ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Хранилище отходов Cu-Co-Ni арсенидных руд месторождения Хову-Аксы (траншея) как источник металлов и мышьяка в дренажных и парогазовых потоках

С.Б.Бортникова[1], **С.П.Мишенина**[1], **А.Ю.Девятова**[1]✉, **А.Я.Шевко**[2]
[1] *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2] *Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Бортникова С.Б., Мишенина С.П., Девятова А.Ю., Шевко А.Я. Хранилище отходов Cu-Co-Ni арсенидных руд месторождения Хову-Аксы (траншея) как источник металлов и мышьяка в дренажных и парогазовых потоках // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 1. С. 55-68. EDN OGIELN

Аннотация
Приведены результаты комплексного обследования траншеи комбината «Тувакобальт», вмещающей отходы гидрометаллургического обогащения Cu-Co-Ni арсенидных руд месторождения Хову-Аксы. С помощью электротомографии получены геоэлектрические карты и разрезы, построена 3D-модель хранилища. Оконтурена высокопроводящая (низкоомная) зона в центральной части траншеи – вещество с относительно более высокой влажностью, чем окружающие бортовые части. Грунтовые воды, вскрытые в забоях шурфов, представляют собой минерализованные растворы с высоким содержанием мышьяка (до 15 мг/л), что указывает на активные процессы взаимодействия сезонных вод с веществом траншеи и накопление растворенных форм металлов и металлоидов в жидкой фазе высокопроводящей зоны. Эта зона, узкая на поверхности, расширяется к низу траншеи и уходит глубже 40 м, что свидетельствует о возможности поступления высокоминерализованных растворов в подземные водоносные горизонты. Иной путь миграции загрязнителей состоит в эманациях с поверхности хранилища. С парогазовыми потоками в приземный слой атмосферы поступает высокое количество химических элементов, в том числе потенциально токсичных, что было установлено путем сбора и анализа конденсатов. Формы миграции элементов в этих потоках устанавливали с помощью лабораторных экспериментов по улавливанию и осаждению переносимого потоками вещества. Состав потоков сложен главным образом аморфными органическими соединениями с небольшой долей хлоридов и сульфатов, а металлы и мышьяк переносятся в истинных газовых потоках в соединении с органическими лигандами. Результаты полевого и лабораторного изучения состояния хранилища свидетельствуют о наличии каналов миграции вод в нижележащие горизонты, а с поверхности в благоприятных условиях идет подъем парогазовой смеси, выносящей металлы и мышьяк в летучей, биодоступной форме.

Ключевые слова
мышьяк; горно-рудные отвалы; электротомография; атмосферное загрязнение; миграция токсикантов; окислительные процессы

Финансирование
Работа выполнена по государственным заданиям ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2026-0055), ИГМ СО РАН (проект FWZN-2026-0007).

Поступила: 16.03.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 16.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

Складирование отходов обогащения руд на открытой поверхности привело к появлению многотоннажных хранилищ, в которых алюмосиликатная матрица в той или иной степени обогащена сульфидными недоизвлеченными минералами. Хвостохранилища представляют собой новые техногенные рудные тела, в которых процессы преобразования вещества идут со скоростью, не сопоставимой с геологическим временем. Результатом этих процессов являются водные, воздушные и пылевые потоки, которые выносят многие химические элементы за пределы мест складирования. Необходимость мониторинга и оценки влияния хвостохранилищ на окружающие территории, биоту и население диктуется высокой степенью опасности металлов и металлоидов для живых

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

организмов. Адекватное описание техногенных тел, их состава, строения, зональности, форм нахождения потенциально токсичных элементов и влияния на окружающие территории требует их комплексного обследования, начиная с особенностей самих техногенных тел, водных и воздушных потоков и заканчивая оценкой воздействия на природные компоненты и организм человека.

Одним из эффективных методов определения внутренней структуры хвостохранилищ, оконтуривания водонасыщенных горизонтов и линз, выявления путей миграции дренажных потоков является электроразведка, которая в сочетании с геохимическими и гидрохимическими методами существенно повышает эффективность исследований [1]. Возможность изучения геологической среды методами электроразведки основана на зависимости электромагнитных свойств вещества от влажности, температуры, литологического и минерального состава, минерализации поровой влаги [2].

Методы сопротивлений часто используются для определения объемов старых/заброшенных хвостохранилищ [3-5], а также для представления их внутренней структуры и неоднородности [6, 7]. Крупнозернистые, относительно сухие участки и прослои характеризуются более высоким сопротивлением, чем мелко- и тонкозернистые слои, удерживающие влагу [8, 9], что дает возможность визуализации на геоэлектрических разрезах гидрогеохимической зональности хвостохранилищ [10]. Вещество хвостохранилища обычно обладает большей электрической проводимостью, чем окружающая среда, что позволяет отобразить границу раздела коренных пород и дамб со складированными отходами [11, 12].

В работе авторы применили метод электротомографии (ЭТ), хорошо себя зарекомендовавший при изучении хранилищ и отвалов в Сибири. При описании строения старой траншеи комбината «Тувакобальт» электротомография была использована, во-первых, для выявления возможных участков поступления высокоминерализованных межпоровых растворов в подземные горизонты, а во-вторых, для выбора подходящих участков для сбора конденсатов (наиболее проводящие низкоомные зоны).

Геохимия окислительных процессов в отходах горно-рудной промышленности и миграция токсичных элементов с дренажными потоками и пылью широко обсуждается в зарубежной [13, 14] и российской [15-17] научной литературе. Существенно меньше внимания исследователи уделяют газовым аномалиям на прилегающих территориях и переносу химических элементов в парогазовых потоках от техногенных тел. Работами последних лет коллектива ИНГГ СО РАН установлено, что хвостохранилища и отвалы являются источниками серо-, азот-, селенсодержащих газов, поступающих в атмосферу [18], при этом за пределы хвостохранилищ выносится высокое количество элементов в летучей, биодоступной форме [18]. На Барун-Нарынском и Зун-Нарынском хвостохранилищах, в которых складированы отходы Джидинского вольфрамо-молибденового комбината, определен состав конденсатов и установлено, что над их поверхностями образуется ореол загрязнения аэрозолями серной кислоты, алюминия, железа, марганца, цинка, фосфора [19]. Конденсационная влага, собранная на отходах добычи руд Озерного месторождения, содержала высокие концентрации многих элементов (Pb, Zn, Mn, Al, P, Fe, Cu) [20]. Лабораторными экспериментами доказано, что элементы могут переноситься в истинном газовом потоке, не образуя твердых аэрозольных частиц. Масштабы этих процессов свидетельствуют о необходимости их исследования, определения хотя бы основных закономерностей образования летучих форм, оценки роли неорганических и биотических взаимодействий в процессах газогенерации.

Одним из наиболее актуальных, но совершенно непонятых вопросов является определение форм переноса элементов в этих потоках. Для его прояснения авторы привлекли опыт вулканологических исследований, в которых по составу инкрустаций на кварцевых трубках, помещенных в фумаролы и газовые струи, и сублиматов делаются выводы о преимущественных формах переноса элементов [21, 22]. При улавливании газов фумарол исследователи имеют дело с высокотемпературными процессами, выносящими большое количество разнообразных соединений [23, 24]. В данном случае условия низкотемпературные, в процессе транспорта парогазовой смеси выносятся существенно меньшие объемы вещества и обнаружение осажденных металлсодержащих фаз представляет собой непростую задачу.

Целями работы было определение внутренней структуры техногенного тела – старой траншеи комбината «Тувакобальт» с выявлением высокопроводящих зон и участков, по которым возможна миграция дренажных потоков за пределы хранилища; установление возможных форм переноса и

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

осаждения металлов и металлоидов в крайне малоизученном процессе – низкотемпературных парогазовых потоках от техногенного вещества.

Объект и методы

Месторождение и хранилища отходов. Хову-Аксинское месторождение расположено на левом берегу р. Элегест (левого притока р. Енисей), в 70 км от ее устья. На месторождении As-минерализация проявлена двумя стадиями. Первая связана с наложением на карбонатные жилы арсенидного оруденения по трещинам в виде вкрапленных, брекчиевидных и ритмично-зональных структур. Выделяют две основные парагенетические группы – шмальтин-саффлоритовую и шмальтин-никелин-раммельсбергитовую ассоциации. Вторая стадия – сульфидно-сульфосольная, где основными компонентами являются халькопирит, пирит и теннантит [25, 26]. На месторождении развита зона окисления, которая достигает глубины 35-65 м [27]. В гипергенных рудах отмечены арсенаты, гидроксиды и отдельные минералы трехвалентного мышьяка (арсенолита, арсенитов). Арсенидные минералы образуют массивные и прожилковые руды. Окисленные минералы встречаются только в виде прожилковых вкраплений. Вмещающие породы имеют кварцево-карбонатный состав, включающий карбонаты кальция, магния, оксид кремния, глинозем, минералы скарнов (гранат, пироксены).

Технология переработки руд и проект основных производственных объектов комбината «Тувакобальт» выполнены институтом «Гипроникель». В основе технологической схемы заложен аммиачно-автоклавный способ переработки мышьяковых руд с конечным продуктом в виде коллективного Co-Ni-Cu концентрата [28-30]. По технологической схеме пульпу подвергали разделению на хвосты и раствор аммиачных солей цветных металлов и мышьяка. Мышьяк осаждали в виде арсенатно-магнезиального осадка (кека) – малорастворимых соединений $Mg(AsO_4)_2 \cdot nH_2O$, $Mg(NH_4)AsO_4 \cdot nH_2O$.

Отходы обогащения руд в первые годы работы комбината (1970-1975 гг.) вывозились на отдаленную изолированную площадку в 2 км от комбината и складировались в траншеях (рис.1). В дальнейшем в непосредственной близости от технологической площадки были оборудованы пять хвостохранилищ прудового типа (карты захоронения), куда насосами по трубопроводам перекачивались отходы. В отличие от карт, траншеи не имеют противофильтрационного слоя и не планировались к рекультивации. Работы были проведены на траншейном захоронении № 3, представляющем собой прямоугольник 150×450 м.

Полевые работы. Исследование процессов на хранилищах отходов проводилось комплексированием методов электроразведки (электротомография), геохимии (отбор проб по вертикали выкопанных шурфов), полевых и лабораторных экспериментов (сбор конденсатов *in situ*, улавливание налетов и пленок при конденсации парогазовых потоков), аналитических определений отобранных проб.

Электротомография. На старой траншее комбината «Тувакобальт» в 2022 г. в сухую теплую погоду выполнено более 30 профилей электротомографии (рис.2) расстановками Шлюмберже и диполь – диполь. Расстановка Шлюмберже в данных условиях при зондировании дала большую глубину и стабильный сигнал. Зондирования производились одной косой, 24 электрода, межэлектродное расстояние 5 м, расстояние между профилями – 15 м.

Геохимическое опробование. Для определения состава складированного вещества выкопаны три шурфа (Ш) глубиной 0,8-1 м и опробованы визуально различающиеся слои. Глубина шурфов определялась уровнем грунтовых вод, которые появлялись в забоях. В каждом шурфе грунтовые воды были отобраны для анализа. На месте производили фильтрование проб воды через фильтр 0,45 мкм и ее подкисление перегнанной азотной кислотой до pH ~2.

Конденсаты парогазовой смеси (КТ) собраны на трех участках траншеи (рис.2) в области наиболее проводящей зоны, оконтуренной электротомографией, а также в лиственничном лесу, в 500-1000 м к юго-западу от складированных отходов. Сбор конденсатов проводился с применением схемы с холодильником Пельтье, подробное описание которой приведено в работе [30]. На картах захоронения конденсаты отобраны в 2020 г., результаты детально представлены в [30]. После рекультивации, которая была проведена в 2021 г. (закрытие поверхности карт геомембраной, глинистым слоем, почвой и засевом сорными травами), в 2022 г. конденсаты собраны также на поверхности рекультивированных карт для сравнения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

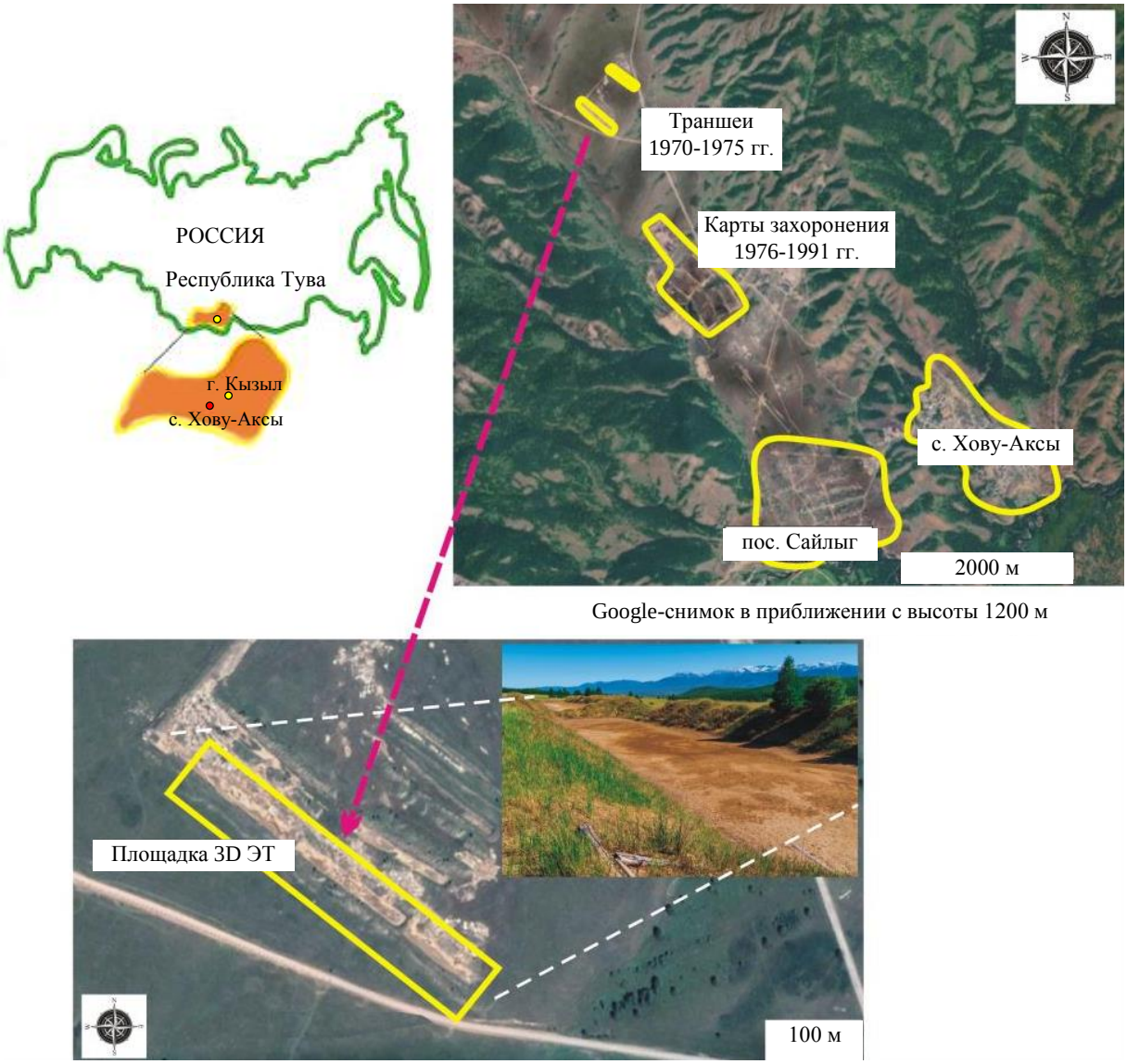


Рис.1. Географическое положение объекта исследования и внешний вид траншеи

Лабораторные анализы и эксперименты. *Обработка геофизических данных.* В 2025 г. проведена детальная обработка полученных данных электротомографии. Все 30 профилей объединены в единый массив данных с помощью программного обеспечения Res2DInv, проведена инверсия (Res3DInv), построена визуализация массива (Voxler). В результате получены геоэлектрические карты и разрезы и построена 3D-модель траншеи, демонстрирующая изменение геоэлектрической зональности.

Анализы вещества. В лабораторных условиях пробы гомогенизированы и методом квартования разделены на две части. Из первой части приготовлены пасты (соотношение твердого вещества и воды 2:1) для определения кислотно-основного баланса вещества [31], и в них измерены значения pH pH-термометром HI 9025 C (HANNA Instruments, США). Величину удельной электропроводности (УЭП) в пастах и растворах определяли прямым кондуктометрическим методом прибором Cond315i (Wissenschaftlich-Technische Werkstätten GmbH, Германия). Определение проводилось в диапазоне 0-500 мСм/см с относительной погрешностью ±0,5 %. Вторая часть пробы истерта для анализа.

В пробах твердого вещества содержание оксидов силикатной группы определено методом рентгенфлуоресцентного анализа (РФА) (Аналитический центр ИГМ СО РАН) на спектрометре ARL-9900XP (Thermo Fisher Scientific Ltd, США) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (аналитик Н.Г.Карманова).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис.2. Схема профилирования и опробования старой траншеи комбината «Тувакобальт»
1 – профиль электротомографии; 2 – шурфы; 3 – номер профиля; 4 – расположение «бочки» для сбора конденсата; 5 – профиль электротомографии roll-along

Элементный состав отходов определяли методом энергодисперсионного РФА с использованием синхротронного излучения в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» в Институте ядерной физики СО РАН (Новосибирск) на станции локального и сканирующего рентгенфлуоресцентного элементного анализа «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» (аналитик Ю.П.Колмогоров).

Определение состава водных проб (конденсатов, грунтовой воды) проводилось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) с ячейкой устранения фона UCT (Проблемная научно-исследовательская лаборатория гидрогеохимии «Вода» Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета). Все измерения проводились в трех параллелях для каждого элемента. Стандартное отклонение не превышало 13 %.

Эксперименты по определению форм переноса элементов в парогазовых потоках. В экспериментах применялась апробированная схема по улавливанию вещества, мигрирующего с парогазовыми потоками в низкотемпературных условиях [32]. Для эксперимента взяты пробы из разных слоев шурфов на траншее. Выбор сделан исходя из химического состава (взяты пробы со сравнительно высоким содержанием мышьяка и металлов) и значений УЭП паст (разница в электропроводности жидкой фазы означает разницу в количестве вторичных растворимых форм). В шесть термостойких пробирок было помещено вещество проб ~100 г. Пробирки закреплялись в термостойком стакане в песке, закрывались предметными стеклами. Стакан помещался на плитку и в течение 3 сут прогревался при температуре 60 °С. В песке и веществе в пробирках температура не превышала 40 °С. На стеклах постепенно появлялся едва видимый налет. Спустя трое суток стекла были сняты и высушены в чашках Петри.

Образовавшееся на покрывавших пробирки стеклах вещество изучено с помощью электронного сканирующего микроскопа (СЭМ) MIRA 3LMU (Tescan Ltd, Чехия) с системой микроанализа INCA Energy 450+ X-Max 80 (Oxford Instruments Ltd). Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, ток зонда – 1,6 нА, время набора спектров на образцах – 20 с. Основное внимание направлялось на поиск фаз-концентраторов металлов и мышьяка.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обсуждение результатов

Состав вещества траншеи. Вещество отходов, складированное в траншее, по своему основному составу (оксидам силикатной группы) соответствует веществу, находящемуся в картах захоронения [30] Содержание мышьяка в веществе траншей примерно такое же – 1,5-3,5 мас.%, но концентрации металлов (Co, Ni, Cu, Zn) заметно выше, возможно, за счет того, что в первые годы работы комбината технология не была полностью налажена и в отходы уходило бóльшее количество полезных компонентов. Здесь приведен состав только проб для эксперимента и тех, в которых обнаружены налеты на стекле, однако вещество всех трех шурфов характеризуется довольно стабильным содержанием элементов (табл.1).

Таблица 1

Состав проб из шурфов траншеи, выбранных для экспериментов

Параметр	Ш-1		Ш-2		Ш-3
	10 см	40 см	20 см	40 см	40 см
pH пасты	7,15	7,93	7,86	8,67	8,31
УЭП пасты, мкСм/см	6570	4440	4450	244	360
SiO_2, %	34,45	30,54	30,33	37,37	35,23
TiO_2, %	0,37	0,33	0,33	0,41	0,31
Al_2O_3, %	7,22	7,61	7,58	8,25	8,12
Fe_2O_3, %	7,56	7,21	7,42	6,15	6,76
MnO, %	< 0,01	0,27	0,20	0,24	0,23
MgO, %	4,63	5,12	5,28	3,01	3,74
CaO, %	16,53	16,01	15,43	20,60	20,31
Na_2O, %	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
K_2O, %	1,65	1,33	1,30	1,73	1,65
P_2O_5, %	0,24	0,15	0,16	0,30	0,30
BaO, %	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
SO_3, %	1,63	1,60	1,56	1,47	1,88
As, %	1,44	3,07	2,68	3,16	2,64
ППП, %	23,86	26,22	26,54	16,42	17,64
Ni, г/т	830	1300	1700	2200	1200
Co, г/т	1100	1200	1500	2300	3500
Cu, г/т	990	1230	1700	1800	1250
Zn, г/т	300	430	560	800	680
V, г/т	35	43	21	44	79
Cr, г/т	60	46	26	34	47
Mo, г/т	< 0,01	1,8	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Rb, г/т	9,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Sr, г/т	190	100	100	120	110

Значения pH паст находятся в нейтральной-слабощелочной области, уровень электропроводности в трех пробах (Ш-1, 10 см; Ш-1, 40 см; Ш-2, 20 см) свидетельствует о наличии вторичных соединений, которые при взаимодействии с водой переходят в раствор, создавая высокоминерализованную жидкую фазу. Новообразованные фазы в веществе траншеи были достаточно детально определены и описаны ранее [33]. В двух пробах (Ш-2, 20 см и Ш-3, 40 см) УЭП на порядок ниже.

Геоэлектрическая зональность. Трехмерные модели хвостов построены на основании 30 профилей электротомографии, первый из которых заложен в референтной зоне до начала траншеи (рис.2). Таким образом можно визуализировать контраст между вмещающими породами и складированными хвостами. Карты распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) приведены до глубину 40 м с шагом 10 м (рис.3, *а*). Очевидно, что референтная зона имеет более высокое сопротивление как на поверхности, так и в глубине (от 180 до 300 Ом·м), в то время как УЭС самой траншеи на поверхности не превышает 250 Ом·м, с глубиной низкоомная зона (не более 70 Ом·м) распространяется на всю площадь. Объем вещества с удельным электрическим сопротивлением < 100 Ом·м составляет 1200000 $м^3$, масса – порядка 1,8 млн т, что указывает на масштабы потенциальной генерации высокоминерализованных межпоровых растворов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© С.Б.Бортникова, С.П.Мишенина, А.Ю.Девятова, А.Я.Шевко, 2026

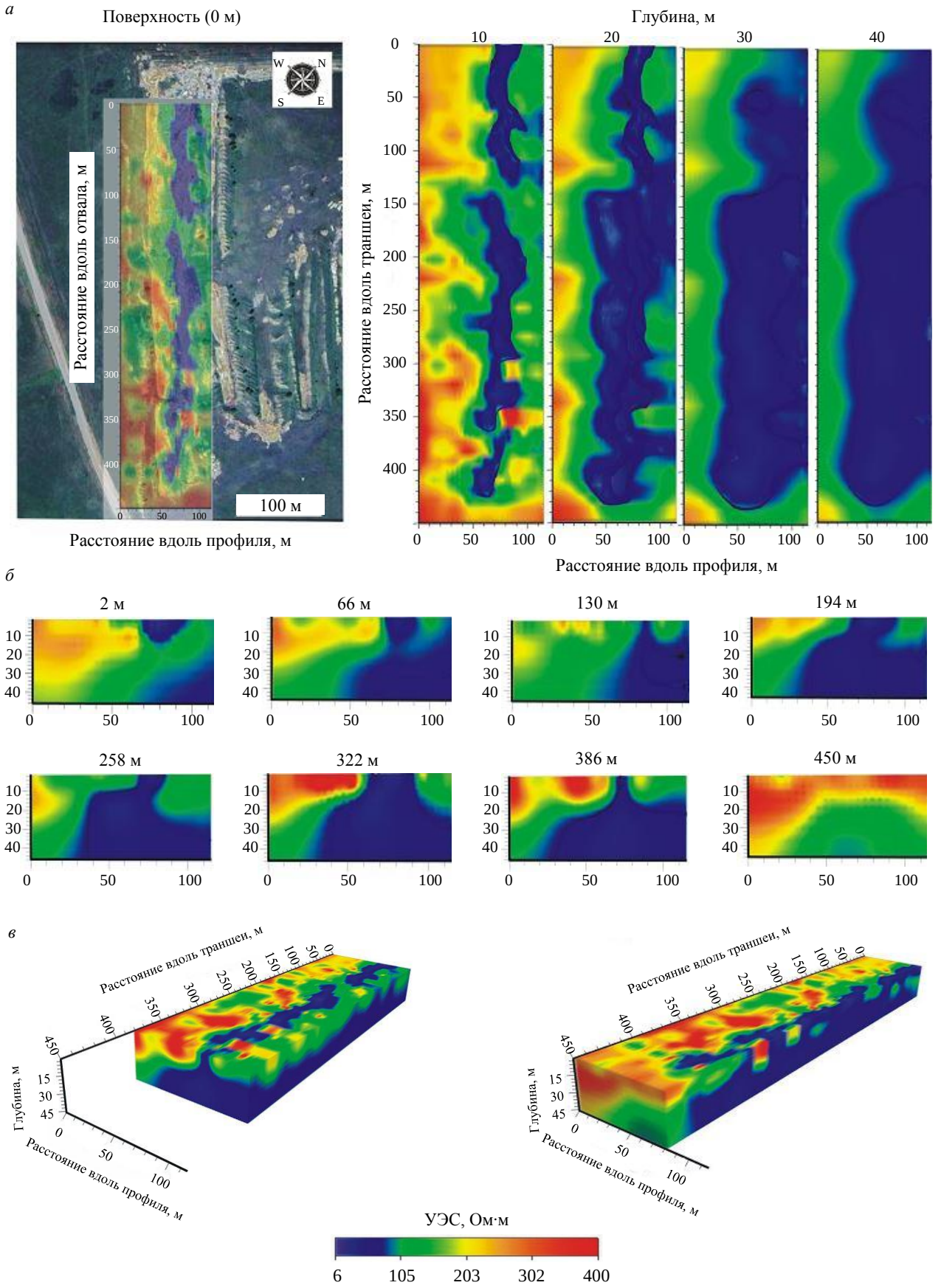


Рис.3. Карты распределения УЭС на разных глубинах (*а*), геоэлектрические разрезы на расстояниях вдоль оси *Y* (*б*) и 3D-модели (*в*) на старой траншее комбината «Тувакобальт»

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Такая геоэлектрическая зональность до максимальной глубины зондирования (48 м) свидетельствует о том, что высокопроводящее влажное вещество отходов продолжает свое влияние вглубь, очевидно, не имея физического барьера между вмещающими породами и складированными хвостами. Тем самым создается возможность проникания растворов из траншеи в подземные горизонты.

На геоэлектрических разрезах также выявилась контрастная зональность (рис.3, *б*). Трехмерный массив данных поделен на разрезы вдоль оси *Y* вдоль тела траншеи. Проводящие участки (до 80 Ом·м) заключены в общей толще отходов (150-400 Ом·м), причем на всех разрезах эта зона, сравнительно узкая на поверхности, расширяется к низу траншеи и уходит вглубь. По опыту изучения хвостохранилищ электрофизическими методами [9-11], низкоомные линзы соответствуют участкам, в которых межпоровое пространство заполнено высокоминерализованными растворами, из которых впоследствии формируются агрессивные дренажные потоки.

Применительно к данному хранилищу можно констатировать, что в центральной части траншеи, визуально несколько заглубленной относительно бортов, стекающие потоки застаиваются, тем самым имея возможность длительного формирования своего состава. Это приводит к появлению наиболее проводящих зон, что отчетливо проявилось на трехмерных моделях (рис.3, *в*). Действительно, в грунтовой воде траншеи, вскрытой в забоях шурфов, концентрации мышьяка достигают высоких значений – 15 мг/л (табл.2), в то время как содержание металлов находится на низком уровне вследствие их связывания во вторичные фазы и отложения из растворов.

Таблица 2

Содержание некоторых элементов в грунтовых водах траншеи

Элемент	Ш-1	Ш-2	Ш-3	Элемент	Ш-1	Ш-2	Ш-3
pH	8,16	7,52	7,9	Mn, мкг/л	7,8	15	12
Eh, мВ	424	418	396	Al, мкг/л	26	22	32
Ca, мг/л	40	170	120	Cu, мкг/л	22	36	18
Mg, мг/л	420	250	340	Zn, мкг/л	<4	12	10
Na, мг/л	52	38	73	Ni, мкг/л	36	48	42
K, мг/л	18	24	22	Co, мкг/л	49	32	36
As, мг/л	12	8,5	15	Cr, мкг/л	3,7	10	8,6
Fe, мкг/л	65	110	86	Sb, мкг/л	20	12	5,8

Окисление вещества и перераспределение элементов ведет к их концентрированию в определенных участках с подходящими условиями. На остаточных зернах идет переотложение вторичных фаз – легкорастворимых водных арсенатов и арсенитов, в результате чего ~30-40 % общего содержания мышьяка находятся в биодоступной форме [33]. Методами электротомографии достоверно определяются участки хранилищ, наиболее подверженные трансформации вещества и накоплению подвижных форм металлов и металлоидов. На основе данных о геоэлектрическом строении траншеи выбраны места для установки схемы по улавливанию конденсатов – на наиболее увлажненных высокопроводящих участках.

Состав конденсатов. Особое внимание уделено формированию летучих форм элементов, которые определены по составам конденсатов. Конденсаты, собранные в траншее, сравнены с конденсатами, отобранными на картах захоронения до и после рекультивации, и конденсатами, собранными в лесу, в 500-1000 м от карт захоронения (табл.3, рис.4). Практически все элементы в конденсатах траншеи содержатся в более низких концентрациях, чем в конденсатах рекультивированных карт захоронения. Исключение составляет мышьяк, концентрации которого в конденсатах стабильны (21-37 мкг/л на картах захоронения и в среднем 29 мкг/л на траншее). Концентрации сурьмы, бария и рубидия заметно выше в конденсатах траншеи. Возможность переноса элементов парогазовыми потоками в условиях окружающей среды означает высокую опасность загрязнения приземного слоя воздуха и атмосферы. Ранее сделана количественная оценка выноса элементов с поверхности карт захоронения [30], в соответствии с которой в течение летних месяцев ~20 кг As (плюс приблизительно такое же количество Mn, Cu, Ni, Ba, на порядок больше Zn) в летучей форме могут поступать в атмосферу.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 3

Концентрации катионов и микроэлементов в конденсатах, собранных на территории складирования отходов комбината «Тувакобальт»

Элемент	Траншея			Карты*	Рекультивированные карты				Условно фоновые карты		
	КТ-1	КТ-2	КТ-3	Среднее	К-2	К-3	К-4	К-5	Ф-1	Ф-2	Ф-3
Ca, мг/л	1,3	1,4	0,91	1,4	0,65	0,5	0,65	0,71	1,3	0,6	0,78
Mg, мг/л	0,034	0,062	0,041	0,24	0,15	0,035	0,088	0,048	0,43	0,33	0,2
Na, мг/л	0,051	0,056	0,1	0,63	0,65	0,15	0,42	0,12	0,67	0,66	0,49
K, мг/л	0,14	0,16	0,27	0,30	0,48	0,27	0,22	0,17	0,16	0,31	0,12
Al, мкг/л	5,4	1,1	1,8	7,0	1,3	0,6	1,5	13,6	1,1	1,4	1,2
Mn, мкг/л	5,6	13,9	7,0	26	29,2	6,5	6,8	12,2	1,1	4,8	5,8
Cu, мкг/л	2,4	5,4	2,4	33	26	12	8,9	14	1,9	12,1	2,1
Zn, мкг/л	11	81	32	490	260	150	62	121	94	49	76
Pb, мкг/л	н.о.**	н.о.	0,21	0,21	0,43	2,1	0,61	4,8	н.о.	0,46	0,11
Cd, мкг/л	3,4	5,1	3,9	1,5	6,3	4,2	3,2	4,4	5,8	1,9	5,6
Co, мкг/л	0,5	3,6	0,9	3,2	16,3	1,1	0,9	2,2	0,7	1,6	1,3
Ni, мкг/л	3,0	16	5,3	15	17	20	4,2	31	16	8,2	4,7
As, мкг/л	20	40	27	36	19	16	17	34	39	21	27
Sb, мкг/л	1,2	1,2	1,5	0,41	0,61	1,5	0,54	1,2	0,72	0,70	0,49
Mo, мкг/л	0,22	0,15	0,24	0,82	0,002	0,06	0,12	0,16	0,6	0,37	0,3
Ba, мкг/л	93	168	180	42	49	235	84	135	70	45	57
Rb, мкг/л	0,70	0,76	0,72	0,44	0,59	0,34	0,18	0,20	0,05	0,20	0,044
Sr, мкг/л	3,5	5,2	4,3	5,2	4,1	3,0	2,2	3,28	18	11	7,9
Ti, мкг/л	0,79	0,74	0,62	0,8	0,47	0,39	0,37	0,53	0,81	0,59	0,56
P, мкг/л	6,94	11,38	26,27	56	9,96	9,51	7,13	8,79	10,47	22,88	4,44
Sn, мкг/л	н.о.	н.о.	0,04	0,19	н.о.	0,30	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.

* Усредненный состав конденсатов (n = 7), собранных на нерекультивированных картах захоронения, данные из [30].
** н.о. – не определено.

Отметим, что некоторые элементы (Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Mo, Sr) в конденсатах траншеи находятся даже в более низких концентрациях, чем в конденсатах, собранных в лесу, на условно фоновой территории. Повышение количества летучих форм элементов на визуально «природных» территориях мы связываем с более активной деятельностью бактериальных сообществ, которые играют большую роль в образовании подвижных форм элементов и их переносе в парогазовых потоках. И наоборот, в агрессивном веществе траншеи микробная деятельность подавлена, и вследствие этого образование летучих форм многих элементов происходит с гораздо меньшей интенсивностью, чем в почвах, содержащих существенно меньше металлов и мышьяка, но зато богатых биотой.

При обнаружении широкого спектра элементов в составе конденсатов, следовательно, переносимых парогазовыми потоками, встает вопрос о формах переноса металлов и металлоидов, так как многие из них считаются инертными в геохимических процессах.

Формы переноса и осаждения. Для того чтобы сделать обоснованные предположения о механизмах и формах миграции металлов и металлоидов в составе эманаций, была проведена серия экспериментов по улавливанию на предметных стеклах осадков из парогазовых потоков от техногенного вещества.

Изучение полученных препаратов на СЭМ показало, что в результате экспериментов на предметных стеклах образовались бесформенные

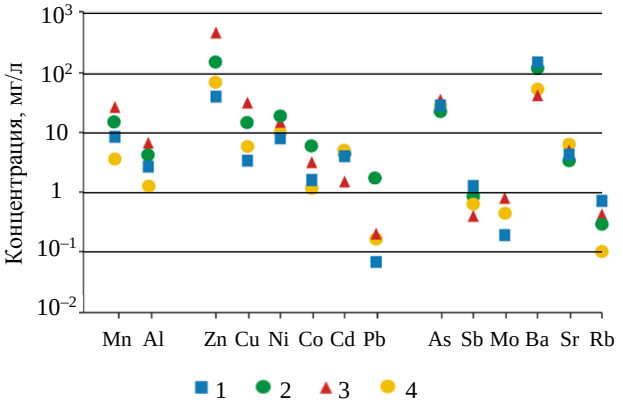


Рис.4. Сравнение концентраций элементов в конденсатах, собранных на разных участках техногенно-природной системы хранилищ отходов

1 – траншея; 2 – рекультивированные карты захоронения; 3 – карты захоронения до рекультивации; 4 – условный фон

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

налеты и пленки (рис.5, *а-е*), в редких случаях – игольчатые срастания (рис.5, *ж, з*), таблитчатые выделения (рис.5, *и*). Размеры этих новообразований, как правило, крайне малы, поэтому при определении состава отложений была учтена возможность их «прожигания» насквозь с захватом подложки, т.е. предметного стекла. В данном случае новообразования улавливались на силикатном натриево-кальциевом предметном стекле, в составе которого определены, мас.%: Si 33,4; Al 0,6; Mg 2,4; Ca 5,9; Na 9,0; K 0,4. При оценке качественного состава новообразованных соединений наличие характерных для стекла элементов не принималось в расчет, хотя в ряде случаев встречались довольно «толстые» пленки, анализ которых по визуальным признакам показывал их собственный состав (рис.5, *г, д*). В данном исследовании рассмотрим элементы, которые не встречались в составе стекла либо находились в нем в существенно более низких концентрациях, чем в препаратах.

В новообразованных выделениях обнаружен набор химических элементов, таких как Ti, Cr, Mn, Ba, Co, Ni, Cu, Zn, Sn, Mo, As, P, S, Cl, F. Их содержания имеют значимые величины, от долей до десятков мас.% (рис.5), что исключает возможность ошибки при определении. В химическом

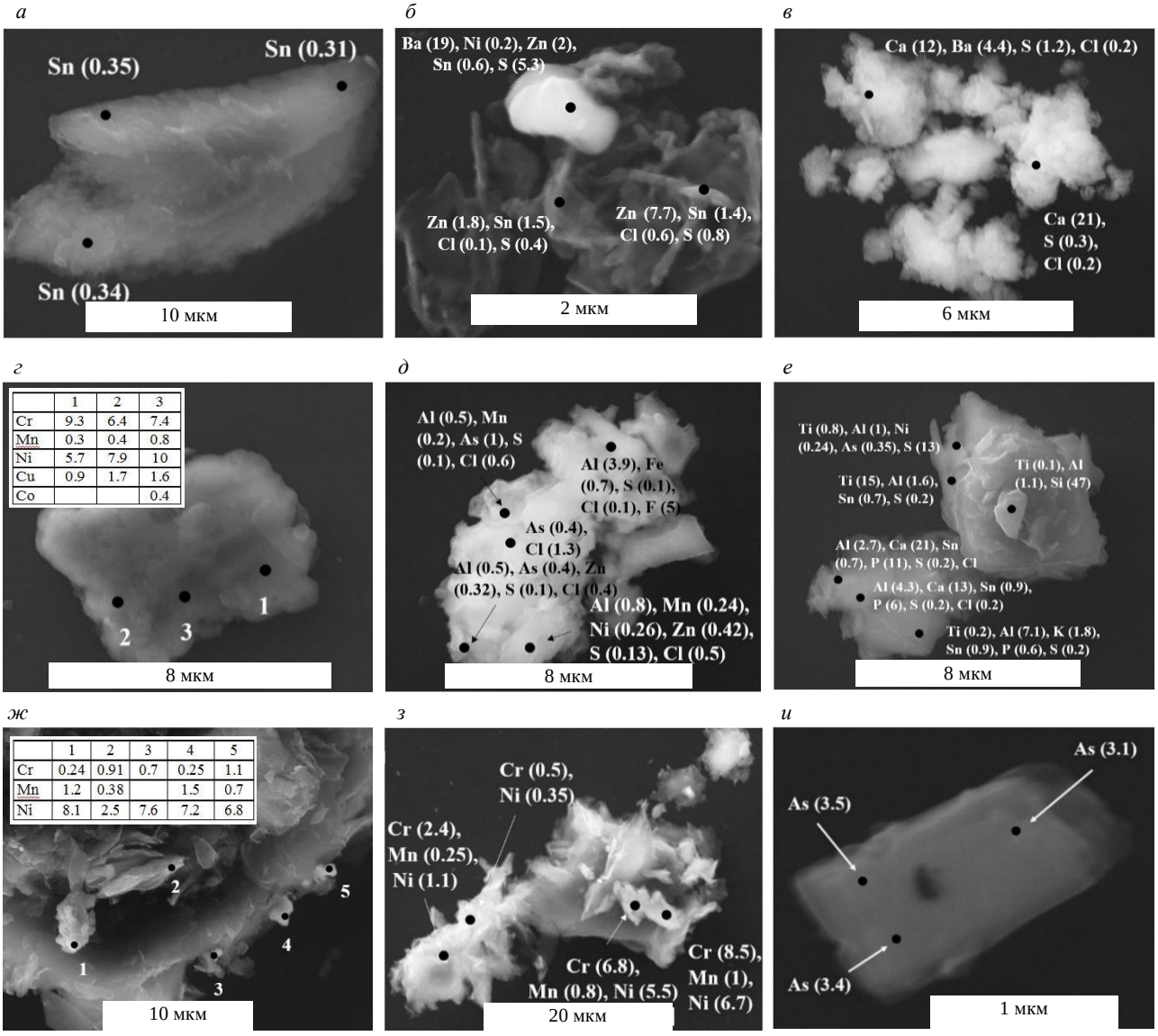


Рис.5. Агрегаты и фазы, осадившиеся на предметном стекле в эксперименте: *а* – пористое образование (достоверно определено только содержание Sn, содержание остальных компонентов существенно ниже, чем в стекле); *б* – агрегат пластинчатых выделений с обособлением-концентратором Ba и металлов (Ni, Zn); *в* – агрегат бесформенных выделений Ca-, Ba-содержащего соединения; *г* – сравнительно однородное обособление-концентратор металлов (Mn, Ni, Cr, Cu); *д-з* – агрегаты облачных и таблитчатых образований сложного состава; *и* – таблитчатое As-содержащее образование.
В скобках и таблицах приведены содержания элементов в массовых процентах

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

составе новообразований уверенно фиксируются, мас.%: Mn 0,2-1,5; Zn 0,4-7,7; Cu 1,6-1,7; Co 0,4; Ni 0,2-10,1; As 0,4-3,5; Ba 4,4-18,9; P 0,6-10,6. Это элементы, содержания которых в конденсатах из разных участков хранилищ могут превышать 10 мкг/л (табл.3, см. рис.4). Кроме того, определены, мас.%: Ti 0,2-15,0; Cr 0,2-8,5; Mo 0,5-0,9; Sn 0,3-10,4; S 0,4-1,34; Cl 0,1-1,33; F 5,0. В некоторых случаях содержания Al, Ca и K в новообразованиях в несколько раз превышают таковые в предметном стекле, что свидетельствует об их участии в составе этих выделений (рис.5, *в*, *д*, *е*).

Ионный состав обнаруженных выделений в связи с их малыми размерами определить затруднительно. Предположительно, обнаруженные налеты и пленки сложены органическими компонентами, в которых идет осаждение металлов и металлоидов, скорее всего, в виде соединений с органическими анионами – формиатами, ацетатами, оксалатами. Эти анионы обнаруживаются в конденсатах довольно часто, а путем термодинамического моделирования показана возможность миграции химических элементов в органических комплексах. Наличие же в составе выделений хлора и серы свидетельствует о возможном участии хлоридов и сульфатов.

В пользу изложенного свидетельствует тот факт, что в ряде случаев при анализе микронных образований, которые «прожигаются» насквозь с захватом подложки, фиксируются только элементы предметного стекла и незначительное количество не свойственных для стекла элементов, например Sn (рис.5, *а*); Zn, Sn, S, Cl (рис.5, *б*); Ba, S, Cl (рис.5, *в*); As (рис.5, *и*). В двух случаях встречены довольно крупные образования, в которых не определено наличие практически никаких элементов, возможно, это углеводородные соединения (рис.5, *ж*, *з*). Сравнивая состав конденсатов, собранных *in situ* на траншее, с составом осажденных пленок, можем сделать обоснованный вывод о том, что парогазовые потоки от техногенного вещества составлены, помимо паров воды, разнообразными органическими соединениями, образующимися вследствие биогенных преобразований вещества. Эти потоки способны выносить в атмосферу многие химические элементы в биодоступной форме (в соединениях с органическими лигандами).

Результаты изучения осадков потоков от вещества траншеи на предметных стеклах хорошо соотносятся с результатами ранее проведенных экспериментов с эритрином [33], в которых также получены бесформенные аморфные агрегаты с включениями металлов и мышьяка в виде соединений неустановленного состава.

Комплексное обследование траншеи показало существование двух путей поступления техногенного вещества в окружающую среду – просачивание высокоминерализованных вод в подземные горизонты установлено на основании геоэлектрической структуры и продолжении высокопроводящей зоны существенно ниже 40 м; вынос многих химических элементов парогазовыми потоками в виде подвижных комплексов, способных мигрировать в летучей фазе.

Подчеркнем, что наличие парогазовых потоков от сульфидных хвостохранилищ, содержащих многие металлы и металлоиды, ставит проблему их воздействия на живые организмы, особенно человека, поскольку обнаруженные элементы в их составе находятся в ионной, биодоступной форме, как показало изучение осадков и налетов. Взаимодействие биологических объектов с металлами и металлоидами ведет к двоякому воздействию, поскольку одни из них входят в состав живых организмов как микроэлементы, выполняя физиологическую роль (Cu, Zn, Se), а другие являются ксенобиотиками (Hg, Ag, As).

Пары, в отличие от пылевых фракций различной дисперсности, могут проникать в респираторные отделы легких, повреждая эпителий, обеспечивающий газообмен, всасываться в кровь со скоростью, сопоставимой с прямым парентеральным введением. Сочетание этих факторов резко повышает биологическую доступность и токсические эффекты, которые сложно предсказать при совместном воздействии входящих в конденсат веществ.

Очевидно, токсические эффекты сочетанного действия смесей тяжелых металлов в биологических системах более разнообразны и некоторые пока не известны, однако все они ведут к нарушению клеточного дыхания, а затем к некрозу или апоптозу, в зависимости от времени экспозиции. Разработка адекватных моделей, позволяющих оценить уровень воздействия смеси токсинов на биологические объекты, понимание механизма их совместных эффектов является следующим шагом в исследовании потоков вещества от сульфидных отвалов и других техногенных объектов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Заключение

С помощью электротомографии построены карты, разрезы и 3D-геоэлектрические модели траншеи, вмещающей отходы комбината «Тувакобальт». Показано, что центральная часть траншеи сложена высокопроводящим веществом, межпоровые воды которого представляют собой высокоминерализованные растворы с содержанием мышьяка до 15 мг/л. Низкоомная (высокопроводящая) зона, сравнительно узкая на поверхности (~20-30 м), постепенно расширяется книзу (на глубине 40 м ее ширина составляет более 100 м) и продолжается за пределами построенной модели. Вглубь зона уходит ниже 48 м, что свидетельствует о проникании межпоровых растворов в горизонты подземных вод.

Состав конденсатов парогазовой смеси, собранных на высокопроводящих участках траншеи свидетельствует о возможности миграции широкого круга элементов с парогазовыми потоками в условиях окружающей среды и их поступлении в атмосферу. Эти результаты указывают на существование мощного процесса «дыхания» хвостохранилищ и отвалов, крайне слабо изученного, но оказывающего сильное влияние на состав атмосферы и приземного воздуха, а значит, и на здоровье проживающего рядом населения. При этом концентрации элементов в конденсатах, собранных на траншее, в некоторых случаях ниже, чем в конденсатах, собранных неподалеку в лиственничном лесу и на рекультивированных картах захоронения. Мы связываем наблюдаемые факты с низкой активностью бактериального сообщества в агрессивной среде траншеи, что является основным фактором образования летучих форм металлов и металлоидов.

Налеты и пленки на стекле, образованные при осаждении парогазовых потоков в эксперименте, состоят главным образом из аморфного вещества органических соединений. В нем обнаружены участки, обогащенные типоморфными металлами и мышьяком без видимых границ и обособленных зерен. Полученные результаты свидетельствуют о переносе химических элементов не в виде отдельных частиц, а в истинном газовом потоке в соединении с органическими анионами (в редких случаях с хлоридами и сульфатами), что определяет их биодоступность и опасность для живых организмов.

Путем комплексного обследования хранилища отходов комбината «Тувакобальт» выявлены пути миграции техногенного вещества с водными (проникание высокоминерализованных растворов в подземные горизонты) и парогазовыми (поступление элементов в летучей форме в приземный слой атмосферы) потоками. Лабораторными экспериментами определены наиболее вероятные формы переноса металлов и металлоидов в газовой фазе.

Авторы благодарят сотрудников полевого отряда Н.В.Юркевич, А.В.Еделева, Д.О.Кучера, С.А.Старостина, М.П.Гору, С.С.Волынкина, принимавших участие в электроразведочном профилировании и отборе проб.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tulisova K., Olenchenko V., Sigachev N. et al.* Engineering and Geophysical Research of the Tailing Dump under the Conditions of Growing Soils of the Base // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 7. № 4242. DOI: 10.3390/app13074242

2. *Балков Е.В., Фадеев Д.И., Карин Ю.Г. и др.* Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 5. С. 783-791. DOI: 10.15372/GiG20170508

3. *Maineult A., Weller A., Martin T. et al.* 3-D impedance networks simulate complex resistivity spectra of sand-pyrite-water mixtures // Geophysical Journal International. 2025. Vol. 242. Iss. 3. № ggaf269. DOI: 10.1093/gji/ggaf269

4. *Gomez-Ortiz D., Martín-Velázquez S., Martín-Crespo T. et al.* Electrical resistivity imaging to monitor water infiltration and contamination risk assessment in tailings ponds // Geologica Acta. 2025. Vol. 23. 17 p. DOI: 10.1344/GeologicaActa2025.23.30

5. *Martín-Crespo T., Gomez-Ortiz D., Pryimak V. et al.* Quantification of Pollutants in Mining Ponds Using a Combination of LiDAR and Geochemical Methods – Mining District of Hiendelaencina, Guadalajara (Spain) // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 5. № 1423. DOI: 10.3390/rs15051423

6. *Martínez-Pagán P., Gómez-Ortiz D., Martín-Crespo T. et al.* Electrical Resistivity Imaging Applied to Tailings Ponds: An Overview // Mine Water and the Environment. 2021. Vol. 40. Iss. 1. P. 285-297. DOI: 10.1007/s10230-020-00741-3

7. *Mollehuara-Canales R., Kozlovskaya E., Lunkka J.P. et al.* Non-invasive geophysical imaging and facies analysis in mining tailings // Journal of Applied Geophysics. 2021. Vol. 192. № 104402. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104402

8. *Mir R., Fullagar P., Darijani M. et al.* Forward modeling and 3D inversion of electromagnetic data collected over the McArthur River uranium deposit in the Athabasca Basin, Canada // Geophysics. 2021. Vol. 87. № 2. P. B129-B143. DOI: 10.1190/geo2021-0199.1

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

9. *Vriens B., Plante B., Seigneur N., Jamieson H.* Mine Waste Rock: Insights for Sustainable Hydrogeochemical Management // Minerals. 2020. Vol. 10. Iss. 9. № 728. DOI: 10.3390/min10090728

10. *Raymond K.E., Seigneur N., Su D., Mayer K.U.* Investigating the Influence of Structure and Heterogeneity in Waste Rock Piles on Mass Loading Rates – A Reactive Transport Modeling Study // Frontiers in Water. 2021. Vol. 3. № 618418. DOI: 10.3389/frwa.2021.618418

11. *Dimech A., Li Zhen Cheng, Chouteau M. et al.* A Review on Applications of Time-Lapse Electrical Resistivity Tomography Over the Last 30 Years: Perspectives for Mining Waste Monitoring // Surveys in Geophysics. 2022. Vol. 43. Iss. 6. P. 1699-1759. DOI: 10.1007/s10712-022-09731-2

12. *Jabrane O., Obda I., El Azzab D. et al.* Combining GPR and VES Techniques for Detecting Shallow Urban Cavities in Quaternary Deposits: Case Studies from Sefrou and Bhalil, Morocco // Quaternary. 2026. Vol. 9. Iss. 1. № 4. DOI: 10.3390/quat9010004

13. *Arranz-González J.C., Adánez-Sanjuán P., Rosario-Beltré A.J. et al.* A global review of sulfide tailings storage facilities to assess the representativeness of surface vs. depth sampling // Applied Geochemistry. 2026. Vol. 202. № 106777. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2026.106777

14. *Parbhakar-Fox A., Lottermoser B.G.* A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices // Minerals Engineering. 2015. Vol. 82. P. 107-124. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.03.015

15. *Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J.* Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update // Applied Geochemistry. 2015. Vol. 57. P. 3-16. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2015.02.008

16. *Давыдов В.А.* Изучение техногенеза Дегтярского рудника с помощью аудиомагнитотеллурических экспресс-зондирований // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 379-387. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.379

17. *Пашкевич М.А., Алексеенко А.В., Нуреев Р.Р.* Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 155-167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32

18. *Алексеев В.А.* Причины образования кислых дренажных вод в отвалах сульфидсодержащих пород // Геохимия. 2022. Т. 67. № 1. С. 69-83. DOI: 10.31857/S0016752522010022

19. *Старостина С.И., Юркевич Н.В., Еделев А.В. и др.* Геохимические аномалии в районе складированных отходов обогащения сульфидных руд // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXX Всероссийской молодежной конференции, 16-21 мая 2023, Иркутск, Россия. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. С. 274-277.

20. *Плюснин А.М., Воронина Ю.С., Украинцев А.В. и др.* Загрязнение атмосферы от хранилищ отходов добычи и переработки вольфрам-молибденовых руд // Геохимия. Т. 68. № 12. С. 1295-1311. DOI: 10.31857/S0016752523110092

21. *Плюснин А.М., Дубенко К.А., Украинцев А.В. и др.* Химический состав атмосферных осадков и конденсационных вод на Озерном полиметаллическом месторождении // Подземная гидросфера: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXIV Совещание по подземным водам востока Сибири и Дальнего Востока с международным участием), 21-28 июня 2024, Екатеринбург, Россия. Екатеринбург: Институт горного дела ИГД УрО РАН, 2024. С. 416-421.

22. *Котенко Т.А., Мельников Д.В., Тарасов К.В.* Газовая эмиссия вулкана Эбеко (Курильские острова) в 2003-2021 гг.: геохимия, потоки и индикаторы активности // Вулканология и сейсмология. 2022. № 4. С. 31-46. DOI: 10.31857/S0203030622040058

23. *Malik N.A.* A decade (2013-2023) of direct sampling from high-temperature fumaroles at Avacha Volcano, Kamchatka: Gas geochemistry, seasonal and long-term variations // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2024. Vol. 455. № 108179. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2024.108179

24. *Малик Н.А., Некрасова М.Ю.* Комплексные исследования активности Авачинского вулкана в 2013 – начале 2020 гг.: наземные, видео и сейсмические наблюдения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 2. Вып. 46. С. 41-54. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-41-54

25. *Копылов Н.И., Каминский Ю.Д.* К вопросу комплексной переработки отвалов Хову-Аксы // Химическая технология. 2017. № 12. С. 555-558.

26. *Лебедев В.И.* Хову-Аксынское месторождение арсенидных кобальтовых руд (Республика Тыва, Россия): новые взгляды на проблему возобновления добычи и переработки // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 3. С. 236-264. DOI: 10.31857/S0016777021030059

27. *Копылов Н.И., Молдурушку М.О.* Изучение влияния исходных содержаний мышьяка отвалов Хову-Аксы на эффективность разработанных режимов их деарсенизации // Вестник Карагандинского университета. Серия: Химия. 2018. № 2 (90). С. 106-112 (in English).

28. *Воробьев С.А., Кужугет Р.В., Ондар Х.Х.* Оценка техногенного загрязнения района горно-обогатительного комбината «Тувакобальт» (Республика Тыва) // Природные ресурсы, среда и общество. 2021. № 3 (11). С. 6-18. DOI: 10.24412/2658-4441-2021-3-6-18

29. *Забелин В.И.* Распределение токсичных химических элементов в природных и антропогенных средах на территории бывшего ГОКа «Тувакобальт» // Состояние и освоение природных ресурсов Тувы и сопредельных регионов центральной Азии. Эколого-экономические проблемы природопользования. Кызыл: Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 2016. Вып. 14. С. 119-128.

30. *Bortnikova S.B., Yurkevich N.V., Gaskova O.L. et al.* Arsenic and metal quantities in abandoned arsenide tailings in dissolved, soluble, and volatile forms during 20 years of storage // Chemical Geology. 2021. Vol. 586. № 120623. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2021.120623

31. *Matsumoto S., Shimada H., Sasaoka T. et al.* Construction of Dry Cover System for Prevention of Acid Mine Drainage at Mine Waste Dump in Open Cast Coal Mines, Indonesia // Journal of Environmental Protection. 2016. Vol. 7. № 2. P. 160-169. DOI: 10.4236/jep.2016.72014

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Девятова А.Ю. и др.* Формы переноса и осаждения элементов в паро-газовых потоках от техногенного вещества // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л.Шварцева, 16-21 октября 2023, Томск, Россия. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. С. 61-64.

33. *Шавекина А.Ш., Бортникова С.Б., Волынкин С.С., Абросимова Н.А.* Распределение As в техногенных отложениях хвостохранилища Хову-Аксы (*Республика Тыва, Россия*) // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 6. С. 744-754. DOI: 10.15372/GiG2025104

***Авторы*: Светлана Борисовна Бортникова,** *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия), https://orcid.org/0000-0003-2395-7406*, **София Павловна Мишенина,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0009-0001-7735-5913*, **Анна Юрьевна Девятова,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*), *devyatovaay@ipgg.sbras.ru, https://orcid.org/0000-0002-1597-0101*, **Артем Яковлевич Шевко,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-2797-3104*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0