotoxicity and cytotoxicity of industrial catalyst components (Fe, Cu, Ni, Rh and Pd). A case of lethal toxicity of a rhodium salt in terrestrial plants. *Chemosphere*. 2019, vol. 223, pp. 738–747. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.02.043.
15. Qiang H., Li R., Ju X., Zhu R. Determination of platinum group elements in human urine and hair samples by inductively coupled plasma mass spectrometry. *International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology, IEEE 2012*. 2012, pp. 1318–1321. DOI: 10.1109/iCBEB.2012.134.
16. Kumar P. V., Jelastin Kala S. M., Prakash K. S. Green synthesis derived Pt-nanoparticles using *Xanthium strumarium* leaf extract and their biological studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019, vol. 7, no. 3, article 103146. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103146.
17. Lapasam A., Mawnai I. L., Banothu V., Kaminsky W., Kollipara M. R. Ruthenium, rhodium and iridium complexes containing pyrimidine based thienyl pyrazoles: Synthesis and antibacterial studies. *Journal of Organometallic Chemistry*. 2020, vol. 911, article 121155. DOI: 10.1016/j.jor-ganchem.2020.121155.
18. Baartzes N., Jordaan A., Warner D. F., Combrinck J., Taylor D., Chibale K., Smith G. S. Antimicrobial evaluation of neutral and cationic iridium (III) and rhodium (III) aminoquinoline-benzimidazole hybrid complexes. *European Journal of Medicinal Chemistry*. 2020, vol. 206, article 112694. DOI: 10.1016/j.ejmech.2020.112694.
19. Iavicoli I., Leso V., Beezhold D. H., Shvedova A. A. Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2017, vol. 329, pp. 96–111. DOI: 10.1016/j.taap.2017.05.025.
20. Schertzinger G., Zimmermann S., Grabner D., Sures B. Assessment of sublethal endpoints after chronic exposure of the nematode *Caenorhabditis elegans* to palladium, platinum and rhodium. *Environmental Pollution*. 2017, vol. 230, pp. 31–39. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.06.040.
21. Zhao X., Han L., Xiao J., Wang L., Liang T., Liao X. A comparative study of the physiological and biochemical properties of tomato (*Lycopersicon esculentum* M.) and maize (*Zea mays* L.) under palladium stress. *Science of the Total Environment*. 2020, vol. 705, article 135938. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135938.
22. Maryška L., Jindrichova B., Siegel J., Zaruba K., Burketova L. Impact of palladium nanoparticles on plant and its fungal pathogen. A case study: *Brassica napus* – *Plenodomus lingam*. *AoB Plants*. 2023, vol. 15, no. 2, plad004. DOI: 10.1093/aobpla/plad004.
23. *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. Schad P., van Huysteen C., Michéli E. (Eds.). 4th edition, International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 234 p.

24. 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.
25. Greenwood N. N., Earnshaw A., Hückmann K. *Chemie der elemente*, vol. 1. Weinheim, VcH, 1988.
26. Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., Akimenko Yu. V. Development of regional standards for pollutants in the soil using biological parameters. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2019, vol. 191, no. 9. DOI: 10.1007/s10661-019-7718-3.
27. Maboeta M. S., Claassens S., Rensburg L. V., Rensburg P. J. The effects of platinum mining on the environment from a soil microbial perspective. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2006, no. 175, pp. 149 – 161. DOI: 10.1007/s11270-006-9122-1.
28. Chlumsky O., Purkrtova S., Michova H., Sykorova H., Slepicka P., Fajstavr D., Ulbrich P., Viktorova J., Demnerova K. Antimicrobial properties of palladium and platinum nanoparticles. A new tool for combating food-borne pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021, vol. 22, no. 15, article 7892. DOI: 10.3390/ijms22157892.
29. Shar S., Reith F., Ball A. S. Shahsavari E. Long-term impact of gold and platinum on microbial diversity in Australian soils. *Microbial Ecology*. 2021, no. 81, pp. 977 – 989. DOI: 10.1007/s00248-020-01663-x.
30. Timoshenko A., Kolesnikov S., Kabakova V., Evstegneeva N., Minnikova T., Kazeev K., Minkina T. Assessment of soil tolerance towards contamination with platinum nanoparticles by biodiagnostic methods. *Eurasian Soil Science*. 2023, no. 8, pp. 997 – 1006. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0032180X23600221.
31. Zamulina I. V., Gorovtsov A. V., Minkina T. M., Mandzhieva S. S., Burachevskaya M. V., Bauer T. V. Soil organic matter and biological activity under long-term contamination with copper. *Environ Geochem Health*. 2022, vol. 44, pp. 387 – 398. DOI: 10.1007/s10653-021-01044-4.
32. Shar S., Shahsavaria E., Reith F., Alghamdib O. A., Yamanib H. A., Al Judaibib A., Donnere E., Vasileiadis S., Ball A. S. Dose-related changes in respiration and enzymatic activities in soils amended with mobile platinum and gold. *Applied Soil Ecology*. 2021, vol. 157, article 103727. DOI: 10.1016/j.apsoil.2020.103727.
33. Kotton A., Czaja M. A. Influence of platinum ions on the germination and seedling root growth of different plant species. *Geology Geophysics & Environment*. 2014, vol. 40, pp. 343 – 348. DOI: 10.7494/geol.2014.40.4.343.
34. Rahman M. S., Chakraborty A., Mazumdar S., Nandi N. C., Bhuiyan M. N. I., Alauddin S. M., Khan I. A., Hossain M. J. Effects of poly(vinylpyrrolidone) protected platinum nanoparticles on seed germination and growth performance of *Pisum sativum*. *Nano-Structures Nano-Objects*. 2020, vol. 21, article 100408. DOI: 10.1016/j.nanoso.2019.100408.
35. Savignan L., Faucher S., Chéry P., Lespes G. Platinum group elements contamination in soils: Review of the current state. *Chemosphere*. 2021, vol. 271, article 129517. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129517.
36. Kolesnikov S., Timoshenko A., Minnikova T., Tsepina N., Kazeev K., Akimenko Y., Shuvaeva V., Rajput V. D., Mandzhieva S., Sushkova S., Minkina T., Dudnikova T., Mazarji M., Zhadobin A., Alamri S., Siddiqui M. H., Singh R. K. Impact of metal-based nanoparticles on cambisol microbial functionality, enzyme activity, and plant growth. *Plants*. 2021, vol. 10, no. 10, article 2080. DOI: 10.3390/plants10102080.
37. Shestopalov V. L., Fomenko V. A., Sokolov A. A., Miroshnikov A. S. Comparative analysis of deformation methods for monitoring seismic activity in the mountainous regions of the Black Sea coast and Kamchatka. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4 (50), pp. 535 – 543. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-535-543.
38. Kulikova A. A., Ovchinnikova T. I. A regional criterion for classifying mining regions as territories with the greatest exposure to geoecological changes. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 27 – 34. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-27-34.
39. Shabanov M. V., Marichev M. S., Mangiyeva S. S., Sokolov A. A. Chemozem formation under conditions of prolong exposure to aero-industrial emissions from a mining and smelting plant. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 3. [In Russ], pp. 727 – 740. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-727-740.

40. Fomenko V. A., Sokolov A. A., Lolaev A. B., Aimbetova I. O. Some results of the work on the evaluation of radon emanations at Unal tailings. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 4, pp. 576–585. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-576-585.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Тимошенко Алена Николаевна*¹ — канд. биол. наук,
ведущий научный сотрудник,

e-mail: aly9215@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5733-8796,

*Колесников Сергей Ильич*² — д.с.-х.н.,

профессор, зав. кафедрой,

e-mail: kolesnikov@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5860-8420,

*Евстегнеева Наталья Андреевна*¹ — аспирант,

e-mail: evstegneeva@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-3133-7629,

*Минникова Татьяна Владимировна*¹ — канд. биол. наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: loko261008@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9453-7137,

ORCID ID: 0000-0001-5589-2171,

*Казеев Камиль Шагидуллович*² — д-р геогр. наук,

профессор, директор, e-mail: kamil_kazeev@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0252-6212,

¹ Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского,

Южный федеральный университет.

Для контактов: Тимошенко А.Н., e-mail: aly9215@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.N. Timoshenko*¹, Cand. Sci. (Biol.),

Leading Researcher, e-mail: aly9215@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-5733-8796,

*S.I. Kolesnikov*², Dr. Sci. (Agr.), Professor,

Head of Chair, e-mail: kolesnikov@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5860-8420,

*N.A. Evstegneeva*¹, Graduate Student,

e-mail: evstegneeva@sfedu.ru,

ORCID ID: 0000-0003-3133-7629,

*T.V. Minnikova*², Cand. Sci. (Biol.),

Leading Researcher, e-mail: loko261008@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9453-7137,

ORCID ID: 0000-0001-5589-2171,

*K.Sh. Kazeev*², Dr. Sci. (Geogr.), Professor,

Director, e-mail: kamil_kazeev@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0252-6212,

¹ D.I. Ivanovsky Academy of Biology and Biotechnology,

Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russia.

Corresponding author: A.N. Timoshenko, e-mail: aly9215@mail.ru.

Получена редакцией 15.01.2024; получена после рецензии 22.02.2024; принята к печати 10.04.2024.

Received by the editors 15.01.2024; received after the review 22.02.2024; accepted for printing 10.04.2024.