

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 504.75+691.4; 504.4.54

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-24-36>

О жизнеспособности складированных отходов переработки сульфидных руд на ранних стадиях почвообразования

Валентина Сергеевна Артамонова¹, Светлана Борисовна Бортникова²

¹ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геодезии им. А.А. Трофимука, Новосибирск, Россия

¹ artamonovavs@yandex.ru, artamonova@issa-siberia.ru

² bortnikovasb@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье рассматривается жизнеспособность техногенных отходов многолетних хвостохранилищ и насыпных отходов обогащения золотосодержащих руд на ранних стадиях почвообразования для овса посевного и азотфиксирующих микроорганизмов, с целью обоснования использования их в экологически безопасной консервации поверхности. Установлено, что в почвоподобных средах присутствуют многие металлы и металлоиды в подвижной форме, образуя вторичные сульфаты, основной из которых гипс. Представлены новые данные о транслокации химических элементов в корнях и ростках овса посевного, о развитии в техногенных условиях колонизирующих фото- и гетеротрофных микроорганизмов. Сообщается, что наиболее жизнеспособной для растений и микроорганизмов оказались среды обитания с веществом отходов при нейтральных значениях кислотности, сухой вес проростков в этих пробах был существенно выше, чем на фоне кислых. С помощью электронной микроскопии установлены факты фоссилзации жизнедеятельных цианобактерий и водорослей. Полученная информация может быть использована при характеристике первичного почвообразования и современных механизмов биогенного концентрирования металлов в условиях техногенеза, учтена при обосновании и разработке природоподобных технологий экологически безопасной консервации сульфидсодержащих отходов агломерации руд.

Ключевые слова: техногенные отходы, почвообразование, рекультивация, растения, микроорганизмы

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственной темы ИПА СО РАН (FWGR-2021-0005, проект 121.031.700.316-9) и ИНГГ СО РАН (FWZZ-2022-0028) по бюджетному финансированию Министерства науки и образования Российской Федерации.

Для цитирования: Артамонова В.С., Бортникова С.Б. О жизнеспособности складированных отходов переработки сульфидных руд на ранних стадиях почвообразования // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 24-36. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-24-36>

SECTION 2. POLLUTION

Original paper

On the viability of stored waste from processing sulfide ores during the early stages of soil formation

Valentina Sergeevna Artamonova¹, Svetlana Borisovna Bortnikova²

¹ Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geodesy, Novosibirsk, Russia

¹ artamonovavs@yandex.ru, artamonova@issa-siberia.ru

² bortnikovasb@ipgg.sbras.ru

Abstract. The article considers the viability of man-made waste from long-term tailings and bulk waste from the enrichment of gold-bearing ores in the early stages of soil formation for oats and nitrogen-fixing microorganisms, in order to justify their use in environmentally safe surface conservation. It has been established that many metals and metalloids are present in mobile form in soil-like environments, forming secondary sulfates, the main of which is gypsum. New data on the translocation of chemical elements in the roots and sprouts of oats, on the development of colonizing photo- and heterotrophic microorganisms in technogenic conditions are presented. It is reported that habitats with waste matter turned out to be the most viable for plants and microorganisms at neutral acidity values, the dry weight of seedlings in these samples was significantly higher than against the background of acidic ones. The facts of fossilization of vital cyanobacteria and algae have been established using electron microscopy. The information obtained can be used to characterize

primary soil formation and modern mechanisms of biogenic concentration of metals in conditions of technogenesis, taken into account in the justification and development of nature-like technologies for the environmentally safe conservation of sulfide-containing waste from ore agglomeration.

Keywords: man-made waste, soil formation, reclamation, plants, microorganisms

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state IPA SB RAS and IPGG SB RAS (FWZZ-2022-0028) on budget financing of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation.

For citation: Artamonova, V., Bortnikova, S., 2024. On the viability of stored waste from processing sulfide ores during the early stages of soil formation // *Anthropogenic Transformation of Nature*. 10(1). pp. 24-36. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-24-36> (in Russian)

Введение

Насыпные отвалы и осушенные хвостохранилища сульфидных отходов обогащения полиметаллических золотосодержащих руд присутствуют на территории рудных полей Кемеровской области с прошлого века. Колонизирующая высшая растительность представлена на их поверхности единичными видами, что не препятствует транзиту с воздушными и водными потоками мелкодисперсных фракций отходов, содержащих потенциально токсичные элементы в составе вторичных соединений, а также ценные компоненты, в частности – благородные металлы.

Доказано, что в отходах обогащения золотосодержащих полиметаллических руд интенсивное окисление техногенного вещества на открытом воздухе обуславливает переход структурных и поверхностно-связанных микро- и ультрадисперсных фракций металлов в водорастворимые и ионообменные формы – до 17% [11]. Они наиболее уязвимы в период проявления водной и ветровой эрозии, по окончании которой обнажёнными оказываются горизонты, находящиеся до этого в захороненном виде где, например, золото, находилось большей частью в виде интерметаллида систем Au-Cu, Au-Ag, Au-Ag-Cu, в составе сульфосолей, теллуридов, антимонидов, висмутидов, сульфосоединений [4]. В тиосульфатных, гиросульфидных и гидроксокомплексах благородных металлов обеспечивает формирование высокопробных золотин, вплоть до 973%. Помимо этого, регистрируется вторичное образование минералов, содержащих Au, Fe, Pb, Cu и новообразование Ag [23]. В аэробных условиях они окисляются, образуя растворимые формы золота и других сидерофильных металлов, которые подвергаются поверхностному сносу и частичному перемещению в толщу отвалов.

В настоящее время спрос на промышленное извлечение мелкозернистых фракций золота (размером < 1-2 мм) из техногенных отходов растёт, поскольку в стране ежегодно снижаются запасы золотосодержащего минерального сырья [22]. Техногенные отходы рассматриваются как основной сырьевой ресурс благородного металла после коренных руд и россыпных месторождений. В 2010 г. ресурсный потенциал золота техногенных отходов оценивался в 50-60% добытого в России [14]. В этой связи, сохранение отходов переработки золотосодержащих руд требует разработки технологий их экологической консервации. Создание задержанных участков на техногенных отходах предписывается нормативными требованиями для земель консервационного направления рекультивации [7]. Использование природоподобных технологий зелёной рекультивации, в том числе задернения, предполагает снижение миграции металлов с водными и ветровыми

потоками. Задернение – один из видов рекультивации ландшафта, он обеспечивает создание почвопокровных травяных ценозов на спланированной поверхности нарушенных (оголенных) земель, отвалов, выработанных и стеррассированных откосов.

Медленные темпы естественного фитозаселения поверхности хранилищ происходят в основном по причине присутствия в техногенном веществе водорастворимых форм тяжёлых металлов, в том числе Cu, Zn, Pb, а также вторичных минералов, преимущественно сульфата кальция [23]. В настоящее время запасы серы в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий Сибири промышленно значимы (около 1/3 сульфатной серы добывается микробиологическим способом) [15]. Следовательно, для экологической консервации насыпных отвалов и хвостохранилищ априори могут быть пригодными почвопокровные растения, не требовательные к почвенному плодородию, толерантные к кислотности, экотоксикантам и гипсу.

Таким требованиям отчасти соответствует овёс посевной. Ему присуще развитие мощной мочковатой корневой системы, преимущественно в верхнем слое (до 80-90%). Корни овса проникают на глубину 70–80 см, а в период формирования зерна – до 2 м. Корневая система растения представляет собой разветвлённую нитеобразную массу общей протяжённостью до 47 м. Известно, что формирование узловых корней овса посевного начинается через 7-10 дней после появления всходов. Даже после засушливой весны, при наличии в июне дождей, растения способны в летний период продолжать куститься, образовывать узловы корни. Помимо этого, для овса характерна способность к самоопылению (перекрёстное опыление не превышает 2%), что обеспечивает пространственное расселение овса. В сельскохозяйственной практике Нечернозёмной зоны овёс высевают в качестве первой культуры на вновь освоенных землях – раскорчёвках, осушенных болотах, торфяниках, после вырубков, а также применяют для сидерации малоплодородных почв. Возможности использования овса для ускорения почвообразования на техногенных отходах и для их консервации изучены недостаточно. В этой связи, была поставлена цель – исследовать пригодность олиготрофной почвоподобной среды обитания в поверхностной толще техногенных отходов для проростков овса посевного, а также для фото- и гетеротрофных азотфиксирующих бактерий, обеспечивающих пополнение необходимого биогенного азота, особенно востребованного на начальных стадиях роста овса.

Материалы и методы исследования

Объекты. Исследование проводилось с веществом разновозрастных хвостохранилищ обогащения руд

(Талмовские Пески, Дюков лог) и насыпных отвалов (Белоключевской, Урской, Бериккульский) (рис. 1 / fig. 1). Расположены техногенные объекты в пределах Кемеровской области [3]. Выбор проб осуществлялся с учётом разнообразия их минералого-геохимической характеристики.

Хвостохранилища отходов переработки руд Салаирского рудного поля.

1. Талмовские Пески – первое хвостохранилище Салаирского ГОКа. Переработка руд производилась на Золотоизвлекательной фабрике методами гравитации,

цианирования и флотации с 1932 по 1942 гг. В настоящее время хвостохранилище представляет собой ленту техногенных песков шириной ~ 30 м протяжённостью ~ 7 км, находящуюся вблизи реки Малая Талмовая. Мощность песков не превышает 3 м. Масса техногенного образования соответствует ~1 млн. т. Содержание сульфидов (пирит, сфалерит, галенит) не превышает 6 – 7 %, карбонатов (кальцит, доломит) – около 10 %. Пробы взяты с поверхностной толщи (0-20 см) на участках с веществом разной кислотности: (точки 1 и 2 соответственно).

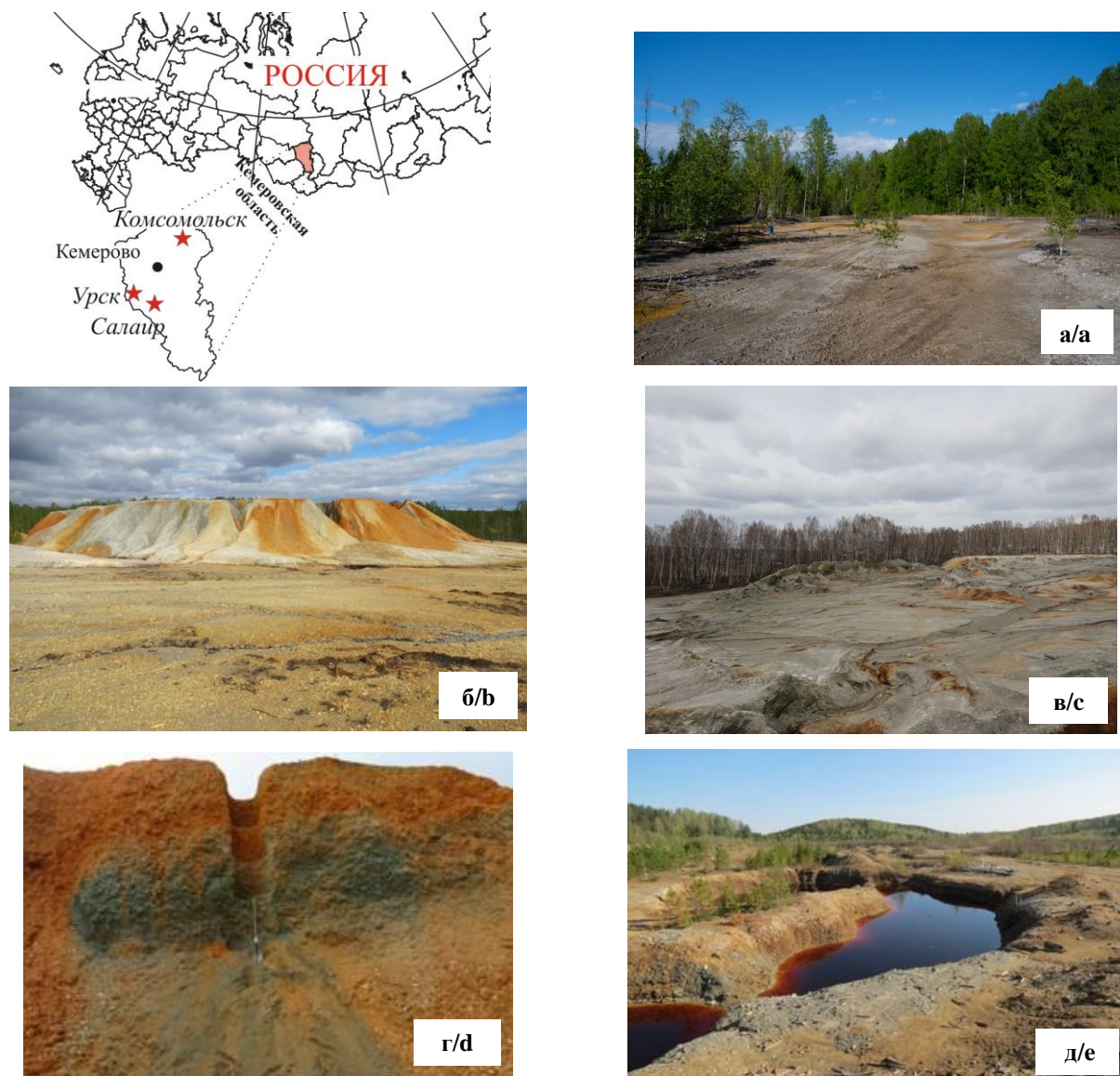


Рис. 1. Географическое положение объектов исследования и внешний вид: а – Талмовские Пески; б - Урской отвал кварц-баритовой сыпучки; в - Урской отвал кварц-пиритовой сыпучки; г – Белоключевской отвал; д – Бериккульский отвал

Fig. 1. Geographical position of study objects and total overview: a – Talmovskye Sands; b – Ursk dump, quartz-barite sands; c – Ursk dump, quartz-pyrite sands; d – Belocluch dump; e – Berikul dump

2. Хвостохранилище Дюков лог вмещает отходы обогащения и переработки руды на Золотообогатительной фабрике из зоны окисления месторождений, состоит из сильноизменённых пород и минералов. Оно заполнялось в 1967-1975 гг. Масса отходов достигает 1.5 млн. т. Сульфидным минералам принадлежит

около 5 %, в них лидирует пирит, за ним следует галенит и сфалерит, реже встречается халькопирит. Доля карбонатов составляет 2-3 %. Пробы для экспериментов отобраны с верхних горизонтов хвостохранилища, характеризующихся различающимся составом, кислотностью и степенью окисленности – точки (т. 3, 4, 5).

Насыпные отвалы на территории Урского рудного

поля.

1. Белоключевской отвал сформирован в 30-40-х гг. прошлого века из отходов цианирования руд из зоны окисления одноимённого месторождения, расположен в пос. Урск. Масса отходов достигает 400 тыс. т. Характерной особенностью отвала является переслаивание контрастных по составу горизонтов кварц-баритовой и кварц-пиритовой сыпучек. В первой сыпучке содержание сульфидов составляет 2-4%, во второй – 25%. Доля карбонатов в том и другом случае не превышает 0.5 %. Пробы для анализа отобраны с вершины отвала (т. 6, кварц-баритовая рыжая сыпучка) и из среднего горизонта разреза (т. 7, кварц-пиритовая сыпучка голубовато-серого цвета).

Урской отвал образован в 30-40-е гг. прошлого века, представлен отходами цианирования кварц-баритовой и кварц-пиритовой сыпучек Ново-Урского месторождения, которые складировались по отдельности в две насыпи в пойме ручья. Их высота составляет 10 - 20 м. Масса отвала около 400 т. По составу насыпи аналогичны Белоключевскому отвалу. Отбор проб производился из отвала кварц-баритовой сыпучки (т. 8) и остатков второго отвала, состоящего из отходов нижней части зоны окисления – кварц-пиритовой сыпучки (т. 9).

2. Берикульский отвал расположен в пос. Комсомольск в Кузнецком Алатау, состоит из отходов цианирования сульфидного флотоконцентрата золотоизвлекательного завода, перерабатывавшего руды Старо-Берикульского месторождения. Масса отвала 100 т. Содержание сульфидов в отходах цианирования флотоконцентрата достигало 25 %. Отбор проб производился с поверхности из закопашек гл. 20-30 см. (тт. 10, 11).

Для исследований были использован мелкозём отквартированных (квартирование – разделение на навески гомогенизированной пробы) образцов, отличающихся визуально по степени окисленности техногенного вещества.

Характеристика вещества. Для определения кислотности сред обитания проводили измерения значений pH в пастах (твердое/вода = 2/1) pH/T-метром HI 9025 C, HANNA Instruments, США. Водные вытяжки для определения концентраций подвижных форм элементов были приготовлены в соотношении твердое/вода = 1/10, в них также замерены значения pH. Микроэлементный состав вытяжек определялся методом ИСП-МС на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США).

Биологический материал. Использованы для испытаний проростки овса посевного *Avena sativa* L. Предпочтение овсу посевному в нашем исследовании было не случайным. Он включён в Национальный стандарт РФ, в котором овёс предложен в качестве тест-объекта для определения воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост высших растений на ранних стадиях развития [8]. Овёс также присутствует в нормативном документе для снижения вредоносности отходов с целью экологической консервации [6].

Помимо этого, овёс посевной обладает большим адаптационным потенциалом, метаболической активностью в широком диапазоне реакции среды (от среднекислой до сильнощелочной). Будучи сидератом,

овёс способен вовлекать гипс (сульфат кальция) в качестве источника питания Ca и сульфатов. В свою очередь, гипс повышает устойчивость растений к возбудителям и вредителям, помогает впитывать влагу в корнеобитаемом слое, которая требуется при прорастании семян в количестве около 60% от их веса. Сидеральные функции овса большие, важную роль в их реализации играет синтез авеноцина – антибиотика, способствующего защите от атаки и инфицирования микробиотами [19]. Помимо этого, овёс посевной способен растворять и усваивать труднодоступные фосфаты, благодаря синтезу в процессе дыхания ряда органических кислот, которые выделяются за пределы корней. В условиях дефицита доступного фосфора они растворяют связанные формы металла. Этот механизм носит приспособительный характер. Установлена адаптация двухнедельных проростков овса посевного к росту на фоне присутствия тяжёлых металлов: Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd [12].

Транслокация металлов внутрь проростков активизирует активность пигментов фотосинтеза, флавоноидов, каталазы и пероксидазы в условиях разных уровней загрязнения. Во взрослых растениях тяжёлые металлы обнаружены в стеблях, корнях и зерне [18]. В корнях регистрировались наибольшие количества Hg, Pb, Cd, Cr, в надземной части – Zn, Ni, Cu, Co. Клетки корней овса имеют устойчивую к действию алюминия плазмолемму, наряду с активным подщелачиванием среды интенсивно выделяют вещества, хелатирующие и осаждающие металл. Сульфаты обеспечивают усиленное поглощение Al на ранних этапах онтогенеза, тем самым запуская механизмы его нейтрализации [9]. Отрицательное действие высокой кислотности на жизнедеятельность и продуктивность растений овса проявляется на фоне повышенной растворимости соединений алюминия, железа и марганца [17].

Всё вышеизложенное предопределило исследование пригодности вещества техногенных отходов на ранних стадиях почвообразования для проростков овса. Испытания проводили в лабораторных условиях, проанализировано 25 проростков (в 5-кратной повторности), предварительно выращенных на мелкозёме в чашках Петри с учётом рекомендации о целесообразности использования не менее 100 штук [20]. Максимальную длину корней и высоту ростков овса учитывали через 7 суток [5]. Затем корни и надземную часть высушивали (по отдельности), после чего взвешивали. В сухой массе (после озоления) определяли содержание химических элементов методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) (ПНИЛ «Вода» ГГХ ИШПР ТПУ). Содержание химических элементов, приведенное в работе, соответствует средним арифметическим показателям, стандартные ошибки которых не превышают 5-10 %. Содержание органического углерода (в 3-х кратной повторности) определяли методом Тюрина в лаборатории географии и генезиса почв ИПА СО РАН общепринятым в почвоведении методом.

Присутствие жизнедеятельных гетеротрофных бактерий (азотобактера) регистрировали по фактам обростания ими мелкозёма, размещённого на поверхности твёрдой среды Эшби согласно методу комочков, традиционному в микробиологии [10, 26]. В 5 чашек

Петри на агаризованную среду раскладывали мелкозём в количестве 50 комочков в каждую. Появление обрастаний бактерии регистрировали через 12, 24, 36, 48, 60 часов, поскольку сроки обрастания почв, приводимые в литературе, разнятся от 1 суток до 7 [20, 21]. Для сравнительной оценки заселённости (встречаемости) мелкозёма каждой пробы азотобактером определяли процент обрастания комочков [21]. Выявление жизнедеятельных и фоссилизированных цианобактерий и водорослей осуществляли с помощью световой и электронной микроскопии.

Содержание органического углерода (в 3-х кратной

повторности) определяли по методу Тюрина в лаборатории географии и генезиса почв ИПА СО РАН.

Результаты и обсуждение

Пробы, взятые с поверхности многолетних насыпных отвалов и хвостохранилищ отходов переработки золотосодержащих руд, содержали широкий набор химических элементов в окисленных и неокисленных субстратах. Содержание сульфатной серы, железа, мышьяка, кадмия, обнаружено в максимальном количестве в неокисленных субстратах, особенно насыпных отвалов (табл. 1. / tabl. 1)

Таблица 1

Физико-химические показатели мелкозёма отходов переработки руд: в твердом веществе $C_{орг}$ - $S_{сульфат}$ в %, Cu – As в г/т; в вытяжках SO_4^{2-} - Zn в мг/л, Pb – Ni в мкг/л

Table 1

Physico-chemical parameters of fine-grained tailings from processing of ores: in solid substance $C_{орг}$ - $S_{сульфат}$ in %, Cu – As in ppm; in water extracts SO_4^{2-} - Zn, Pb – Ni in $\mu\text{g/l}$

Показатель // Indicator	Номер пробы // Sample number										
	1 ТПШ1-1	2 ТПШ4-1	3 ДЛ1-0	4 ДЛ1-1	5 ДЛ2-1	6 БКЧох	7 БКЧпох	8 УрБар	9 УрПир	10 Бер-1	11 Бер-3
Твердое вещество / Solid matter											
$C_{орг}$ // $C_{орг}$	0,46	0,69	0,74	0,37	1,44	2,44	0,6	0,43	1,40		1,91
SiO_2	39,3	42,1	85,4	62,9	44,7	69,5	49,2	77,1	23,4	50,8	18,0
$Fe_2O_3^*$	8,17	4,57	2,91	4,63	4,73	4,24	15,66	7,50	17,79	11,5	31,1
CaO	1,49	4,57	0,22	2,43	9,19	0,12	0,14	0,12	0,05	5,27	5,42
$S_{сульфат}$	9,1	5,26	1,49	3,47	9,19	7,7	7,4	1,35	16,2	1,42	10,0
Cu	220	480	370	73	460	79	770	270	620	42	750
Zn	680	7600	650	270	8400	62	110	110	320	150	330
Pb	3300	2400	2000	470	4500	1500	2000	1800	3100	370	4300
Cd	1,1	30	2,0	0,71	33	0,19	0,42	0,15	1,2	0,45	0,48
As	180	94	120	270	440	370	630	390	380	5600	8100
Водные вытяжки / Water extracts											
pH	3,26	7,66	7,06	3,16	7,37	2,95	2,82	3,56	2,83	4,76	4,51
SO_4^{2-}	620	46	6,9	720	7,5	7400	1900	170	1300	110	4600
Mg	9,8	8,3	0,40	9,3	0,91	9,5	2,5	9,7	1,5	4,3	49
Fe	9,5	0,078	0,23	0,56	0,47	3000	520	0,7	480	11	1500
Al	13	0,028	0,14	1,7	0,18	73	15	13	18	0,92	140
Cu	1,2	0,018	0,014	0,049	0,065	3,9	1,3	0,2	0,63	0,17	8,7
Zn	16	0,52	0,069	0,78	1,0	1,7	0,73	0,47	0,96	0,25	10
Pb	17	52	91	72	380	37	1000	3,2	2600	2,4	0,90
Cd	48	9,0	0,24	4,8	1,5	1,5	3,5	0,75	1,7	6,1	190
As	2,9	15	3,3	1,6	53	1900	15000	0,8	1800	50	87000
Sb	1,5	3,2	0,77	0,54	28	7,6	1300	0,57	47	1,5	12
Co	9,5	0,25	0,11	4,9	0,71	9,9	39	3,3	22	12	650
Ni	31	0,61	0,33	13	2,5	24	39	33	22	13	890

В водных вытяжках содержание сульфатов, металлов и металлоидов изменяется в широких пределах, свидетельствуя о большой разнице в концентрации подвижных форм элементов. Анализ заселённости техно-

генных отходов азотфиксирующей гетеротрофной бактерией – *Azotobacter chroococcum* показал, что в таких условиях вегетативные клетки делятся разными темпами (рис. 2 / fig. 2)

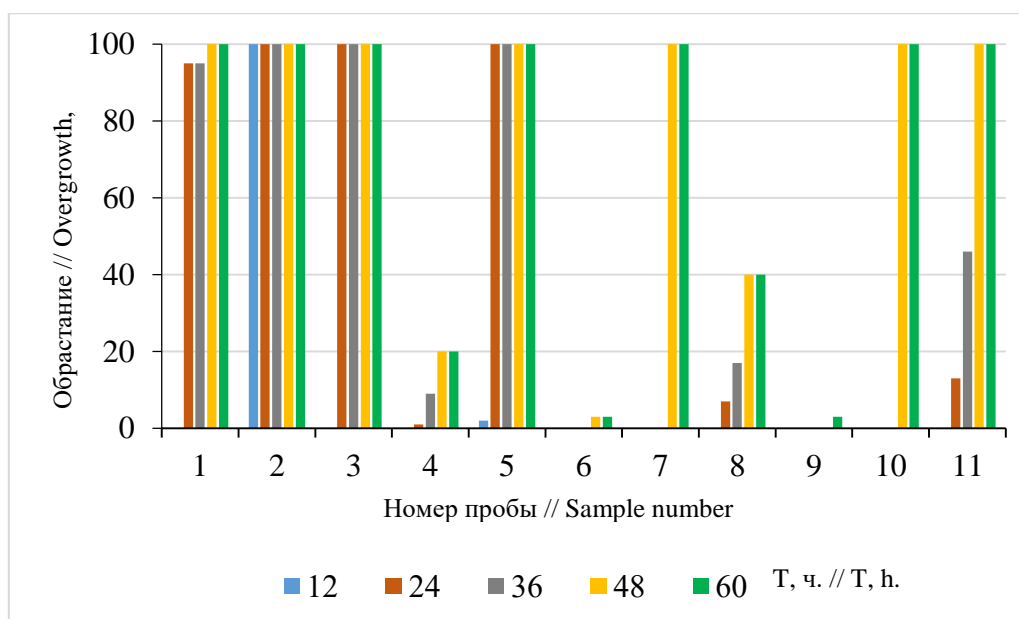


Рис. 2. Средние значения числа обросших комочков мелкозёма техногенных отходов колониями азотобактера за 12-60 часов (n=150)*

* **Примечание.** Талмовские Пески: 1 – окисленное вещество, поверхность; 2 – рыжевато-серый слой с остаточными сульфидами; Дюков лог: 3 – верхний горизонт, слабоокисленное вещество; 4 – рыжее окисленное вещество; 5 – рыжевато-серый слой с преобладанием песчаной фракции; Белоключевской отвал: 6 – кварц-баритовая сыпучка; 7 – кварц-пиритовая сыпучка; Урской отвал: 8 – кварц-баритовая сыпучка; 9 – кварц-пиритовая сыпучка; Берикольский отвал: 10 – верхний горизонт, окисленное вещество; 11 – высокосульфидный слой. По оси ординат - % обрастания проб мелкозёма. По оси абсцисс - время обрастания проб мелкозёма: ряд 1 – 12 час., ряд 2 – 24 час., ряд 3 – 36 час., ряд 4 – 48 час., ряд 5 – 60 час.

Fig. 2. Average values of the number of overgrown lumps of fine-grained tailings by colonies of azotobacter in 12-60 hours (n=150)*

* **Note.** Talmovskye Sands: 1 – oxidized substance, surface; 2 – reddish-gray layer with residual sulfides; Dukov Log: 3 – upper horizon, weakly oxidized substance; 4 – reddish oxidized substance; 5 – reddish-gray layer with a predominance of the sand fraction; Belocluch dump: 6 – quartz-barite sands; 7 – quartz-pyrite sands; Ursk dump: 8 – quartz-barite sands; 9 – quartz-pyrite sands; Berikul dump: 10 – surface, oxidized substance; 11 – high sulfide layer.

Наиболее высокая заселённость мелкозёма бактерией выявлена на участках хвостохранилища Талмовские Пески и Дюков лог с нейтральной средой, которая наиболее приближена к оптимальным значениям азотфиксации бактерии (пробы 2, 3, 5; pH пасты – 6,95, 7,63, 6,64, соответственно), где 100%-ное обрастание проб мелкозёма наблюдалось через 12 и 24 ч инкубации (рис. 2 / fig. 2). Кислая среда Берикольского отвала (пробы 10, 11; pH пасты – 4,95 и 3,81, соответственно) препятствовала быстрому заселению мелкозёма бактерией – 100%-ное обрастание произошло только после 48 часов. В ультракислой среде на участке Дюкового лога, Урского и Белоключевского отвалов (пробы 4, 6 – 9; pH пасты: 0,64 – 2,27) полное обрастание мелкозёма было достигнуто только в одном случае – в мелкозёме Белоключевской кварц-баритовой сыпучки через 48 часов, в остальных случаях колониеобразование осталось на низком уровне за все время эксперимента.

Развитию гетеротрофной бактерии в мелкозёме окисленного участка хвостохранилища Талмовские

Пески способствует присутствие органической пищи, о чём свидетельствуют значения органического углерода (табл. 1 / tabl. 1). Продуцентами органического вещества были слизистые нитчатые цианобактерии: *Microcystis aeruginosa* Kützinger, *Microcoleus vaginatus* (Vauch.) Gom., *M. tennerimus* Gom., виды рода *Phormidium* и другие, а также зелёные водоросли р. *Scenedesmus*, диатомовые водоросли – *Surirella helvetica* Brun., виды р. *Cymbella*, *Nitzschia*, *Navicula* и др., присутствующие в жизнедеятельном состоянии (рис. 3 / fig. 3), в том числе и fossilized [2]. Наряду с ними определённый вклад в накопление азотсодержащего органического вещества вносили пластинчатые лишайники, а также куртинки литофильных мхов, использующие для своего питания присутствующие остатки разложившихся метаболитов и тел бактерий, водорослей, лишайников. Фото лишайников и мхов любезно предоставлены кандидатом геол.-мин. наук А.Ш. Хасиновой (Шавекиной), за что авторы статьи признательны ей.

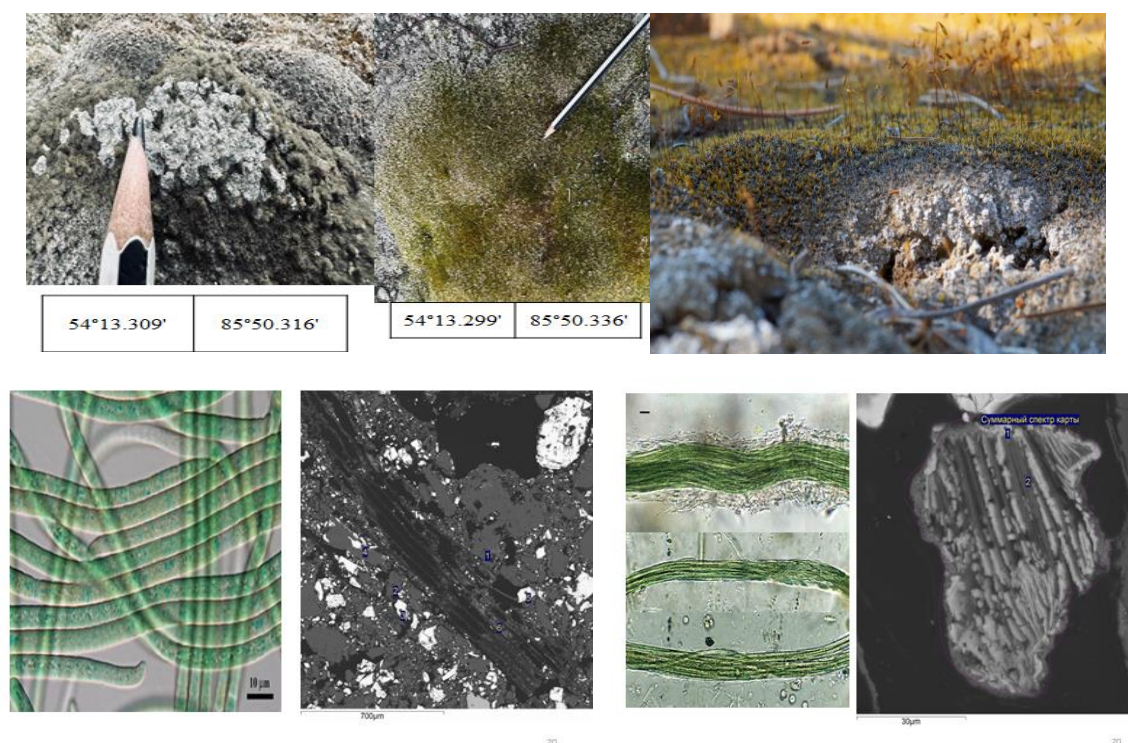


Рис. 3. Биопоселенцы поверхностной толщи хвостохранилища Талмовские пески
Fig. 3. Biosettlers of the surface layer of the Talmovskie Sands tailings reservoir

Фото- и гетеротрофные микроорганизмы полифункциональны – наряду с пополнением в среде обитания первичного азотсодержащего вещества, они приносят в неё ростстимулирующие и хелатообразующие соединения.

Слизистым экзометаболизмом азотобактера, цианобактерий и водорослей особая роль принадлежит в сорбции металлов, в том числе золота, благодаря полиуронидам или альгинатам, которые обеспечивают склеивание мелких фракций. Экспериментально установлено, что формирование наночастиц золота происходит активно в присутствии азотфиксирующих цианобактерий (р. *Anabaena*, *Nostoc*), а также видов р. *Azotobacter* [13]. Золото в таком случае может быть представлено псевдоморфозами самородного золота с цианобактериями, диатомовыми водорослями и другими микроорганизмами. Размеры таких образований составляют несколько микрон. Процесс биогенеза наночастиц Au, Ag, Pt внутриклеточно осуществляют также цианобактерии: *Plectonema boryanum*, *Calothrix*, *Leptolyngbya*, *Anabaena flos-aque*. Белки и полисахариды диатомовой водоросли р. *Nitzschia* участвуют в стабилизации наночастиц золота, что подтверждено FT-IR анализом [28]. Представители данных родов цианобактерий и диатомей также присутствуют в наших пробах.

Перечисленные выше гетеро- и фотогетеротрофные микроорганизмы ранее обнаружены в почвах и водотоках территории Салаирского кряжа [1, 27], в пределах которого расположены колчеданно-полиметаллические месторождения. Цианобактерии и водоросли

мигрируют на поверхность отходов агломерации золотосодержащих руд, участвуют в процессах первичного почвообразования и сорбции металлов. Жизнедеятельные особи цианобактерий быстро фоссилизуются (всего за несколько часов) [16]. Внутри и вокруг клеток образуются отложения CaCO_3 , кристаллические формы которого могут быть представлены кальцитом и арагонитом. Доказано, что в штучных пробах нитчатые цианобактерии рода *Microcoleus* участвовали в формировании псевдоморфоз барита, ярозита с ангидритом [24, 25]. Анализ химического состава обывиствлённых цианобактерий и водорослей и их участие в формировании вторичных минералов в настоящее время продолжается согласно действующей финансовой поддержке РФ.

Что касается колонизации азотобактером мелкозёма участка хвостохранилища Дюков лог, то она ослаблена по сравнению с таковой на участке хвостохранилища Талмовские Пески, по-видимому, вследствие кислой реакции среды (табл. 1. tabl. 1), которая тормозит деление вегетативных клеток. Не исключено также, что привнесённые из окружающей среды клетки азотобактера на момент отбора образцов частично находились в цистоподобном состоянии и их переход в активное состояние требовало времени. В пробах с Белоключевского и Урского месторождений кислотность среды составляла 0,89-1,79 ед. и вовсе не способствовала выживанию азотобактера и других биопоселенцев.

Испытания мелкозёма техногенных отходов на фитопригодность показали, что семена овса посевного прорастали лишь в 6 вариантах отходов переработки золотосодержащих руд, (из 11 обследуемых). Наиболее благоприятными для роста растений оказались почвоподобные среды хвостохранилищ Талмовские Пески и Дюков лог. Проростки овса посевного, выросшие в нейтральной среде, обнаружили значительное увеличение массы корней по сравнению с контролем,

в то время как на слабокислых субстратах – уменьшение (рис. 4 / fig. 4). Суммарный вес (сухой) корней и ростков овса посевного на веществе хвостохранилищ (Талмовские пески и Дюков лог) составил: т. 2 – 381 мг; т. 3 – 337 мг; т. 5 – 326 мг.

Насыпные отвалы с кислой средой, за исключением участка Дюкова лога, оказались непригодными для роста овса посевного.

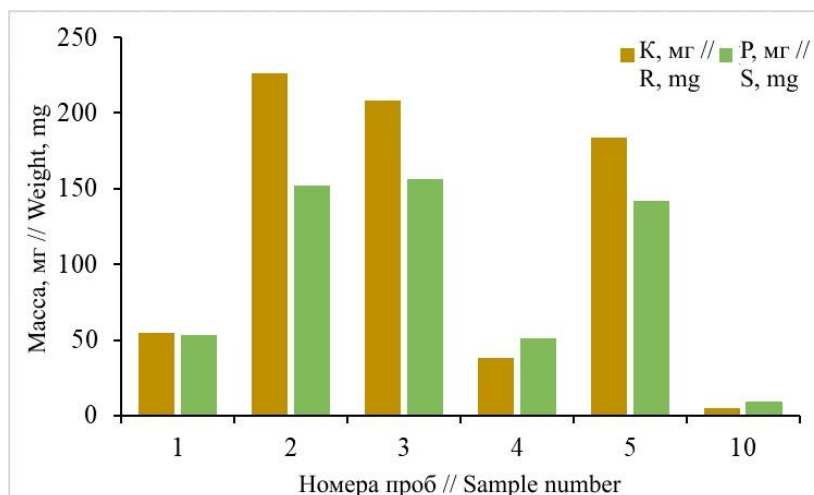


Рис. 4. Средние значения сухого веса (мг) корней (К) и надземной части проростков (Р) овса посевного (n=125), выращенного на субстрате отходов переработки золотосодержащих руд. Номера проб соответствуют номерам на рис. 2.

Fig. 4. Average values of dry weight (mg) of roots (R) and aboveground part of seedlings (S) of oats (n= 125) grown on a substrate of tailings from processing of gold-bearing ores. Sample numbers correspond to those in fig. 2.

Анализ морфометрических данных показал, что на субстратах с нейтральной средой произошло

удлинение главного корня и увеличилась высота ростков (рис. 5 / fig. 5).

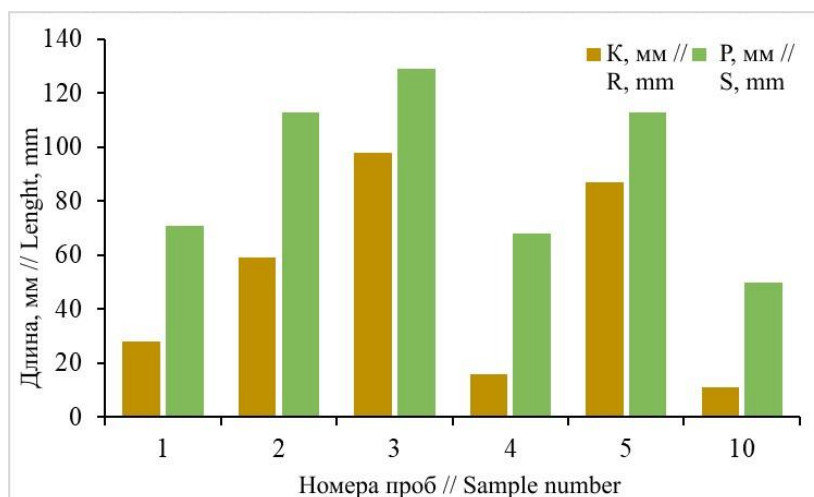


Рис. 5. Средние значения максимальной длины корня (К) и ростка (Р) овса посевного (в мм), выращенного на субстрате отходов переработки золотосодержащих руд

Fig. 5. Average values of the maximum root (K) and sprout length (P) (mm) of oats grown on a substrate of waste from processing gold-bearing ores

Следовательно, проростки овса посевного позитивно отреагировали на нейтральную кислотность в среде обитания увеличением биомассы корней и ростков, чему, вероятно, способствовало образование придаточных корней.

Анализ химического состава сухой массы корней и

ростков недельных проростков овса посевного позволил выявить транслокацию в них металлов и неметаллов из техногенного субстрата (табл. 2 / tabl. 2).

Таблица 2

Химический состав сухой массы проростков овса, выращенных на техногенном субстрате, мг/кг*

Table 2

The chemical composition of the dry mass of oat seedlings grown on a technogenic substrate, ppm*

Показатель // Indicator	Кислые участки хвостохранилищ // Acid material of tailings				Нейтральные участки хвостохранилищ // Neutral material of tailings dumps				Слабокислый участок Берикольского отвала // Semi-acid material of the Berikul dump	
	Талмовские пески // Thalmov Sands		Дюков лог // Dukov log		Талмовские пески // Thalmov Sands		Дюков лог // Dukov log		Ростки // Sprouts	Корни // Roots
	Ростки // Sprouts	Корни // Roots	Ростки // Sprouts	Корни // Roots	Ростки // Sprouts	Корни // Roots	Ростки // Sprouts	Корни // Roots		
SO ₄	33500	59000	37000	52000	21000	57000	14500	95600	16300	19000
K	17000	10590	20000	13000	22700	5240	17500	9400	15800	4400
Ca	3100	9800	2500	6100	2700	14000	2800	4400	610	840
Na	190	770	280	1020	180	610	210	910	410	570
Mg	3268	4280	3532	4429	3389	7306	1997	2435	1800	1410
Si	280	420	170	240	270	710	220	880	390	580
Al	28	170	33	150	47	710	34	620	78	200
P	7800	6400	7300	6900	8000	2900	8200	4100	8100	6300
Mn	270	410	170	200	120	980	67	220	59	46
Fe	200	1700	500	5100	560	15000	330	3900	1400	4200
Co	2,7	7,4	1,2	24	0,2	4,2	0,22	3,1	2,0	3,0
Ni	68	10	6,8	6,6	4,2	9,6	4,1	8,5	7,1	6,7
Cu	20	130	11	19	30	310	19	160	17	29
Zn	1000	330	120	310	300	5000	200	2900	84	81
As	1,2	11	6,5	18	5,0	88	8,1	20	75	240
Mo	2,4	2,2	2,5	1,8	2,7	8,0	3,8	5,7	2,2	2,5
Cd	4,0	9,9	0,44	1,1	5,4	36	0,88	12	0,39	0,66
Pb	6,1	44	3,5	29	59	1600	51	940	1,9	2,2
U	0,01	0,29	0,015	0,24	0,045	1,1	0,023	0,41	0,012	0,052
Ag	0,077	0,44	0,038	0,092	0,59	10	0,43	9,1	0,21	0,32
Au	0,003	0,008	0,0026	0,012	0,0036	0,22	0,06	0,081	0,014	0,01

* **Примечание:** жирным шрифтом выделены значения преимущественного накопления элементов в проростках* **Note:** the maximum values are highlighted in bold in the seedlings

В корни и ростки транспортируются металлы и металлоиды, при этом многие из них не являются жизненно необходимыми для овса, как и для большинства растений. Спектр тяжёлых металлов широкий, их содержание высокое. Выявилась тенденция преимущественного накопления элементов в ростках: K, P, Ni, и в корнях: Na, Ca, Mg, Si, Al, Mn, Fe, Co, Cd, Pb, As, а также Ag и Au.

В растениях, выращенных в мелкозёме как на фоне кислой среды, так и нейтральной обнаружено высокое содержание Zn, Mo, Ni, P в ростках. Известно, что цинк наиболее доступен растениям в диапазоне кислотности pH - 5-8 ед., находясь в адсорбированном виде. При увеличении кислотности среды адсорбция цинка ослабляется, что подтверждается нашими данными. В растворимость цинк-содержащих комплексов большой вклад вносят органические соединения. Поступление в ростки других металлов обязано скорее всего безбарьерному транзиту и их накоплению (в плазмолемме и в вакуолях).

Повышенные значения металлов внутри корня, вероятно, обусловлены разными механизмами: продуцированием в прикорневой зоне микроорганизмами сидерофоров, способствующих транзиту, а также присутствием пептидов (фитохелатинов) и низкомолекулярных полипептидов (металлотиионеинов), которые являются «органическими лигандами» [29], образующими с металлами комплексную соль (хелат), в которой закреплены по всем валентностям. Однако синтез белковых хелаторов энергозависим. Поэтому снижение энергии, расходуемой на окислительные процессы в присутствии тяжёлых металлов, может в определённых ситуациях негативно отразиться на продуцировании глутатиона и цистеина (предшественника глутатиона) вследствие ослабления активности фермента – O-ацетил-серинлиазы, которая участвует в образовании цистеина. Снижение его количества может ослабить образование защитных белковых соединений, которые участвуют в адаптации растений к тяжёлым металлам. Возможно, приток азота микробного происхождения

способствует образованию в проростках овса аминокислот, нуклеиновых кислот, хлорофилла, что благоприятствует синтезу защитных белков.

Заключение

Исследованные отходы переработки золотосодержащих руд, складированные в хвостохранилища и насыпные отвалы, по истечению многолетнего нахождения на дневной поверхности, вовлечены в процессы первичного почвообразования. В настоящее время техногенные массивы характеризуются разной степенью окисленности, отличаются по кислотности (от ультракислых до слабощелочных значений), составу и содержанию химических элементов. При этом они жизнепригодны для овса посевного, фото- и гетеротрофных азотфиксирующих бактерий – азотобактера и цианобактерий, которые эволюционно приспособлены к присутствию тяжёлых металлов и металлоидов в среде обитания.

Мелкозём участков хвостохранилищ с нейтральной кислотностью оказался наиболее пригодным для поселенцев по сравнению с таковым на участках с более низкими значениями pH. Выживание и размножение в мелкозёме азотфиксирующих микроорганизмов обеспечивает пополнение ими биогенного азота, необходимого проросткам. Жизнедеятельности кальцефильного азотобактера и цианобактерий способствует вторичное образование гипса в среде обитания. Не исключено, что в периоды пересыхания техногенного субстрата, некоторые виды цианобактерий, пребывающие внутри сульфата кальция, используют не жидкую воду, а структурную (содержание которой достигает 20,8% в составе минерала), переводя его в ангидрит [30]. Наибольшее подавление роста азотобактера наблюдается на сильноокисленных участках насыпных отвалов, которые можно отнести по степени угнетения бактерии к чрезвычайно и высоко опасным.

Транслокация тяжёлых металлов и неметаллов из техногенных субстратов внутрь корней и ростков овса посевного обнаружена уже в недельных проростках, выращенных на средах с разной кислотностью. Депонирование большинства тяжёлых металлов в корнях проростков овса посевного можно рассматривать как факт комплексообразования тяжёлых металлов хелатного типа, что способствует снижению токсичности. Присутствие слизистых азотфиксирующих особей цианобактерий и азотобактера способствует сорбции металлов и переводу их в хелатное состояние наряду с экзометаболитами овса посевного. Максимальное содержание Au и Ag в корнях проростков способствует сохранности их в пределах мочковатой корневой системы. Полученная информация может быть использована при характеристике первичного почвообразования и современных механизмов биогенного концентрирования металлов в условиях техногенеза, учтена при обосновании и разработке природоподобных технологий экологически безопасной консервации хвостохранилищ.

Сведения об авторском вкладе

В.С. Артамонова – постановка задачи исследования, формулировка идеи статьи, работа с иностранными источниками, написание и научное редактирование статьи;

С.Б. Бортникова – определение химического состава в проростках, анализ химических данных, редактирование текста.

Contribution of the authors

Valentina S. Artamonova – formulation of the research task, formulation of the idea of the article, work with foreign sources, writing and scientific editing of the article;

Svetlana B. Bortnikova – determination of chemical composition in seedlings, analysis of chemical data, text editing.

Список источников

1. Артамонова В.С. Микробиологические особенности антропогенно преобразованных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2002. 225 с.
2. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Хусаинова А.Ш. Бактерии и водоросли – участники первичного почвообразования на отходах переработки полиметаллических руд // Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвящённой 80-летию д.б.н., проф. Б.Б. Намсараева, 100-летию Республики Бурятия, 300-летию Российской академии наук. Улан-Удэ – Байкальск, 3-7 июля 2023 г. /отв. ред. Д.Д. Бархутова, О.П. Дагурова, Т.Г. Банзаракцаева. Новосибирск: СО РАН, 2023. С.10-11.
3. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. 169 с.
4. Бортников Н.С., Дистлер В.В., Викентьев И.В., Гамянин Г.Н. Григорьева А.В., Гроховская Т.Л., Служеникин С.Ф., Тагиров Б.Р. Формы нахождения благородных металлов в рудах комплексных месторождений: методология изучения, количественные характеристики, технологическое значение // Проблемы минералогии России. Москва: РАН. Отделение наук о Земле. 2012. С. 365-384.
5. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М. Стандартинформ, 2011. 31 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/12883?ysclid=ltvbnd0c41691944050> (дата обращения: 17.03.2024).
6. ГОСТ Р 57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64416/> (дата обращения: 29.03.2023).
7. ГОСТ Р 59060-2020. Охрана окружающей среды. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566283613> (дата обращения: 15.06. 2021).
8. ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений. М.: Стандартинформ, 2021. 19 с. URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=233567> (дата обращения: 10.10.2021).
9. Ерёмин Д.И., Савельева Ю.В. К вопросу о сортовой устойчивости овса к токсическому действию

алюминия на ранних этапах онтогенеза // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 2 (46). С. 25–33.

10. Зенова Г.М., Степанов А.Л., Лихачёва А.А., Манучарова Н.А. Практикум по микробиологии почв. М.: МГУ, 2002. 120 с.

11. Михайлов А.Г., Харитонова М.Ю., Вахлаев И.И., Свиридова М.Л. Мобильность цветных и благородных металлов в хвостах обогащения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С.1-9.

12. Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Христовин Н.А. Влияние тяжёлых металлов на биохимические показатели овса посевного (*AVENA SATIVA*) // Российский журнал прикладной экологии. Вып.3. 2022. С.63-71.

13. Радциг М. А., Кокишарова О. А., Надточенко В. А., Хмель И. А. Получение наночастиц золота методом биогенеза с использованием бактерий // Микробиология. 2016. Т.85. №1. С. 42-49.

14. Рассказов И.Ю., Александрова Т.Н., Литвинцев В.С. Проблемы извлечения тонкодисперсного золота из песков техногенных россыпей и некоторые пути их решения // Проблемы освоения техногенного комплекса месторождений золота: сборник трудов межрегиональной конференции. Магадан, 15-17 июля 2010 /редкол.: Дудов Н.И. и др. Магадан: Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН) НИИ ДВО РАН. 2010. С.167-169.

15. Рихванов Л.П., Абросимова Н.А., Барановская Н.В., Белан Л.Н., Большунова Т.С., Бортникова С.Б., Горбатюк Е.А., Густайтис М.А., Еделев А.В., Межибор А.М., Мякая И.Н., Соктоев Б.Р., Юсупов Д.В., Жмодик С.М., Ишук Н.В., Кириченко И.С., Наркович Д.В., Лазарева Е.В., Оленченко В.В., Саева О.П., Сарыг-оол Ю., Усманова Т.В., Юркевич Н.В. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2017. 437 с.

16. Розанов А.Ю. Ископаемые бактерии и новый взгляд на процессы осадкообразования // Соросовский ж., 1999. № 10. С. 63-67.

17. Савельева Ю.В., Ахтямова А.А. К вопросу о реакции овса на кислотно-щелочные условия // Эпоха науки. № 35. 2023. С. 24-28.

18. Соколов А.Е., Черников В.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Книга 1. Атлас распределения тяжёлых металлов в объектах окружающей среды. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН. 1999. 164 с.

19. Солохина И.Ю. Выделение авеноцина из овса посевного (*Avena sativa* L.) и изучение его физиолого-биохимических аспектов действия: Автореф. ...дис. канд. биол. наук: 03.01.05 - физиология и биохимия растений. Воронеж, 2013. 24 с.

20. Сэги Й. Методы почвенной микробиологии. М.: Колос, 1983. 296 с.

21. Тенгер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева, Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2004. 256 с.

22. Фёдоров С.А., Амдур А.М., Малышев А.Н., Каримова П.Ф. Обзор техногенных и вторичных золото-

содержащих отходов и способы извлечения из них золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 346-365.

23. Хусаинова А.Ш., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Волюнкин С.С., Калинин Ю.А. Вторичные минералы Fe, Pb, Cu в сульфидсодержащем хвостохранилище: последовательность образования, электрохимические реакции и физико-химическая модель (Талмовские Пески, Салаир, Россия) // Russian J. Earch. Sci. 2023. Т.23. 22 с.].

24. Шавекина А.Ш., Бортникова С.Б., Волюнкин С.С., Юркевич Н.В., Бондаренко В.П., Гаськова О.Л., Артамонова В.С. Типоморфные характеристики барита из полиметаллических хвостохранилищ Салаирского Кряжа // Литогенез и минерогения осадочных комплексов докембрия и фанерозоя Евразии: материалы X Международного совещания по литологии. Воронеж, ВГУ, 18–23 сентября 2023 г /ред. Ю.А. Гаврилов, А.Д. Савко, отв. за выпуск Крайнов А.В., Бондаренко С.В. Воронеж, 2023. С. 487-490.

25. Шавекина А.Ш., Юркевич Н.В., Гаськова О.Л., Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Волюнкин С.С. Условия образования аутигенного барита в полиметаллических хвостохранилищах // Новое в познании процессов рудообразования: Двенадцатая Российская молодёжная научно-практическая Школа. Москва, 27 ноября – 01 декабря 2023 г./ редкол. Петров В.А., Ковальчук Е.В., Комаров В.Б., Комарова М.М., Устинов С.А., Усачёва А.А. М.: ИГЕМ РАН, 2023. С. 246-249.

26. Aquilanti L., Favilli F., Clementi F. Comparison of different strategies for isolation and preliminary identification of *Azotobacter* from soil samples // Soil Biology and Biochemistry. 2004. Vol. 36. P. 1475-1483.

27. Artamonova V.S., Kosiniva L. Ju. Gene pool of nitrogen-fixing microorganisms in mountain soils of Siberia // Man and mountain ' 94. Protection and development of mountain environment Proceedings. Ponte di Legno. Italy. 1994. P.547-561.

28. Borase H.P, Patil C.D, Suryawanshi R.K, Koli S.H, Mohite B.V, Benelli A. and Patil S. Mechanistic approach for fabrication of gold nanoparticles by *Nitzschia* diatom and their antibacterial activity // Bioprocess Biosyst. Eng. 2017. Vol 40(10). P. 1437-1446.

29. Burckhard S.R., Schwab A.P., Bankks V.K. The effects of organic acids on the leaching of heavy metals from tailings // J. Hazardous materials. 1995. Vol. 41. P.135-145.

30. Huang W., Ertekin E., Wang T., Cruz L., Dailey M., Di Ruggiero J., & Kisailus D. Mechanism of water extraction from gypsum rock by desert colonizing microorganisms // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. 117(20). P.10681–10687.

References

1. Artamonova, V., 2002. Mikrobiologicheskie osobennosti antropogenno preobrasovannyh pochv Zapadnoi Sibiri [Microbiological features of anthropogenically transformed soils of Western Siberia]. Novosibirsk, Publishing house of SB RAS. 225 p. (In Russian)

2. Artamonova, V., Bortnikova, S., and Khusainova A., 2023. Bacteria and algae – participants in primary soil formation on waste from polymetallic ore processing. In: Barkhutova D.D., Dagurova O.P., Banzaraksaeva T.G.

- (ed). Ecology and geochemical activity of microorganisms in extreme habitats: materials of the III All-Russian Conference with international participation dedicated to the 80th anniversary of Doctor of Biological Sciences, Professor B.B. Namsaraev, the 100th anniversary of the Republic of Buryatia, the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences. Ulan-Ude – Baikalsk, July 3-7, 2023. Novosibirsk, SB RAS, pp. 10-11. (In Russian)
3. Bortnikova, S., Gaskova, O. and Bessonova, E., 2006. Geohimija tehnogennyh system [Geochemistry of technogenic systems]. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 169 p. (In Russian)
 4. Bortnikov, N., Distler, V., Vikentiev, I., Gamyarin, G., Grigorieva, A., Grokhovskaya, T., Sluzhenikin, S. and Tagirov, B., 2012. Formy nahozhdeniya blagorodnyh metallov v rudah kompleksnyh mestorochlenii: metodologiya izucheniya, kolichestvennye karakteristiki, tehnologicheskoe znachenie [Forms of finding precious metals in ores of complex deposits: methodology of study, quantitative characteristics, technological significance]. *Problems of mineralogy of Russia*. Department of Earth Sciences Moscow, RAS, pp. 365-384. (In Russian)
 5. GOST 12038-84. Semena sel'skohozyaistvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vshozhesti. 1984. [Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 31 p. Available from: <https://internet-law.ru/gosts/gost/12883?ysclid=ltvbn0c4l691944050> [Accessed 17th Marth 2024].
 6. GOST R 57446-2017. Nailuchshie dostupnye tehnologii. Rekul'tivaciya narushennykh zemel' i zemel'nyh uchastkov. Vosstanovlenie biologicheskogo raznoobraziya, 2019. [The best available technologies. Reclamation of disturbed land plots. Restoration of biological diversity]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 23 p. Available from: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64416/> [Accessed 29th Marth 2023].
 7. GOST R 59060-2020. Ohrana okruzhayushchei sredi. Klassifikaciya narushennykh zemel' v celyakh rekul'tivacii, 2020. [Environmental protection. Classification of disturbed lands for reclamation]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 19 p. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/566283613> [Accessed 15th June 2021].
 8. GOST R ISO 18763-2019. Kachestvo pochvy. Opredelenie toksicheskogo vozdejstviya zagryaznykh veschestv na vshozhest' i rost na rannih stadiyah razvitiya visshih rastenii, 2019 [The quality of the soil. Determination of the toxic effects of pollutants on germination and growth in the early stages of higher plants]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 19 p. Available from: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=233567> [Accessed 10th October 2021].
 9. Eremin, D. and Saveljeva Ju., 2023. On the issue of varietal resistance of oats to the toxic effect of aluminum in the early stages of ontogenesis. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*, 2 (46), pp. 25-33. (In Russian)
 10. Zenova, G., Stepanov, A., Likhacheva, A. and Manucharova, N., 2002. *Praktikum po biologii pochv* [Workshop on soil biology]. Moscow, MGU Publ, 120 p. (In Russian)
 11. Mihailov, A., Haritonova, M., Vashlaev, I. and Sviridova, M., 2014. Mobility of non-ferrous and precious metals in enrichment tailings. *Modern problems of science and education*, 6, pp. 1-9. (In Russian)
 12. Petuhov, A., Kremleva, T., Petuhova, G. and Hritohin, N., 2022. The influence of heavy metals on the biochemical parameters of oats (*Avena sativa*). *Russian Journal of Applied Ecology*, 3, pp. 63-71. (In Russian)
 13. Radzig, M., Koksharova, O., Nadochenko, V. and Khmel, I., 2016. Obtaining gold nanoparticles by biogenesis using bacteria, *Microbiology*, 85(1), pp. 42-49. (In Russian)
 14. Rasskazov, I., Alexandrova, T. and Litvintsev, V., 2010. *Problems of extraction of fine gold from sands of technogenic placers and some ways of their solution*. Dudov N. et al.(ed). *Problems of development of the technogenic complex of gold deposits: proceedings of the interregional conference: 15-17 July 2010, Magadan*. Magadan: N.A. Shilo Northeastern Integrated Research Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (SVKNII FEB RAS, pp.167-169. (In Russian)
 15. Rikhvanov, L., Abrosimova N., Baranovskaya N., Belan L., Bolshunova T., Bortnikova S., Gorbatyuk E., Gustaitis M., Edelev A., Mezhibor A., Soft I., Soktoev B., Yusupov D., Zhmodik S., Ishchuk N., Kirichenko I., Narkovich D., Lazareva E., Olenchenko V., Saeva O., Saryg-ool Yu., Usmanova T. and Yurkevich N., 2017. *Biogeohimicheskii monitoring v raionah hvostohranilish gornodobyvayuschih predpriyatii s uchetom mikrobiologicheskikh faktorov transformacii mineral'nykh kompleksov* [Biogeochemical monitoring in the areas of tailings dumps of mining enterprises taking into account microbiological factors of transformation of mineral components]. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS, 437 p. (In Russian)
 16. Rozanov, A., 1999. Fossil bacteria and a new look at the processes of sedimentation. *Sorosovskiy J.*, 10, pp. 63-67. (In Russian)
 17. Savelyeva, Yu. and Akhtyamova, A., 2023. On the reaction of oats to acid-base conditions. *The age of science*, 35, pp. 24-28. (In Russian)
 18. Sokolov, A. and Chernikov, V., 1999. *Ekologicheskaya bezopasnost' i ustoichivoe razvitie. Kniga 1. Atlas raspredeleniya tyachelykh metallov v obyektah okruzhayusheq sredi*. [Environmental safety and sustainable development. Book 1. Atlas of the distribution of heavy metals in environmental objects. Pushchino: ONTI PNC RAS. 164 p. (In Russian)
 19. Solokhina, I., 2013. *Vydelenie avenocina iz ovsy posevnogo (Avena sativa L.) i izuchenie ego fiziologo-biohimicheskikh aspektov deistviya* [Isolation of avenocin from oats (*Avena sativa* L.) and the study of its physiological and biochemical aspects of action]. Doctor's Dissertation Abstract of Sciences in Physiology and biochemistry of plants. Voronezh, 24 p. (In Russian)
 20. Segi, Y., 1983. *Metody pochvennoj mikrobiologii* [Methods of soil microbiology]. Moscow, Kolos, 296 p. (In Russian)
 21. Tepper, E., Shilnikova, V. and Pereverzeva, G., 2004. *Praktikum po mikrobiologii*. [Practicum on microbiology]. Moscow, *Bustard Publ.*, 256 p. (In Russian)
 22. Fedorov, S., Amdur, A., Malyshev, A. and Karimova, P., 2021. Overview of technogenic and secondary gold-containing wastes and methods of extracting gold from them. *Mining information and analytical bulletin*, 11-1, pp. 346-365. (In Russian)

23. Khusainova, A., Bortnikova, S., Gaskova, O., Volynkin, S. and Kalinin, Yu., 2023. Secondary minerals Fe, Pb, Cu in a sulfide-containing tailings reservoir: sequence of formation, electrochemical reactions and physico-chemical model (Talmov Sands, Salair, Russia). *Russian J. Earth. Sci.*, 23, 22 p. (In Russian)
24. Shavekina, A., Bortnikova, S., Volynkin, S., Yurkevich, N., Bondarenko, V., Gaskova, O. and Artamonova, V., 2023. Typomorphic characteristics of barite from polymetallic tailings dumps of the Salair Ridge. Gavrilov, Yu., Savko, A. (ed). Lithogenesis and minerageny of sedimentary complexes of Precambrian and Phanerozoic Eurasia: Proceedings of the X International Meeting on Lithology, 18-23 September, Voronezh. Voronezh: VSU, pp. 487-490. (In Russian)
25. Shavekina, A., Yurkevich, N., Gaskova, O., Artamonova, V., Bortnikova, S. and Volynkin, S., 2023. Conditions for the formation of autigenic barite in polymetallic tailings ponds. Petrov, V., Kovalchuk, E., Komarov, V., Komarova, M., Ustinov, S. and Usacheva, A. (ed). New in the knowledge of ore formation processes: The Twelfth Russian Youth Scientific and Practical School, 27 November – 01 December, 2023, Moscow. Moscow, *IGEM RAS*, pp. 246-249. (In Russian)
26. Aquilanti, L., Favilli, F. and Clementi, F., 2004. Comparison of different strategies for isolation and preliminary identification of *Azotobacter* from soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*. 36, pp. 1475-1483.
27. Artamonova, V. and Kosiniva, L., 1994. Gene pool of nitrogen-fixing microorganisms in mountain soils of Siberia // Man and mountain '94. Protection and development of mountain environment Proceedings. Ponte di Legno. Italy, pp.547-561.
28. Borase, H., Patil, C., Suryawanshi, R., Koli S., Mohite, B., Benelli, A. and Patil, S., 2017. Mechanistic approach for fabrication of gold nanoparticles by *Nitzschia* diatom and their antibacterial activity *Bioprocess Biosyst. Eng.* 40(10), pp.1437-1446.
29. Burckhard, S., Schwab, A. and Banks, V., 1995. The effects of organic acids on the leaching of heavy metals from tailings. *J. Hazardous materials*. 41, pp.135-145.
30. Huang, W., Ertekin, E., Wang, T., Cruz, L., Dailley, M., Ruggiero, J., and Kisailus, D., 2020. Mechanism of water extraction from gypsum rock by desert colonizing microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(20), pp.1068-1075.

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 15.04.2024; принята к публикации 18.04.2024.

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 15.04.2024; accepted for publication 18.04.2024.