

МЫШЬЯК В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕХНОГЕННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Л.М. Павлова

Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
Благовещенск, Россия, e-mail: pav@ascnet.ru

Аннотация: В результате геоэкологической оценки содержания мышьяка в компонентах природной среды геотехнозон золоторудных месторождений (Албын и Токур), выполненной с использованием геохимических коэффициентов, выявлена природная литохимическая аномалия по мышьяку в горных буро-таежных почвах, распространенных в местах расположения месторождений. В геотехнозоне месторождений установлены наиболее высокие содержания мышьяка во всех средах – наземной, воздушной, водной. При карьерном способе разработки распространение мышьяка в компонентах технозоны происходит преимущественно пылеаэрозолями; при подземном – преимущественно поверхностными и подземными водотоками. Более глубокое влияние на биоту оказывает подземный способ отработки месторождения, по-видимому, за счет образования потенциально подвижных форм этого элемента в дренирующих отвалах и хвостохранилищах водотоков. При длительном хранении хвостовых отходов золотодобывающего производства за счет реакций окислительного выветривания As-содержащих минералов образуются неорганические соединения мышьяка преимущественно в форме As(III) и As(V), количественное соотношение между которыми зависит от комплекса факторов – веществных и окислительно-восстановительных характеристик руд, условий хранения, периодичности увлажнения и т.д. Содержание мышьяка в растительности, произрастающей в условиях напряженного литохимического фона, кратно превышает токсичные показатели, что может привести к серьезным последствиям для здоровья проживающего вблизи месторождений населения.

Ключевые слова: мышьяк, оценка, золоторудное месторождение, техногеосистема, растения.

Для цитирования: Павлова Л. М. Мышьяк в элементах техногенной экосистемы золоторудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 58–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_58.

Arsenic in the elements of the gold deposit technogenic ecosystem

L.M. Pavlova

Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Blagoveshchensk, Russia, e-mail: pav@ascnet.ru

Abstract: The article presents the results of a geoecological assessment of arsenic content of the natural environment components in the gold ore deposits (Albyn and Tokur) geotechno zones, carried out using geochemical coefficients. The results obtained showed the presence of a na-

tural lithochemical anomaly for arsenic in mountain brown-taiga soils common in the deposit areas. In the geotechnozone of deposits, the highest concentrations of arsenic were found in all environments – ground, air, and water. With a quarry method of development, the spread of arsenic in the components of the technozone occurs mainly by dust aerosols; in case of underground – mainly by surface and underground watercourses. The underground method of mining the deposit exerts a deeper influence on the biota, apparently due to the formation of potentially mobile forms of this element in the watercourses draining dumps and tailings. During long-term storage of tailing waste from gold mining production, due to the reactions of oxidative weathering of As-containing minerals, inorganic arsenic compounds are formed mainly in the form of As(III) and As(V), the quantitative ratio between which depends on a set of factors – the material and redox characteristics of the ores, conditions storage, frequency of moistening, etc. The content of arsenic in vegetation growing under conditions of a tense lithochemical background is many times higher than toxic levels, which can lead to serious health consequences for the population living near the deposits.

Key words: arsenic, assessment, gold deposit, technogeosystem, plants.

For citation: Pavlova L. M. Arsenic in the elements of the gold deposit technogenic ecosystem. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):58-71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_58.

Введение

Мышьяк – редкий кристаллический элемент, занимает 20-е место по распространенности в земной коре, 14-е – в морской воде и 12-е – в организме человека [1]. Среднее содержание мышьяка в верхней части земной коры, по сообщению [2], оценено в $9,74 \cdot 10^{-4}\%$, в зависимости от составляющей ее породы породы варьирует от 1,2 до $19 \cdot 10^{-4}\%$, в природных водах – 0,1 – 10 мкг/л [3]. По последним данным [4], мышьяк имеет около 600 различных минеральных форм, из которых, согласно [1], ~60% составляют арсенаты, 20% – сульфиды и сульфосоли, остальные 20% – арсениды, арсениты, оксиды, силикаты и элементарный мышьяк. Относящиеся к классам арсенатов, арсенидов, сульфоарсенидов, сульфосолей минералы ассоциированы в основном с сульфидными рудами месторождений золота и других металлов. При выветривании сульфидные минералы мышьяка легко окисляются и переходят в арсенаты. В поверхностных водах

As мигрирует в основном в составе взвеси, хорошо сорбируясь на гидроксидах Fe [5]. При высоких техногенных нагрузках растворимые формы мышьяка, попадая в поверхностные и подземные водотоки, создают проблему. Являясь постоянным компонентом почвы, мышьяк поглощается растениями. Будучи первичными продуцентами трофической цепи, растения обеспечивают вовлечение элемента в биогенные циклы и попадание его по пищевым цепям в организмы теплокровных.

По степени экологической опасности мышьяк относится к группе высокотоксичных, канцерогенных элементов 1 класса опасности, вызывающих серьезные поражения. Поэтому в любых программах по мониторингу состояния окружающей среды контроль за содержанием мышьяка в элементах окружающей среды, как одним из приоритетных загрязнителей, считается обязательным [6].

Наличие значительных количеств мышьяка в компонентах природной сре-

ды преимущественно связано с геологическими процессами и, опосредованно, — с антропогенными. Ежегодно из недр Земли извлекается огромная масса минерального сырья, возрастают объемы отходов горного производства, содержащих токсичные элементы. По данным [7], при обогащении руд золоторудных месторождений до 80% мышьяка попадает в отходы. В районах добычи и переработки минерального сырья образуется быстро развивающаяся в пространстве и времени техногенная экосистема.

В распространении загрязняющих веществ из таких экосистем задействуются все возможные миграционные потоки наземной, воздушной и водной сфер. Золоторудные и россыпные месторождения в Приамурье, а также заброшенные отвалы и хвостохранилища, образованные в результате добычи полезных ископаемых, расположены преимущественно в горных районах с вечной мерзлотой. Разработка месторождений в таких экосистемах вызывает разнообразные нарушения рельефа, водных режимов, почвенного покрова, обеднение состава растительности, усугубляемые наличием мерзлоты. Отсутствие системного эколого-геохимического контроля за содержанием мышьяка в компонентах природной среды техногенных экосистем золоторудных месторождений обусловило актуальность данной работы.

Цель исследования — геоэкологическая оценка степени рассеивания мышьяка при разработке золоторудных месторождений разными способами.

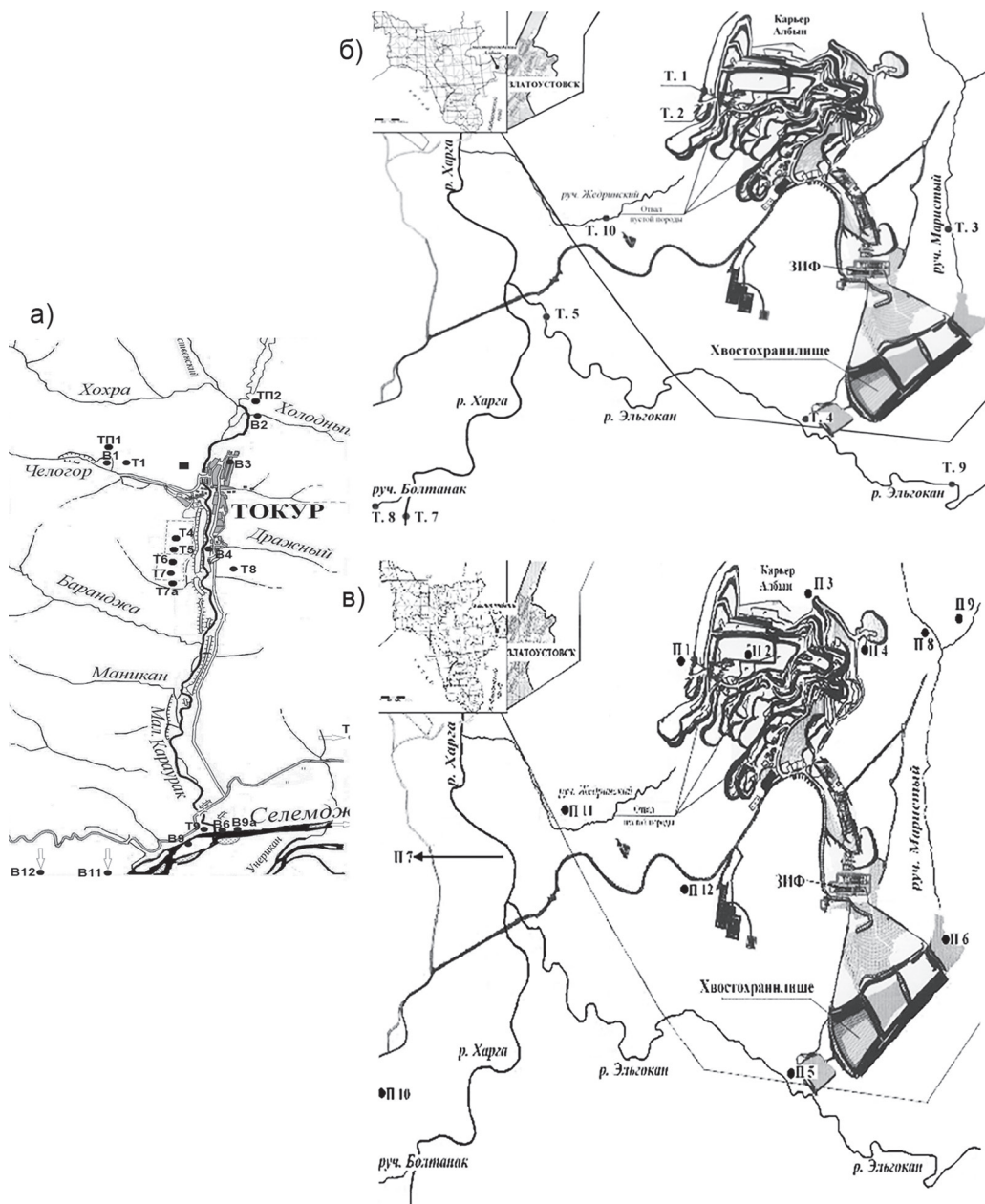
Экспериментальная часть

Анализ данных по концентрациям и трансформации мышьяка в разных средах техногенных экосистем выполняли на примере двух золоторудных месторождений с разными способами обработки: месторождение Албын разрабатывается открытым способом с 2011 г.

по настоящее время; месторождение Токур отрабатывалось подземным способом с 1941 по 1996 гг. и в настоящее время законсервировано мокрым способом. Оба месторождения — представители золотокварцевой формации Харгинского рудно-россыпного узла [8] и оба приурочены к бассейну р. Селемджа. Этот район характеризуется горно-сопочным рельефом, где множество глубоких долин перемежаются сопкообразными возвышенностями до 1500 м высотой. В период с 2013 по 2016 гг. в геотехнозонах этих месторождений были отобраны пробы снега, грунтов, пород, поверхностных водотоков, почв, растений. Площадками отбора проб на Токурском месторождении (53°08'04" — 53°16'12" N, 132°51'00" — 132°90'62" E) была охвачена техногенно преобразованная территория самого рудника и хвостохранилища, а также условно фоновая территория в 6 км от технозоны месторождения (см. рисунок, а). На Албынском месторождении (52°92'85" — 52°96'82" N, 133°55'01" — 133°68'48" E) в качестве техногенно преобразованной территории использовали мониторинговые площадки по окружности карьера, вблизи хвостохранилища (рисунок, б, в); в качестве условно фоновой — площадки в 5 и 30 км от рудного поля.

Основными поверхностными водотоками для геотехнозоны Токурского месторождения являются ручьи Челогор, Холодный, р. М. Караурак (правый приток р. Селемджа); для геотехнозоны Албынского рудника — р. Харга (левый приток р. Селемджа) и впадающие в нее р. Эльгокан с ручьями Маристый, Жедринский, Болтанак [9, 10].

Отбор проб воды из поверхностных водотоков был проведен не только практически по всей гидрографической сети этих месторождений (см. рисунок, а, б), но и вниз по течению р. Селемджа на 220 км.



Схемы расположения точек отбора проб на месторождениях: Токур по [9] (а); на месторождении Албын: точки отбора проб воды по [10] (б), точки грунтов по [11] (в)

Schemes of sampling points location at the deposits: Tokur according to [9] (a); at the Albyn deposit: water sampling points according to [10] (b) and soil points according to [11] (v)

Надземную часть растений, отобранных в технозонах месторождений, — спиреи дубравколистной, злаков, лабазника дланевидного, василистника малого, латука сибирского, клевера лугового, клевера ползучего, подорожника, осоки вздутоносой, полыни веничной, полыни обыкновенной, иван-чая узколистного, на фоновой площадке — багульника и осок, сушили при комнатной температуре, перемалывали и усредняли. Дополнительно на Токурском месторождении отбирали вегетативную биомассу древесных растений (тополя душистого, березы, ольхи кустарниковой, кедрового стланика); в отдельных точках — рододендрона даурского, брусники обыкновенной, зеленых мхов, грушанки круглолистной, хвоща приречного.

Для анализа растительных, водных и почвенно-грунтовых проб использовали масс-спектральный (Х-7, Thermo Elemental, США) и атомно-эмиссионный (ICAP-61, Thermo Jarrell Ash, США) методы (в АСИЦ ИПТМ РАН). В качестве сравнительных концентраций элементов для определения степени их миграционной подвижности использовали показатели региональных фоновых, среднемировых значений As в разных средах, а также санитарно-гигиенических нормативов [СанПин 1.2.3685-21]. Степень концентрации элемента оценивали по показателям эмпирических коэффициентов, характеризующих систему «порода — почва — растение»: КК — коэффициент концентрации, КН — коэффициент накопления, КА — коэффициент аномальности [12, 13].

Для определения источника вклада As (литогенного или иного) в элементный состав растений рассчитали коэффициенты обогащения (КО) относительно среднего состава континентальной земной коры по формуле $КО = (As/Al) \text{ проба} / (As/Al) \text{ земная кора}$, где As, Al — средние содержания элементов в расте-

ниях и в верхней части континентальной земной коры [14].

Результаты и их обсуждение

Выявлены высокие содержания мышьяка не только в почвогрунтах технозоны месторождений, но и в природных почвах естественного сложения в районе расположения месторождений (табл. 1). В последнее время вопрос о предельно допустимых концентрациях (ПДК) мышьяка активно обсуждается в научной среде в связи с противоречивостью мониторинговых данных по содержанию элемента в почвах. Средние концентрации As в верхнем слое незагрязненной почвы могут достигать 10 мг/кг [15], тогда как предельно допустимое его содержание составляет 2 мг/кг.

Значительное превышение ПДК мышьяка в фоновых буро-таежных почвах (в 5–17 раз) и высокая кратность КК элемента относительно почвенных кларков (2–5,9) свидетельствуют о повышенном геохимическом фоне по мышьяку горных буро-таежных почв северо-востока Амурской области. Изменение ландшафтно-геохимических условий в результате деятельности добывающих комплексов привело к формированию в зонах месторождений техногенной литохимической аномалии по мышьяку, о чем свидетельствуют КК и КА для этих участков. Санитарно-гигиенические нормативы не учитывают формы нахождения As в почвах, но известно, что в кислой и слабокислой среде подвижность As незначительная, так как образующиеся арсенат-ионы закрепляются полуторными окислами Fe, Mn, но с ростом pH растворимость As, а значит его подвижность, возрастают [16, 17].

При разработке месторождения карьерным способом особое значение приобретает воздушный перенос загрязняющих веществ. Склонность мышьяка к атмосферному переносу в составе пы-

Таблица 1

Мышьяк в почве и почвогрунтах геотехнозоны золоторудных месторождений
Arsenic in soil and soils of the geotechnozone of gold deposits

Зона	n	рН	Концентрация As, ppm		КК/КА
			M	min-max	
Условно фоновая зона					
Токур	3	4,22 – 6,62	33	23 – 38	5,9**
Албын	4	4,9	11	5 – 17	2**
Буферная зона					
Токур*	5	9,29	640	38 – 1251	114/19
Албын	1	–	23	–	2/2
Технозона					
Токур:					
отвалы шахтных пород*	8	–	2031	360 – 7940	363/62
хвостохранилище* 0 – 10 см	7	8,86 – 9,26	1385	803 – 1720	247/42
хвостохранилище 70 – 90 см	3	–	2172	1592 – 3282	388/66
хвостохранилище* 130 – 230 см	6	–	1362	853 – 2430	243/41
Албын	7	4,56-7,05	272	12-1776	49/25
Санитарно-гигиенические и среднемировые показатели					
ПДК [СанПин 1,2.3685-21]			2		
Кларк почв по [18]			5		
Кларк верхней континентальной коры [19]			5,6		
Примечание: – – нет данных; n – количество учетных точек; M – среднеарифметическое значение; * – с учетом данных из [20]; ** – КК рассчитан по отношению к кларку почвы.					

левых выбросов в технозоне месторождений открытого типа разработки предопределяет обширность ареалов его рассеивания. Определение вклада пы-

левой составляющей в аэрогенное рассеивание мышьяка подтвердило, что в технозоне месторождения в составе пылеаэрозолей содержание элемента в

Таблица 2

Мышьяк в пылевых выбросах на территории золоторудного месторождения Албын
Arsenic in dust emissions on the territory of the Albyn gold deposit

Зона	n	Pn, мг/м ² ·сут	Содержание As	
			в твердой части снега, ppm	в растворимой части снега, мкг/дм ³
Условно фоновая зона	1	2,06	18,2	0,53
Буферная зона (5 км)	1	11,5	180	2,5
Технозона	4	4000 – 4716	281	112
ПДК [СанПин 1.2.3685-21]	–		2	10
Фон континентальных территорий [7]	–	10 – 20	–	–
Примечание: – – нет данных; Pn – показатель среднесуточная пылевой нагрузки.				

растворимой и нерастворимой частях превышает санитарные нормативы на 1–3 порядка (табл. 2).

Согласно обобщающим данным [21], высвобождение As из отвалов, его распространение и закрепление в окружающей среде обусловлено комплексом разнообразных окислительно-восстановительных и физическо-химических реакций — из сульфидных минералов процессами высвобождения-растворения; в компонентах наземной среды — через процессы адсорбции-десорбции другими минералами. По химическим свойствам мышьяку присущи 4 степени окисления (+5, +3, 0, -3), что обуславливает и разную степень токсичности этого элемента — As(III) более токсичен и более подвижен, чем As(V). В водной среде доминирующая форма As, его трансформации напрямую зависят от pH и Eh, при этом широко распространен-

ными формами являются две — арсенит (As(III)) и арсенат (As(V)), количественное соотношение между которыми определяется редокс-условиями среды. В восстановительных условиях и нейтральной среде превалирует арсенит, тогда как в хорошо окисленных условиях преобладает арсенат [16, 17]. Но вследствие медленной скорости протекания окислительно-восстановительных реакций для этого элемента в любых средах можно обнаружить присутствие обеих форм мышьяка, что объясняет высокую степень его биодоступности.

Зона многолетней мерзлоты на северо-востоке Амурской области характеризуется наличием надмерзлотных вод. Насыщение до метровой глубины грунтов водой, на участках без хорошего стока достигающей дневной поверхности, происходит к концу летнего сезона в период муссонных дождей. Взаимо-

Таблица 3

Мышьяк в поверхностных природных водотоках месторождений
Arsenic in surface natural watercourses of deposits

Поверхностные водотоки месторождений	n	pH	Содержание As, мкг/дм ³	
			M	min-max
Условно фоновая зона				
Токур	6	6,8–7,4	1,23	0,3–1,6
Албын	2	6,64–6,91	0,51	0,5–0,51
Буферная зона				
Токур	6	6,2–7,64	63,99	11,8–173
Албын	4	6,4–8,4	1,5	0,53–2,3
Технозона				
Токур*	5	7,31–7,66	90,3	14–190
Албын	3	7,08–7,20	43,2	21,5–86,0
Санитарно-гигиенические, среднемировые и региональные показатели				
р. Амур (в среднем течении) [22]	2	—	0,51	0,4–0,62
р. Амур (в нижнем течении) [22]	13	—	0,78	0,52–1,4
Среднее в реках мира по [23]	—	—	0,62	
Кларк [24]	—	—	2	
ПДК [СанПин 1.2.3685-21]	—	—	10	—
Примечание: n — количество образцов; M — среднеарифметическое; * — с учетом данных из [20].				

действуя с минеральными отходами в отвалах и хвостохранилищах, водотоки способствуют подкислению дренирующих водных потоков за счет окисления сульфидных минералов и образования в таких условиях хорошо растворимых сульфатов других элементов, миграция которых с подземными и поверхностными потоками обуславливает их широкое рассеивание.

В воде поверхностных водотоков на фоновой территории содержание мышьяка диагностируется на уровне среднемировых значений (табл. 3) и намного меньше установленных ПДК, тогда как в воде поверхностных водотоков, дренирующих технозоны месторождений, содержание мышьяка достигает значительных величин.

Разнос мышьяка водотоками колеблется от сотен метров до нескольких километров, что подтверждается данными [22] о его содержании в воде р. Амур, аккумулирующей все водотоки области, на уровне среднемировых значений. Растворимость мышьяка в природных водах предопределяет обширность ареалов его рассеивания, но интенсивность миграции ограничивается активной сорбцией элемента глинистыми частицами, гидроксидами и органическим веществом, что приводит к осаждению и накоплению элемента в речной взвеси. По нашим данным, максимальное содержание As в речной взвеси бассейна р. Селемджа наблюдалось в устье р. М. Караурак

(на удалении ~7–8 км от технозоны Токурского месторождения), снижаясь до среднемировых показателей только к 180 км.

От формы нахождения мигрирующих элементов в компонентах окружающей среды зависит их доступность живым организмам. В лабораторных экспериментах по выщелачиванию As из грунта Токурского хвостохранилища (с разными концентрациями As — 3,8 и 1,2 мг/г) использовали снеготалую воду и NH_4Ac , имитирующие действие атмосферных осадков и образование подвижной (обменной) фракции As. Полученные результаты показали, что в водных вытяжках в среднем обнаруживается от 0,24 до 0,45% As от его валового содержания, среди которых количество арсенидов и арсенатов составляет соответственно 0,09–0,06% и 0,06–0,11% (табл. 4). Количество мышьяка в обменной фракции, в зависимости от его концентрации в исходной пробе, составляет соответственно 1,05 и 1,44%, среди которых 0,84 и 1,77% составляют арсениды и 0,15–0,85% арсенаты.

Известно, что количество каждой из форм мышьяка сильно варьирует как в разных по вещественному составу минеральных отходах, так и в различных окислительно-восстановительных условиях — в виде H_2AsO_4^- арсенат представлен в основном в нейтральной водной среде, тогда как арсенид в форме H_3AsO_3 — в восстановительной среде

Таблица 4

Содержание растворимых форм мышьяка в выщелачивающих растворах
Content of soluble forms of arsenic in leaching solutions

Варианты	Асвал		As(III)		As(V)	
	мг/дм ³	%	мг/дм ³	%	мг/дм ³	%
Вода 1	0,758	0,24	0,36	0,09	0,23	0,06
Вода 2	0,913	0,45	0,07	0,06	0,13	0,11
NH ₄ Ac 1	3,997	1,05	6,41	0,84	1,16	0,15
NH ₄ Ac 2	3,358	1,44	4,12	1,77	1,97	0,85

[25 – 27]. Геохимические процессы, за счет которых происходит перераспределение и миграция химических элементов с водными потоками, усиливаются в условиях свободного доступа кислорода и наличия атмосферных осадков, так как образующиеся при этом гидроксиды и сульфаты Fe(III) будут выступать, совместно с кислородом воздуха, в роли окислителя. На трансформации As в пресной воде будут влиять реакции его соосаждения с гидроксидами железа, так как у обеих форм As прослеживается сильное сродство к оксидам Fe [27]. В дальнейшем при попадании этой фазы в среду с восстановительными условиями она будет растворяться.

После взаимодействия экспериментальных выщелачивающих растворов с материалом хвостохранилища показатели их кислотности увеличились. Аналогичную картину наблюдали и в природных условиях при измерении кислотности природных поверхностных водотоков вблизи хвостохранилища. Различия в количественном соотношении долей арсенидов и арсенатов в экспериментальных растворах, по-видимому, можно объяснить не только изначально различающимся (локально) составом минеральных отходов, сформированных из разных по составу рудных жил, но и разной степенью их трансформации за длительный период складирования. Материал хвостохранилища по вещественному составу в целом представляет собой тонкодисперсную массу пылеватого песка, в составе которого наблюдается преобладание осколков разных минералов: кварца, полевого шпата, амфибола, слюды, кальцита, и незначительных количеств слюдисто-глинистых минералов, гидроксидов железа, пирита, арсенопирита, сфалерита. Чередование процессов обводнения и подсушивания минерального вещества хвостохранилища будет вызывать попеременное изменение ре-

докс-режимов и кислотности грунтовых растворов за счет окисления сульфидов и нейтрализации образующихся продуктов кальцитом. В периоды обводнения в зонах с невысоким содержанием сульфидов, когда образуется слабощелочная среда за счет растворения кальцита, высвобождающийся из минералов мышьяк будет закрепляться на поверхности гидроокислов Fe преимущественно в форме арсенидов. Согласно данным [25, 26], восстановительные условия способствуют подвижности мышьяка либо за счет прямой редукции As(V) в As(III), либо за счет восстановления носителя, в качестве которого будет выступать Fe(III), с последующей реакцией высвободившегося As(V). Таким образом, воздействие циклично изменяющихся природных факторов на минеральное вещество хвостохранилищ приводит к попеременному изменению соотношений водорастворимых, подвижных и потенциально подвижных форм соединений химических элементов.

В биогеохимическом отношении мышьяк относится к группе элементов слабого накопления и среднего биологического захвата [28]. Наличие мышьяка в водно-наземных средах в широких пределах закономерно привело к его накоплению в растительной биомассе. Усредненные показатели накопления мышьяка растительностью на фоновой территории (табл. 5) не превышают установленных норм [29], но для отдельных видов растений на условно фоновой территории Токурской зоны показатели содержания мышьяка превышают токсичную норму. По особенностям поглощения некоторые виды растений могут быть концентраторами отдельных элементов, у которых этот элемент может находиться в повышенных (до 2 порядков) количествах по сравнению с обычными растениями. Что касается технозоны Токурского месторождения, то усреднен-

Таблица 5

Мышьяк в биомассе растений, произрастающих на территории золоторудных месторождений
Arsenic in the biomass of plants growing on the territory of gold deposits

Зона	n	Содержание As, ppm		КН/КБП	КО/КК
		M	min-max		
Условно фоновая зона					
Токур	14	1,79	0,17–7,9	–/0,22–3,85	0,01–0,04/
Албын	2	0,26	0,17–0,34	1,8/–	0,002/
Буферная зона					
Токур	2	6,1	3,2–8,9	–/0,07–0,25	0,03 /3,4
Албын	–	–	–	–/–	–
Технозона					
Токур	15	56,7	7,53–169,9	14,7/0,07–1,64	0,12–0,25/31,6
Албын	8	0,87	0,37–1,3	4,88/–	0,002/3,3
Нормируемые и среднемировые показатели					
Уровень в травах суши: по [28] по [29]			0,2 0,009–1,5		
Кларк: по [28]			0,1–0,2		
В ежегодном приросте Мировой суши, сухая фитомасса/зола: по [30]			0,12/3		
Норма по [29]			1–1,7		
Избыточная (токсичная): по [29]			5–20		
КБП растительности континентов/ Амурской области: по [30]				1,58/0,3	
Примечание: n – количество образцов; – – нет данных; M – среднеарифметическое.					

ное содержание мышьяка в 2,5 раза превышает избыточную, токсичную норму.

Максимальные показатели оценочных коэффициентов (КБП, КК) поглощения мышьяка растительностью исследуемых технозон значительно превышают среднемировые показатели. Источником поступления As в ткани растений являются почва и почвогрунты, о чем свидетельствуют КО (< 10). Биоаккумуляция мышьяка растениями потенциально может привести к серьезным последствиям для здоровья проживающего вблизи месторождений населения, использующего растительное сырье (грибы, ягоды) в пищу. Снижению биодоступности элемента способствуют тяжелый грану-

лометрический состав и высокое содержание гумуса в почве.

Выводы

В результате геоэкологической оценки содержания мышьяка в компонентах природной среды геотехнозон золоторудных месторождений (Албын и Токур), выполненной с применением эмпирических геохимических коэффициентов, выявлена природная литохимическая аномалия по мышьяку в горных буротажных почвах, распространенных в местах расположения месторождений.

В технозоне месторождений (карьер, места складирования отвалов, хвостохранилища) установлены наиболее вы-

сокие содержания мышьяка во всех средах — наземной, воздушной, водной.

При карьерном способе разработки распространение токсичного элемента в компонентах технозоны происходит преимущественно пылеаэрозолями; при подземном — преимущественно поверхностными и подземными водотоками. Более глубокое влияние на биоту происходит при подземном способе обработки месторождения, по-видимому, за счет образования потенциально подвижных форм этого элемента в дренирующих отвалы и хвостохранилища водотоках. При длительном хранении хвостовых отходов золотодобывающего производства за счет реакций окислительного вы-

ветривания As-содержащих минералов образуются неорганические соединения мышьяка преимущественно в форме As(III) и As(V), количественное соотношение между которыми зависит от комплекса факторов — вещественных и окислительно-восстановительных характеристик руд, условий хранения, периодичности увлажнения и т.д.

Содержание мышьяка в растительности, произрастающей в условиях напряженного литохимического фона, кратно превышает избыточные, токсичные показатели, что может привести к серьезным последствиям для здоровья проживающего вблизи месторождений населения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mandal B. K., Suzuki K. T. Arsenic round the world: a review // *Talanta*. 2002, vol. 58, pp. 201–235.
2. Григорьев Н. А. Распределение мышьяка в верхней части континентальной коры // *Литосфера*. — 2012. — № 2. — С. 160–165.
3. Курсков С. Н., Растегаев О. Ю., Чупис В. Н. Мышьяк в природных системах и его эссенциальность // *Теоретическая и прикладная экология*. — 2010. — № 3. — С. 33–41.
4. *Mineral commodity summaries* 2020. U.S. Geological Survey. 2020, 200 p. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>.
5. Stetson S. J., Erickson M. L., Brenner J., Berquist E. C., Kanagy C., Whitcomb S., Lawrence C. Stability of inorganic and methylated arsenic species in laboratory standards, surface water and groundwater under three different preservation regimes // *Applied Geochemistry*. 2021, vol. 125, article 104814. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104814.
6. Dias A. C., Fontes M. P. F., Ferreira M. da S., Vergütz L., Fendorf S. Residual As(V) in aqueous solutions after its removal by synthetic minerals // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022, vol. 233, article 116. DOI: 10.1007/s11270-022-05576-y.
7. Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов. Кн. 3: Редкие р-элементы. — М.: Недра, 1996. — 352 с.
8. Степанов В. А., Мельников А. В. Токурский золоторудный центр Приамурской золотоносной провинции // *Региональная геология и металлогения*. — 2022. — № 90. — С. 107–116. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_90_107–116.
9. Pavlova L. M., Shumilova L. P., Radomskaya V. I., Kezina T. V. Assessment of arsenic content in the elements of the man-general ecosystem of the gold deposit // *Russian Journal of General Chemistry*. 2022, vol. 92, no. 13, pp. 2999–3012.
10. Radomskaya V. I., Radomskii S. M., Pavlova L. M., Shumilova L. P. Hydrogeochemical aspects of the behavior of elements at the development of the Albynskoe gold field, Amur basin // *Water Resources*. 2019, vol. 46, no. 2, pp. 226–241.
11. Радомская В. И., Радомский С. М., Павлова Л. М., Кулик Е. Н. Особенности миграции редкоземельных элементов в природных и техногенных экологических системах на примере Албынского золоторудного месторождения Приамурья // *Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокринология*. — 2017. — № 1. — С. 15–27.

12. Романкевич Ю. А. Распределение тяжелых металлов в донных отложениях прудов г. Невсжа // Природопользование. – 2023. – № 2. – С. 84–97. DOI: 10.47612/2079-3928-2023-2-84-97.

13. Ефремова Т. Т., Ефремов С. П. Эколого-геохимическая оценка уровней загрязнения тяжелыми металлами и серой бугристых торфяников юга Таймыра // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 965–974.

14. Шевченко В. П., Покровский О. С., Стародымова Д. П., Васюкова Е. В., Лисицын А. П., Дровнина С. И., Замбер Н. С., Махнович Н. М., Саввичев А. С., Сонке Й. (Sonke J.). Геохимия эпигейных лишайников водосборного бассейна Белого моря // ДАН. – 2013. – Т. 450. – № 1. – С. 87–93.

15. Gerdelidani A. F., Towfighi H., Shahbazi K., Lamb D. T., Choppala G., Abbasi S., Bari A. S. M. F., Naidu R., Rahman M. M. Arsenic geochemistry and mineralogy as a function of particle-size in naturally arsenic-enriched soils // Journal of Hazardous Materials. 2021, vol. 403, article 123931.

16. Manning B. A., Goldberg S. Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals // Soil Science Society of America Journal. 1996, vol. 60, pp. 121–131.

17. Manning B. A., Fendorf S. E., Goldberg S. Surface structures and stability of arsenic(III) on goethite: spectroscopic evidence for inner-sphere complexes // Environmental Science & Technology. 1998, vol. 32, pp. 2383–2388.

18. Sarkar A., Paul B. The global menace of arsenic and its conventional remediation. A critical review // Chemosphere. 2016, vol. 158, pp. 37–49. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.05.043.

19. Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2015. – № 2. – С. 7–11.

20. Малмыгин С. Г., Громаковский И. Ю., Ижэндеева Ю. В. Материалы подсчета запасов золота в хвостохранилище Токурской ЗИФ по состоянию на 01.12.2004. Протокол АмурТКЗ № 582/1 от 16.12.2004. Пер. № 27614. – Благовещенск: ЗАО «Континент Ойл», 2004.

21. Remigio A. C., Rubinos D. A., van der Ent A., Edraki M. Geochemical cycles of arsenic in historic tin tailings from multiple ore sources: an example from Australia // Water, Air, & Soil Pollution. 2021, vol. 232, article 497. DOI: 10.1007/s11270-021-05447-y.

22. Чудаева В. А., Шестеркин В. П., Чудаев О. В. Микроэлементы в поверхностных водах бассейна реки Амур // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38. – № 5. – С. 606–617.

23. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters / Treatise on Geochemistry. 2014, pp. 195–235. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6.

24. Гордеев В. В., Лисицын А. П. Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 5-6. – С. 721–744.

25. Vodyanitskii Y. N. Status and behavior of natural and technogenic forms of As, Sb, Se, and Te in ore tailings and contaminated soils: a review // Eurasian Soil Science. 2010, vol. 43, no. 1, pp. 30–38.

26. Vodyanitskii Y. N. Determination of the oxidation states of metals and metalloids: an analytical review // Eurasian Soil Science. 2013, vol. 46, no. 12, pp. 1139–1149.

27. Vodyanitskii Y. N. The role of iron in the fixation of heavy metals and metalloids in soils: a review of publications // Eurasian Soil Science. 2010, vol. 43, no. 5, pp. 519–532.

28. Солодухина М. А., Юргенсон Г. А., Лушникова А. Ю. Мышьк в растениях природной геохимической аномалии Забайкальского края (на примере Шерловогорского рудного района) // Ученые записки ЗабГГПУ. – 2012. – № 1(42). – С. 79–86.

29. Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton: CRC Press, 1984, 315 p.

30. Стеблевская Н. И., Медков М. А., Молчанов В. П., Полякова Н. В., Моисеенко Л. И., Зориков П. С., Батырбаева Н. В. Изучение биогеохимического накопления микроэлементов в почвах и растениях Дальнего Востока // Вестник ДВО РАН. – 2006. – № 2. – С. 57–63. **ГИАС**

REFERENCES

1. Mandal B. K., Suzuki K. T. Arsenic round the world: a review. *Talanta*. 2002, vol. 58, pp. 201–235.

2. Grigoriev N. A. Distribution of arsenic in the upper part of the continental crust. *Lithosphere*. 2012, no. 2, pp. 160–165. [In Russ].

3. Kurskov S. N., Rastegaev O. Yu., Chupis V. N. Arsenic in natural systems and its essentiality. *Theoretical and applied ecology*. 2010, no. 3, pp. 33 – 41. [In Russ].
4. *Mineral commodity summaries 2020*. U.S. Geological Survey. 2020, 200 p. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>.
5. Stetson S. J., Erickson M. L., Brenner J., Berquist E. C., Kanagy C., Whitcomb S., Lawrence C. Stability of inorganic and methylated arsenic species in laboratory standards, surface water and groundwater under three different preservation regimes. *Applied Geochemistry*. 2021, vol. 125, article 104814. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104814.
6. Dias A. C., Fontes M. P. F., Ferreira M. da S., Vergütz L., Fendorf S. Residual As(V) in aqueous solutions after its removal by synthetic minerals. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2022, vol. 233, article 116. DOI: 10.1007/s11270-022-05576-y.
7. Ivanov V. V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov*. Kn. 3: Redkie p-elementy [Ecological geochemistry of elements. Book 3: Rare p-elements], Moscow, Nedra, 1996, 352 p.
8. Stepanov V. A., Melnikov A. V. Tokur gold mining center of the Amur gold-bearing province. *Regional geology and metallogeny*. 2022, no. 90, pp. 107 – 116. [In Russ]. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_90_107 – 116.
9. Pavlova L. M., Shumilova L. P., Radomskaya V. I., Kezina T. V. Assessment of arsenic content in the elements of the man-general ecosystem of the gold deposit. *Russian Journal of General Chemistry*. 2022, vol. 92, no. 13, pp. 2999 – 3012.
10. Radomskaya V. I., Radomskii S. M., Pavlova L. M., Shumilova L. P. Hydrogeochemical aspects of the behavior of elements at the development of the Albynское gold field, Amur basin. *Water Resources*. 2019, vol. 46, no. 2, pp. 226 – 241.
11. Radomskaya V. I., Radomskii S. M., Pavlova L. M., Kulik E. N. Peculiarities of migration of rare-earth elements in natural and technogenic ecological systems on the example of the Albynское gold deposit in the Amur Region. *Geology. Inzhenernaya Geologiya. Hydrogeology. Geocrinology*. 2017, no. 1, pp. 15 – 27. [In Russ].
12. Romankevich Yu. A. Distribution of heavy metals in bottom sediments of ponds of Nesvizh city. *Prirodopol'zovanie*. 2023, no. 2, pp. 84 – 97. [In Russ]. DOI: 10.47612/2079-3928-2023-2-84-97.
13. Efremova T. T., Efremov S. P. Ecological and geochemical assessment of heavy metal and sulfur pollution of hilly peatbogs in Southern Taimyr. *Siberian journal of ecology*. 2014, no. 6, pp. 965 – 974. [In Russ].
14. Shevchenko V. P., Pokrovskij O. S., Starodymova D. P., Vasyukova E. V., Lisicyn A. P., Drovni-na S. I., Zamber N. S., Mahnovich N. M., Savvichev A. S., Sonke J. Geochemistry of epigeic lichens in the White Sea drainage basin. *Doklady Akademii nauk*. 2013, vol. 450, no. 1, pp. 87 – 93. [In Russ].
15. Gerdelidani A. F., Towfighi H., Shahbazi K., Lamb D. T., Choppala G., Abbasi S., Bari A. S. M. F., Naidu R., Rahman M. M. Arsenic geochemistry and mineralogy as a function of particle-size in naturally arsenic-enriched soils. *Journal of Hazardous Materials*. 2021, vol. 403, article 123931.
16. Manning B. A., Goldberg S. Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals. *Soil Science Society of America Journal*. 1996, vol. 60, pp. 121 – 131.
17. Manning B. A., Fendorf S. E., Goldberg S. Surface structures and stability of arsenic(III) on goethite: spectroscopic evidence for innersphere complexes. *Environmental Science & Technology*. 1998, vol. 32, pp. 2383 – 2388.
18. Sarkar A., Paul B. The global menace of arsenic and its conventional remediation . A critical review. *Chemosphere*. 2016, vol. 158, pp. 37 – 49. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.05.043.
19. Kasimov N. S., Vlasov D. V. Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeo-chemistry. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*. 2015, no. 2, pp. 7 – 11. [In Russ].
20. Malmygin S. G., Gromakovskiy I. Yu., Izhendeeva Yu. V. *Materialy podscheta zapasov zolota v khvostokhranilishche Tokurskoy ZIF po sostoyaniyu na 01.12.2004. Protokol AmurTKZ No. 582/1 ot 16.12.2004. Reg. No. 27614* [Materials of calculation of gold reserves in the tailings of the Tokur gold processing plant as of 01.12.2004. Protocol of AmurTKZ No. 582/1 dated 12/16/2004. Reg. No. 27614], Blagoveshchensk, ZAO «Kontinent Oyl», 2004. [In Russ].
21. Remigio A. C., Rubinos D. A., van der Ent A., Edraki M. Geochemical cycles of arsenic in historic tin tailings from multiple ore sources: an example from Australia. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2021, vol. 232, article 497. DOI: 10.1007/s11270-021-05447-y.

22. Chudaeva V. A., Shesterkin V. P., Chudaev O. V. Trace elements in the surface waters of the Amur river basin. *Water resources*. 2011, vol. 38, no. 5, pp. 606 – 617.
23. Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry*. 2014, pp. 195 – 235. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6.
24. Gordeev V. V., Lisitzin A. P. Geochemical interaction between the freshwater and marine hydro-spheres. *Geologiya i geofizika*. 2014, vol. 55, no. 5-6, pp. 721 – 744. [In Russ].
25. Vodyanitskii Y. N. Status and behavior of natural and technogenic forms of As, Sb, Se, and Te in ore tailings and contaminated soils: a review. *Eurasian Soil Science*. 2010, vol. 43, no. 1, pp. 30 – 38.
26. Vodyanitskii Y. N. Determination of the oxidation states of metals and metalloids: an analytical review. *Eurasian Soil Science*. 2013, vol. 46, no. 12, pp. 1139 – 1149.
27. Vodyanitskii Y. N. The role of iron in the fixation of heavy metals and metalloids in soils: a review of publications. *Eurasian Soil Science*. 2010, vol. 43, no. 5, pp. 519 – 532.
28. CSolodukhina M. A., Yurgenson G. A., ALushnikova. A. Yu. Arsenic in natural geochemical anomaly plants of the Zabaikalsky Krai (illustrated by Sherlovogorsky ore area). *Scholarly Notes of Transbaikal State University*. 2012, no. 1(42), pp. 79 – 86. [In Russ].
29. Kabata-Pendias A., Pendias H. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton: CRC Press, 1984, 315 p.
30. Steblevskaya N. I., Medkov M. A., Molchanov V. P., Polyakova N. V., Moiseenko L. I., Zorikov P. S., Bатырбаева N. V. Study of biogeochemical accumulation of microelements in soils and plants of the Far East. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2006, no. 2, pp. 57 – 63. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Павлова Людмила Михайловна – канд. биол. наук,
доцент, Институт геологии и природопользования
ДВО РАН, e-mail: pav@ascnet.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3734-1445.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

L.M. Pavlova, PhD (Biol.), Assistant Professor,
Institute of Geology & Nature Management,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
675000, Blagoveshchensk, Russia,
e-mail: pav@ascnet.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3734-1445.

Получена редакцией 07.03.2024; получена после рецензии 19.04.2024; принята к печати 10.06.2024.
Received by the editors 07.03.2024; received after the review 19.04.2024; accepted for printing 10.06.2024.

