

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТОК
АЛБЫНСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(ПРИАМУРЬЕ)

© 2019 г. В. И. Радомская^{1,*}, С. М. Радомский¹, Л. М. Павлова¹, Л. П. Шумилова¹

¹Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Россия 675000 Благовещенск

*e-mail: radomsкая@ascnet.ru

Поступила в редакцию 16.06.2016 г.

Принята к публикации 26.04.2018 г.

В рамках анализа возможных экологических последствий разработки месторождений открытым способом (на примере Албынского золоторудного месторождения Приамурья) охарактеризован состав химических элементов в природных водах и породах месторождения. В рудном веществе выявлена группа экологически опасных элементов, которые либо за счет значительного количественного содержания в руде (As, Sb, Mo, W), либо за счет высокого класса токсичности (Cd, Be, U) могут создать значительную геохимическую нагрузку на региональную экогеосистему. В составе природных водотоков в зоне влияния месторождения отмечается превышение ПДК для воды водоема, используемого для рыбохозяйственных целей (ПДК_{вр}), по Mo, W, As, высокие содержания Sb и U; подавляющая часть микрокомпонентов содержится в концентрациях ниже ПДК_{вр} либо в концентрациях ниже предела обнаружения. Анализ результатов эксперимента, имитировавшего в лабораторных условиях процессы биохимического выветривания рудного вещества различными природными агентами, показал возможность выщелачивания токсичных и особо токсичных элементов и их рассеивания в зоне влияния разработки месторождения.

Ключевые слова: поверхностные и подземные воды, Албынское золоторудное месторождение, микромицеты, химическое выветривание, биогенное выщелачивание.

DOI: 10.31857/S0321-0596462191-206

ВВЕДЕНИЕ

Открытая разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается рассеиванием больших объемов химических элементов в атмосфере, поверхностных и подземных водотоках, почве, растительности. Процессы горнопромышленного техногенеза активны и в районах эксплуатации месторождений золота. Основные источники загрязняющих веществ, поступающих в природные геосистемы, — отходы горного производства: вскрышные и вмещающие породы, забалансовые руды, хвосты обогащения. Вскрытые на поверхность горные породы и рудные минералы подвергаются разрушительному действию физико-химических факторов атмосферы, гидросферы и биосферы, что приводит к изменению геохимии ландшафта и выносу веществ водными потоками.

Вопросам функционирования экосистем в рудных регионах и, в частности, факторам, определяющим масштабы, механизмы и спосо-

бы миграции, в основном, тяжелых металлов, в настоящее время уделяется достаточно большое внимание. Однако оценка деятельности горного производства как потенциального источника потока токсичных элементов в целом затруднена в связи с недостаточной изученностью их форм нахождения в составе минеральной фазы вскрышных и вмещающих пород и степени геохимической подвижности. Чаще всего оценивается только валовое содержание элементов, значительная часть которых вследствие нахождения в структуре минеральной матрицы является химически инертной. В этом аспекте важное значение приобретает оценка геохимической подвижности элементов, т.е. их способности переходить из твердой фазы в жидкую, мигрировать в компоненты природных ландшафтов. Предварительную оценку суммарного содержания подвижных форм элементов в почвах, донных отложениях, горных породах можно сделать с помощью одностадийного экстрагирования [6], соответствующие методики приведены в ру-

ководящих документах [8, 14–15]. В этом случае в качестве экстрагентов используют воду, ацетатно-аммонийный буфер, растворы органических и минеральных кислот.

Водная вытяжка характеризует максимальную миграционную и биологическую активность элементов и может служить основой для оценки потенциально возможных масштабов загрязнения гидросферы. При этом использование дистиллированной воды в качестве выщелачивающего реагента не вполне корректно, так как процессы выщелачивания горных пород в природных условиях происходят под действием минерализованных вод (дождь, вода снеготаяния). Ацетатно-аммонийный буферный раствор моделирует действие почвенных растворов и позволяет оценить содержание подвижных форм элементов, доступных для растений. Эта же вытяжка из донных осадков предлагается для оценки воздействия токсичных форм металлов на гидробионты [5].

При анализе процессов взаимодействия жидких сред с горными породами зачастую не принимают во внимание или недооценивают микробиологическую составляющую этих процессов, в то время как в действительности разрушающая способность микроорганизмов очень велика. Причем, значительную часть биогеохимических процессов осуществляют способные к олиготрофному росту и обладающие высокой устойчивостью к экстремальным условиям окружающей среды микроскопические грибы [25], объем биомассы которых в целом составляет значительную часть микробного пула [20]. В процессе жизнедеятельности грибные клетки выделяют массу разнообразных органических соединений, обладающих комплексообразующими, окислительно-восстановительными и другими свойствами. Образование лимонной кислоты — наиболее распространенный у грибов биохимический процесс [25].

Для Приамурья как региона, который стабильно находится в списке лидеров по добыче золота в России, вопросы гидрогеохимической трансформации состава природных вод, обусловленной комплексным воздействием природных и техногенных факторов, весьма актуальны, так как это зона легко уязвимых многолетнемерзлых пород. Эрозионные процессы криолитозоны, многократно усиливающиеся деятельностью горнодобывающих предприятий, приводят к значительному увеличению потоков рассеяния химических элементов. Поэтому изучение механизмов, путей и характера миграции

элементов, активизирующихся техногенными процессами, — одна из первых задач в оценке воздействия различных типов недродопользования на экосистемы экстремальных природных зон.

Цель работы — анализ возможных геоэкологических последствий при разработке золоторудного месторождения открытым способом (на примере Албынского золоторудного месторождения Приамурья) на основе концепции системы вода—порода.

Для достижения цели использован комплексный подход, включающий в себя аналитическое исследование элементного состава исходного рудного вещества, природных водотоков зоны месторождения и потенциальных геохимических преобразований горных пород в имитирующих природное выветривание лабораторных экспериментах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были горные породы, поверхностные и подземные воды поля золоторудного Албынского месторождения, расположенного на северо-востоке Амурской области.

Общая геологическая характеристика месторождения

Албынское месторождение находится в пределах Верхнеселемджинского золотоносного района Амуро-Охотского звена Монголо-Охотской складчатой системы. Геологическое строение района осложнено разрывными нарушениями, среди которых один из главных разломов субширотного простирания — Курумканский проходит в центральной части рудоносной площади. Зоны разломов характеризуются расланцеванием, милонитизацией, трещиноватостью и окварцеванием пород. Субмеридиональные разрывные нарушения немногочисленны, относятся к сбросо-сдвигам, имеют значительные вертикальные перемещения.

Албынское месторождение залегает в пределах северного крыла Эльгоканского купола, относящегося к структурному подэтажу афанасьевской свиты возраста PZ_1 . Крылья антиклинали осложнены послонными интрузиями метабазитов, многочисленными дайками и разломами. Контакты метабазитов с вмещающими породами — тектонические. Характерная черта геологического строения этой части ку-

пола — наличие многочисленных лежачих изоклинальных складок высоких порядков, вплоть до плейчатых. Наиболее интенсивно складчатость и рассланцованность пород проявлены в метабазах афанасьевской свиты. Нерасчлененные отложения афанасьевской свиты занимают $\geq 80\%$ площади и слагают Эльгоканский купол (горст—антиклиналь). Она представлена довольно монотонной толщей переслаивающихся слабометаморфизованных (фашия зеленых сланцев) сланцев, среди которых резко преобладают (~70%) темноокрашенные (углеродистые) мусковит-альбит-кварцевые разности, переслаивающиеся со светлоокрашенными биотит-мусковит-альбит-кварцевыми и альбит-хлорит-эпидот-амфиболовыми сланцами. Макроскопически породы характеризуются хорошо выраженной грубо сланцеватой и плейчатой текстурой, обусловленной чередованием слоев темно-серого, светло-серого и зеленовато-серого цветов, мощностью от долей сантиметра до 10–15 м. Светлоокрашенные сланцы отличаются от темноокрашенных разностей в основном отсутствием углеродистого вещества, боль-

шим количеством карбонатов, хлорита, эпидота и рудных минералов [12, 13].

Золотоносная зона месторождения в виде субширотной дугообразно изогнутой полосы прослеживается на 5–6 км от р. Харги на западе через верховья ручьев Албын и Маристый на востоке. Ширина ее на западном фланге составляет 350–700 м. По [10], дугообразная зона приурочена к Албынскому горизонту зеленокаменно-измененных метабазитов основного состава, которые залегают среди слюдисто-кварц-альбитовых сланцев афанасьевской свиты. Рудные тела локализируются в слюдисто-кварц-альбитовых метасоматитах (альбититах), выполняющих зоны смятия и дробления, ориентированные по сланцеватости пород (рис. 1). На месторождении выделено 5 рудных тел. Руды прожилково-вкрапленные, гидротермально-метасоматические, убого-малосульфидные, золотокварцевые. Минеральный состав вмещающих пород и руд приведен в табл. 1. Рудные минералы, по исследованиям авторов статьи, составляют в среднем 3–5% с вариациями от единичных зерен до 15%. Среди рудных минералов преобладают пирит

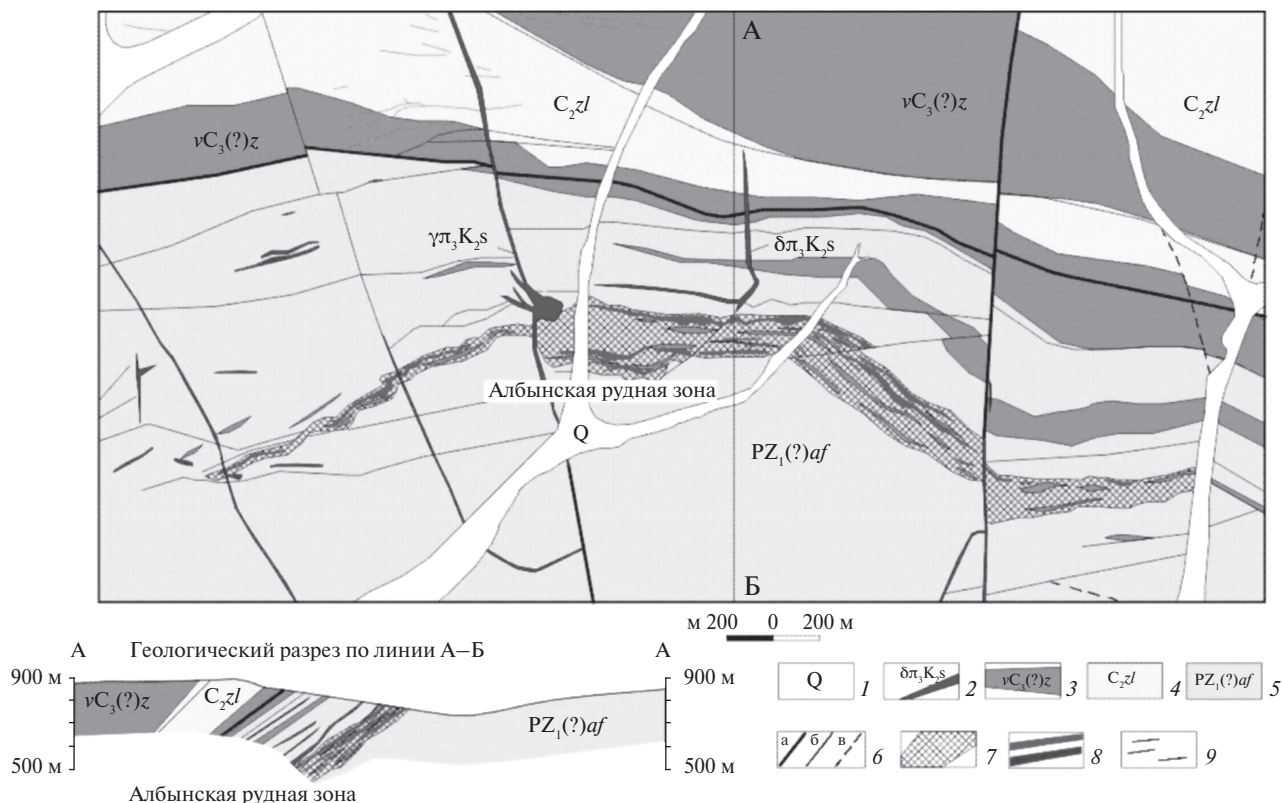


Рис. 1. Геологический план Албынского месторождения по [10]: 1 — аллювиальные отложения; 2 — позднемеловые дайки диорит-порфиров, гранодиорит-порфиров, гранит-порфиров селитканского комплекса; 3 — габбро, габбро-диабазы метаморфизованные; 4 — златоустовская свита (углеродистые кварц-серцитовые сланцы); 5 — афанасьевская свита (мусковит-кварц-альбитовые сланцы); 6 — разломы: а — главные, б — второстепенные, в — предполагаемые; 7 — зона альбититов; 8 — золоторудные тела; 9 — золотоносные кварцевые жилы.

Таблица 1. Минеральный состав проб Албынского месторождения, масс.% (ед. зн. – содержание зерен от 1 до 10, зн. – содержание зерен от 11 до 100, прочерк – не обнаружено)

Минералы	Сланцы			Рудоносные метасоматиты					
	5Р	1К	3К	1Р6	2Р6	3Рв	4Рд	730	6Р
Кварц	45	47.7	70.8	59.6	63.2	6.8	78.3	72.5	97.5
Слюда (мусковит+биотит)	5.5	50.8	27.3	15	32	83	21.3	11.2	зн.
Обломки пород	47	–	–	–	–	–	–	–	0.4
Карбонат	1.3	0.5	–	6.5	3.8	4.2	–	10	–
Амфибол	зн.	–	–	18	зн.	–	–	–	–
Скрап	зн.	0.3	0.1	0.4	зн.	0.1	0.3	зн.	0.1
Арсенопирит	–	–	–	–	зн.	5.8	0.01	0.6	–
Пирит	0.2	0.2	ед.зн.	зн.	зн.	ед.	–	5.5	0.1
Апатит	зн.	зн.	–	0.5	0.6	–	–	ед.зн	0.2
Гидрогетит+гетит	ед.зн.	0.1	1.8	–	0.2	ед.	–	–	1.5
Магнетит	0.9	0.4	–	–	зн	–	ед.зн.	ед.зн	зн
Полевой шпат	–	–	–	зн	зн	–	ед.зн.	зн.	зн.
Циркон	зн.	ед.зн.	–	ед.зн.	ед.зн.	–	–	–	ед.зн
Серицит	зн.	–	–	–	–	–	–	–	зн.
Халькопирит	зн.	–	–	–	–	–	–	–	–
Турмалин	зн.	–	–	–	–	–	–	–	–
Ильменит	–	–	–	–	зн.	–	–	–	–
Оксиды Mn	–	–	–	–	–	–	–	–	зн.
Сфалерит	–	–	–	–	–	–	–	ед. зн	–
Гранат	–	–	–	–	–	–	ед.зн.	–	–
Сфен	–	–	–	–	–	–	–	ед. зн.	–
Рутил	–	–	–	–	–	–	–	ед.зн	–
Анатаз	–	–	–	–	ед.зн.	–	–	–	–
Галенит	–	ед.зн.	–	–	–	–	–	–	–
Au	2 зн.	–	–	–	–	–	–	2 зн.	16 зн.

и арсенопирит, к редким рудным минералам относятся магнетит, отмечены халькопирит, сфалерит, галенит. Руды месторождения представлены окисленными, смешанными (различной степени окисленности) и первичными разностями, последние резко преобладают.

Албынское золоторудное месторождение в настоящий период обрабатывается открытым способом. В ноябре 2011 г., через 6 лет после получения лицензии на разведку рудной зоны предприятием “Албынский рудник”, была запущена первая очередь горно-гидрометаллургического комбината.

Характеристика объектов исследования и методы

Пробы природных вод (подземных и поверхностных) на Албынском золоторудном месторождении отбирали в 2013–2014 гг. (рис. 2). Для оценки качества подземных вод использо-

вали наблюдательные скважины (Т. 1, Т. 2), заложенные с учетом уклона гидравлической поверхности водоносного горизонта и системы отработки месторождения. С поверхностных водных объектов отобраны пробы в точках: Т. 3, Т. 4 – руч. Маристый, средняя и нижняя части; Т. 5, Т. 9 – р. Эльгокан; Т. 7 – р. Харга; Т. 8 – руч. Болтанак; Т. 10 – руч. Жедринский. Водные пробы фильтровали через двойной фильтр “синяя лента”, консервировали азотной кислотой.

Для характеристики элементного состава рудного вещества Албынского месторождения отобрано 25 проб с разных зон карьера (рис. 2).

При экспериментальном моделировании процесса биохимического выветривания в качестве объекта деструкции из проанализированных 25 проб выбраны наиболее типичные как с высоким, так и с низким содержанием токсичных элементов (As, Sb, Zn, Cd, Pb) с целью полу-

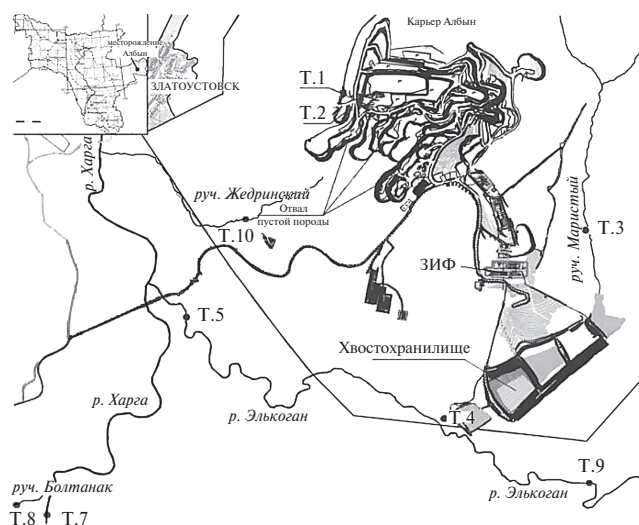


Рис. 2. Картограмма расположения рудника “Албын” на топооснове М 1:50 000 с точками отбора проб воды. Врезка – карта Амурской области.

чения приближенной к природным процессам картины выщелачивания: рудоносная порода – эпидот-слюдисто-кварцевый метасоматит по слюдистому сланцу (метаморфиту) с вкраплениями пирита и арсенопирита (730), углеродистый сланец (5Р) и окисленная, выветренная руда (6Р), а также образцы рудовмещающих метасоматитов (СТ-1, СТ-2), вскрытых буровзрывными работами в карьере и отобранных одновременно с образцами снега.

Исходные образцы дробили до размера 100 мкм, отбирали навески массой 5 г и помещали их в конические колбы на 100 мл, заливали 50 мл экстрагента, закрывали пробками, встряхивали на ротаторе при комнатной температуре, после чего экстракты и экстрагенты (холостая проба) центрифугировали. В качестве экстрагентов использовали растворы ацетата аммония (рН 4,8), лимонной кислоты (рН 2,2), талую воду. Загрязненный после взрывных работ снег отбирали из разных точек по окружности карьера (500–1000 м), растапливали и в течение 3 ч встряхивали. В растворах талой воды соотношение Т : Ж составляли 1 : 23 – 1 : 25.

Время взаимодействия горных пород с экстрагентами при проведении выщелачивания в лабораторных условиях не регламентируется нормативными документами. Согласно данным [6, 11, 15, 29], при активном перемешивании на ротаторе время экстракции элементов из почвы дистиллированной водой, ацетат-аммонийным буфером, 1М кислотами в основном составляет 1 ч, при периодическом перемешивании – 24 ч. В исследовании в [4] почву и техногенные пески экстрагировали 2 ч при перемешивании со

скоростью 120 об/мин. При экстрагировании донных отложений [5] образцы с экстрагентом выдерживали статистически в течение 15 ч с последующим активным встряхиванием в течение 2 ч. При изучении степени разложения минералов под действием различных органических кислот [2] растворы кислот с минералами интенсивно перемешивали в течение 30 мин, а затем отстаивали в течение суток. При исследовании процессов аквального гипергенеза пород под воздействием байкальской воды [17] экстракцию химических элементов из горных пород проводили в течение 3 ч при непрерывном встряхивании при комнатной температуре. Извлечение подвижных форм металлов из техногенного вещества проводили в течение суток при встряхивании и активном перемешивании [1]. С учетом анализа представленных выше данных для экстрагирования пород Албынского месторождения растворами талой воды, ацетата аммония и лимонной кислоты выбран вариант 3-часового непрерывного встряхивания.

Для оценки участия биотической составляющей в преобразовании пород использованы выделенные из почвогрунтов Албынского золоторудного месторождения преобладающие виды микромицетов – *Trichoderma aureoviride* Rifai, *Penicillium simplicissimum* (Oudem.) Thom, а также *Penicillium canescens* Sopp. – штамм, доминирующий в стрессовой зоне среды обитания (почва урбанизированной территории с высоким и опасным уровнем загрязнения тяжелыми металлами).

Эксперименты по биологическому выщелачиванию проводили в конических колбах на 100 мл, куда помещали 5 г породы, 50 мл стерильной жидкой среды Чапека и добавляли 0.01 г физиологически однородной грибной биомассы (влажность 90%), полученной предварительно при инкубировании стандартного посевного (спорового) материала в жидкой питательной среде в течение 10 сут. Параллельно ставили холостой опыт (порода со стерильной средой Чапека). Длительность эксперимента (10 сут при ежедневном 8-часовом встряхивании на качалке) определялась временем, необходимым для наращивания достаточного количества грибной биомассы, которая является одним из факторов, определяющих степень биологического выветривания. Каждый вариант эксперимента проводили параллельно.

Содержания основных катионов и микроэлементов в пробах определяли атомно-эмиссионным (“iCAP-6500”, “Thermo Scientific”, США)

и масс-спектральным (“Х-7”, “Thermo Elemental”, США) методами в Аналитическом сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН. Анализы химического состава водных проб (рН, содержание минеральных азотсодержащих веществ, хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, ортофосфатов) выполнены по стандартным методикам в аналитическом центре ИГиП ДВО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка потенциальной токсичности Албынского золоторудного месторождения

Предварительной оценочной характеристикой экологического состояния геологической среды может служить показатель его потенциальной токсичности (ПТМ), основанный на оценке степени токсичности вещественного состава рудного объекта [3]. Показатель ПТМ рассчитывается на основании кларков концентрации и коэффициента литотоксичности (Тл) элементов и позволяет оценить возможную геохимическую нагрузку на региональную экогеосистему:

$$\text{ПТМ} = \sum_{i=1}^n (\text{Тл} \times \text{КК})_i + \dots + (\text{Тл} \times \text{КК})_n,$$

Тл – коэффициенты литотоксичности элементов, которые сгруппированы по классам опасности с присвоением соответствующего балла [3]: чрезвычайно опасные (супертоксичные) – Тл = 15: Hg, Cd, Tl, Sr, Ba, Be, U, Ra, Rn, Cs; высокой опасности – Тл = 10: Pb, Se, Te, As, Sb, B, F, Th, V, Cr, Ru, Co, Ni; средней опасности – Тл = 5: Cu, Zn, S, Bi, Ag, Ba, Mo, In, Ge, Sr, W, Al, Li, Mn, Cs, Cl, Sn; незначительной опасности – Тл = 1: Nb, Zr, Ti, Na, K, Ta, Ca, Si, Mg, Th; КК – показатель отношения концентрации элемента в рудах месторождения к его кларку для верхней континентальной коры, по [18]; n – число элементов-токсикантов в рудном месторождении.

Результаты анализа закономерностей распределения концентраций химических элементов в породах Албынского золоторудного месторождения, представленные в табл. 2, свидетельствуют о том, что состав пород исследуемого месторождения в сравнении с верхней континентальной корой характеризуется относительным дефицитом Mg, Cu, Rb, Tl; концентрации Sb, наоборот, повышены. Наблюдаются высокие содержания As, Mo, W, Nb, Ta, их коэффициенты концентраций (рассчитанные для средних содержаний) составляют 31.67, 9.2,

7.19, 4.11 и 3.62 соответственно. Содержания остальных элементов варьируют, при этом в одних образцах отмечается некоторый дефицит, в других – избыток элементов. Тела метасоматитов оконтуриваются контрастными ореолами As, Sb, W, Mo, Nb, Ta.

ПТМ для Албынского месторождения в целом составляет 0.08×10^4 , что ниже среднего значения ПТМ сульфидных месторождений, приведенного в [3]. Анализ значений слагаемых при расчете ПТМ показал, что наиболее опасны элементы – As, Sb за счет их высокого содержания в рудах, а также – W, Mo, Cd, U, Be за счет высоких значений Тл. Таким образом, породы Албынского золоторудного месторождения характеризуются наличием ряда потенциально токсичных элементов, воздействие которых на окружающую среду через транспортирующие и депонирующие среды может представлять реальную экологическую опасность.

Химический состав водотоков Албынского золоторудного месторождения

Основные водотоки на территории Албынского рудника – р. Харга (левый приток р. Селемджи) и впадающие в нее ручьи Жедринский, Болтанак, р. Эльгюкан с притоком – ручьем Маристым. Величина рН – важный показатель геохимического состояния вод, от которого зависит устойчивость форм миграции химических элементов и степень неравновесности вод относительно подстилающих пород. Поверхностные воды Албынского золоторудного месторождения относятся к нейтральным и слабощелочным (табл. 3). По химическому составу их можно отнести к гидрокарбонатным кальциевым, реже – к хлоридно- или сульфатно-гидрокарбонатным, воды на месторождении пресные или ультрапресные с малой минерализацией.

В поверхностных водотоках в районе исследований отмечается нарушение рыбохозяйственных нормативов по содержанию нитрит-ионов (руч. Жедринский), ионов аммония (ручьи Жедринский, Болтанак) и фосфатов (руч. Маристый) (табл. 3), что может быть связано с двумя группами факторов: природными, (трансформация органического вещества в лесных ландшафтах и последующий вынос образующихся продуктов в речную сеть) и антропогенными, обусловленными горными работами и атмосферным переносом пыли. Повышенное содержание в водной системе соединений азотной группы может быть следствием буровзрывных работ.

Таблица 2. Химический состав пород Албынского золоторудного месторождения (n – количество проб, прочерк – нет значений)

Оксиды, %, микроэлементы, мг/кг	Породы месторождения ($n = 25$)			Кларк [18]	КК	Тл	ПТМ _{<i>i</i>}
	среднее	минимум	максимум				
SiO ₂	53.46	17.26	62.19	66.0	0.81	1	0.81
TiO ₂	0.57	0.087	2.9	0.5	1.14	1	1.14
Al ₂ O ₃	14.11	3.9	17.2	15.2	0.93	5	4.65
Fe ₂ O ₃	5.44	2.3	16.3	4.5	1.21	—	—
MnO	0.14	0.041	0.4	0.077	1.82	5	9.1
MgO	0.66	0.024	2.1	2.2	0.3	1	0.3
CaO	4.52	0.17	35.7	4.2	1.08	1	1.08
Na ₂ O	5.44	0.48	9.7	3.9	1.39	1	1.39
K ₂ O	1.71	0.27	4.3	3.4	0.50	1	0.5
P ₂ O ₅	0.32	0.036	1.6	0.20	1.6	5	8
Li	27.77	3.7	103.4	20	1.39	5	6.95
Be	2.74	0.81	6.4	3	0.91	15	13.65
Sc	3.39	<0.5	17.9	11	0.31	—	—
V	20.72	<0.6	108	60	0.35	10	3.5
Cr	14.54	2.2	53.6	35	0.42	10	4.2
Co	5.51	0.46	36.9	10	0.55	10	5.5
Ni	7.09	1.7	28.1	20	0.35	10	3.5
Cu	10.67	4.3	22.6	25	0.43	5	2.15
Zn	83.52	23.7	192	71	1.18	5	5.9
Ga	22.78	11.1	44.6	17	1.34	—	—
As	47.51	<0.05	365	1.5	31.67	10	316.7
Rb	30.22	3.7	97.6	112	0.27	—	—
Sr	460.81	45.7	3519	350	1.32	5	6.6
Y	20.85	5.5	38	22	0.92	—	—
Zr	148.25	18.6	317	190	0.78	1	0.78
Nb	102.66	8.4	182	25	4.11	1	4.11
Mo	13.68	0.43	124	1.5	9.12	5	45.6
Ag	0.07	<0.02	0.32	0.05	1.4	5	7
Cd	0.28	0.05	0.93	0.098	2.85	15	42.75
Sn	3.24	0.35	9.2	5.5	0.59	5	2.95
Sb	3.37	0.27	9.5	0.2	16.85	10	168.5
Cs	3.29	0.26	14.3	3.7	0.89	5	4.45
Ba	352.8	45	838	550	0.64	5	3.2
Hf	3.10	0.46	7	5.8	0.53	—	—
Ta	7.99	0.54	15.2	2.2	3.63	1	3.63
W	14.38	0.77	63.2	2.0	7.19	5	35.95
Tl	0.22	0.05	0.78	0.75	0.29	15	4.35
Pb	18.35	2.6	106	20	0.92	10	9.2
Bi	0.09	0.01	0.35	0.127	0.71	5	3.55
Th	7.71	0.63	14.2	10.7	0.72	10	7.2
U	3.08	0.38	12.1	2.8	1.1	15	16.5

Концентрации Fe и микроэлементов в поверхностных и подземных водах рассматриваемой территории меняются в широком диапазоне (табл. 4). Подавляющая часть микрокомпонентов содержится в концентрациях ниже ПДК_{вр}, концентрации Sc, Cr, Ga, Ge, Se, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, In, Te ниже предела обнаружения. Для Fe, Mn, Cu, Al отмечено превышение рыбохозяйственных нормативов в значительной части проб поверхностных вод, что, возможно, обусловлено выносом элементов из коренных пород и почвогрунтов.

В воде из наблюдательных скважин (Т. 1, Т. 2) зафиксировано превышение ПДК_{вр} по Ni, Zn, Sr, подобная картина наблюдается и в воде руч. Жедринского. Что касается элементов, имеющих наибольшие показатели экологической опасности для данного месторождения, то превышение ПДК_{вр} по Mo, W и As наблюдается в воде руч. Маристого, по Mo – в воде руч. Жедринского; более высокие содержания Sb и U фиксировали в подземных водах (Т. 1 и Т. 2) и в воде руч. Жедринского.

Потенциальным источником загрязнения поверхностных вод на Албынском руднике может быть хвостохранилище, так как в результате работы золотоизвлекательной фабрики сбрасываемые в хвостохранилище обеззолоченные “хвосты” сорбционного выщелачива-

ния содержат значительную долю химических веществ.

Прямого сброса сточных вод предприятия в близко текущие малые реки нет, однако анализ проб воды из точек Т. 3 и Т. 4 показал, что в пробах воды руч. Маристого ниже хвостохранилища повышаются концентрации многих элементов, в частности As в 37 раз, Sb в 20 раз, Mo в 10 раз, по сравнению с верхним створом, что связано с техногенным загрязнением гидролитосферы, обусловленным дренированием дамбы, а не с рассеиванием элементов от месторождения, так как руч. Маристый забран в трубу. Однако негативное воздействие имеет локальный характер, после впадения руч. Маристого в р. Эльгокан отмечается снижение концентраций элементов.

Подвижные формы элементов

Оценка содержания подвижных форм элементов в породах, выполненная на основе одностадийного экстрагирования химическими реагентами (табл. 5), показала, что в целом концентрации элементов в экстрактах талой воды нестрого соответствуют результатам природных наблюдений. Для большинства элементов эти концентрации ниже концентраций в поверхностных водах водотоков зоны Албынского золоторудного месторождения (табл. 3, 4). Это может быть обусловлено различиями физико-химических условий выщелачивания в природе

Таблица 3. Средний химический состав подземных и поверхностных вод Албынского рудного поля, мг/дм³ (прочерк – нет данных)

Компонент	Точки отбора									ПДК _{вр} [9]
	Т. 1	Т. 2	Т. 3	Т. 4	Т. 5	Т. 7	Т. 8	Т. 9	Т. 10	
pH	7.15	7.20	7.07	7.08	7.04	6.91	6.64	6.4	8.4	–
Na	6.36	6.39	1.93	8.03	1.76	0.83	8.23	1.26	9.07	120
K	1.28	1.29	8.66	1.90	0.35	0.28	1.14	0.46	5.58	50
Ca	85.03	87.62	7.73	10.47	1.99	2.71	6.21	2.30	77.76	180
Mg	26.62	26.95	1.79	4.49	0.39	0.58	1.36	0.79	20.61	40
Si	5.57	5.62	2.40	5.45	2.75	2.27	1.75	2.83	3.24	–
PO ₄ ^{3–}	<0.05	<0.05	0.18	0.12	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05
NH ₄ ⁺	–	–	0.21	0.32	0.31	0.40	2.25	0.55	6.50	0.5
Cl [–]	1.4	–	3.48	3.52	3.37	0.74	13.71	1.03	2.66	300
NO ₂ [–]	0.12	–	0.036	0.049	0.015	0.012	0.036	0.01	0.57	0.08
NO ₃ [–]	1.41	–	1.22	0.74	1.23	0.22	1.55	0.5	35.0	40
HCO ₃ [–]	315	–	30.3	43.6	12.9	21.95	25.64	18.3	224.5	–
SO ₄ ^{2–}	69.09	70.07	3.15	7.79	2.19	5.16	8.78	2.42	89.90	100

Таблица 4. Среднее содержание микроэлементов в подземных и поверхностных водах Албынского рудного поля, кг/дм³ (прочерк – нет нормативов)

Элемент	Точки отбора									ПДК _{вр} [9]
	Т. 1	Т. 2	Т. 3	Т. 4	Т. 5	Т. 7	Т. 8	Т. 9	Т. 10	
Ti	<0.6	<0.6	4.5	16.4	1.1	<0.6	1.6	2.8	2.3	60
Al	1.9	2.1	202	951	126	94.3	299	306	88.6	40
Fe	92.3	68.9	2225	2878	68.3	182	278	143	194	100
Mn	5.4	16.3	770	966	21.7	7.9	58.5	19.1	402	10
Li	10.01	8.94	0.77	3.59	0.98	0.34	0.71	0.77	6.90	80
Be	<0.002	0.0034	0.021	0.075	0.020	0.017	0.020	0.031	0.0059	0.3
Sc	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	-
V	0.079	0.063	0.68	0.87	0.11	<0.01	0.091	<0.01	<0.01	1
Cr	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.6	<1.3	70 (Cr ⁺³)
Co	0.11	0.24	2.7	7.6	0.13	<0.06	0.13	0.12	1.8	10
Ni	25.6	19.1	5.2	8.7	1.0	0.3	1.3	1.6	11.8	10
Cu	0.19	0.19	30.7	36.7	28.4	3.3	2.2	16.5	14.3	1
Zn	12.7	10.4	8.7	9.0	7.2	2.2	3.5	7.6	12.5	10
Ga	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	-
As	21.5	22.3	2.3	86.0	1.3	0.51	0.50	0.53	1.7	50
Rb	1.52	1.49	0.89	1.68	0.68	0.46	1.0	0.62	5.35	100
Sr	1134	1149	63.0	143	13.6	16.3	35.0	20.3	913	400
Y	0.44	0.36	6.87	4.38	0.30	0.39	0.61	0.49	0.15	-
Zr	0.040	0.012	0.45	1.01	0.29	0.11	0.22	0.27	0.14	70
Nb	<0.009	<0.009	0.054	0.60	0.063	<0.009	<0.009	0.017	0.012	-
Mo	0.94	0.78	0.30	3.73	0.35	0.039	0.064	0.10	1.41	1
Ag	<0.004	<0.004	11.56	0.16	0.10	0.0063	0.015	0.020	0.014	-
Cd	<0.007	<0.007	0.026	0.037	0.012	0.020	0.028	0.023	0.026	5
Sn	0.0068	0.0058	0.21	0.14	0.16	0.024	0.039	0.16	0.17	112
Sb	11.14	11.77	0.16	3.27	0.11	0.072	0.047	0.11	6.12	-
Cs	0.95	0.91	0.12	0.76	0.027	0.0079	0.0069	0.029	1.63	1000
Ba	20.2	39.0	9.1	23.3	16.2	17.5	126	11.3	48.1	740
Hf	<0.002	<0.002	0.029	0.041	0.021	0.0052	0.009	0.012	0.0069	-
Ta	<0.006	<0.006	0.041	0.058	0.047	<0.006	<0.006	<0.001	<0.001	-
W	0.053	0.047	2.08	1.53	0.43	0.010	0.018	0.095	0.089	0.8
Tl	0.0091	0.0058	0.0052	0.010	0.0038	0.0029	0.0049	0.0042	0.020	-
Pb	<0.02	0.02	1.6	3.2	0.26	0.15	0.38	1.2	0.92	6
Bi	<0.001	<0.001	0.085	0.015	0.0048	0.0020	0.0041	0.034	0.010	-
Th	0.0035	0.003	0.38	0.44	0.093	0.079	0.12	0.096	0.033	-
U	2.88	2.85	0.26	0.90	0.078	0.089	0.051	0.06	5.11	-

и в эксперименте, разным соотношением масс породы и воды, температурой, образованием вторичных минералов в природе и, как следствие, наличием поверхностей с разной скоростью фильтрации вод и т.д.

Согласно [16], наиболее медленные – реакции растворения минерального вещества в околонейтральной среде (рН 6–8), их скорость колеблется от порядка $n \times 10^{-3}$ моль/м²с (хоро-

шо растворимые минералы-соли) до порядка $n \times 10^{-20}$ моль/м²с (плохо растворимые минералы, окислы и силикаты, фосфаты, сульфиды в восстановительной среде и др.). Кроме того, элементы переходят из минералов в раствор не одновременно: темпы растворения зависят от положения элемента в структуре минерала. Быстрее всего переходят в раствор катионы междуслоевого пространства, затем – изоморфно

замещающие ионы и ионы, занимающие периферическую зону частиц. Слабее всего мобилизуются ионы, занимающие октаэдрические и тетраэдрические фрагменты структуры минерала.

Значения рН растворов после выщелачивания в эксперименте составили 7.69–7.83. Согласно [21], в таких слабощелочных растворах образуются гидроксиды, растворимость которых невелика. Концентрации Li, As, Rb, Mo, Sn, Sb,

Таблица 5. Среднее содержание химических элементов в породах и концентрации элементов в экстрактах после воздействия талой воды, растворов ацетата аммония и лимонной кислоты на горные породы

Элемент	Порода, мг/кг					Экстрагент, мкг/дм ³							
						талая вода		раствор ацетата аммония			раствор лимонной кислоты		
	5P	6P	730	СТ-1	СТ-2	СТ-1	СТ-2	5P	6P	730	5P	6P	730
Ti	3717	1799	600	3837	4077	< 0.6	< 0.6	<20	<20	<20	515	84.3	119
Al×10 ⁴	7.57	8.04	8.2	8.36	8.31	0.009	0.016	4.10	1.58	1.08	12.74	6.44	2.78
Fe×10 ⁴	3.01	2.52	2.87	4.97	5.6	0.008	0.007	7.94	2.73	17.91	21.46	15.18	31.63
Mn×10 ⁴	0.031	0.19	0.07	0.093	0.10	0.017	0.014	0.51	1.53	3.08	0.62	11.15	3.54
Mg×10 ⁴	0.88	0.015	0.21	0.9	1.09	0.35	0.31	1.61	0.19	4.14	3.69	0.31	5.75
Ca×10 ⁴	0.66	0.12	1.5	1.29	1.29	2.88	2.35	46.6	3.42	13.94	55.82	5.02	146
Na×10 ⁴	1.78	7.20	6.31	1.71	1.85	0.33	0.30	0.74	5.53	1.41	0.83	6.55	1.52
K×10 ⁴	1.99	0.23	1.08	4.32	4.81	1.28	1.16	5.62	0.65	2.11	6.14	0.72	1.92
Li	36.1	10.2	20.4	90.4	97.7	14.8	14.8	68.6	36.7	34.4	134	65.6	41.8
Be	1.6	0.81	2.8	6.3	6.7	0.005	0.005	4	1.8	3.3	7.5	3.1	6.4
Sc	8.1	0.45	0.30	5.6	5.4	<0.1	<0.1	78.1	25.1	29.7	20.8	<9	<9
V	79.5	4.4	7.8	67.9	61.8	<0.06	0.41	93.4	27.2	32.5	198	4	7.8
Cr	53.6	12.5	2.2	25.1	21.3	8.2	3.6	262	169	218	275	93.6	153
Co	8.9	2.8	0.46	6.5	6.2	0.27	0.30	26.8	18.9	9.7	44.9	94.5	7.7
Ni	22.9	1.9	1.7	9.1	6.9	1.6	2.2	105	26.3	75.3	185	112	71.6
Cu	16.5	11.7	18.8	10.8	9.6	2.5	3.2	42.8	109	25.2	<5	264	<5
Zn	62.1	46.2	129	133	154	3.9	4.4	282	470	263	410	892	273
Ga	16.9	13.5	24.4	35.9	39.5	<0.4	<0.6	<0.3	1.4	3.7	34.9	21.5	13.8
As	19.2	365	94.7	761	42.9	117	149	98.1	632	788	493	3370	686
Rb	63.6	3.7	17.1	85.7	105	10.6	10.9	226	19.0	74.4	111	19.6	32.2
Sr	121	45.7	193	199	220	439	413	3615	894	14112	3607	1244	13788
Y	15.8	5.5	16.4	27.5	22.1	0.046	0.046	891	220	326	753	399	340
Zr	160	26	119	546	117	0.034	0.051	1.78	<1	2.78	39.7	26	50
Nb	8.4	23.2	182	119	131	0.014	0.013	<0.7	<0.7	<0.7	1.1	6.4	107
Mo	0.62	7.7	0.91	6.4	6.7	4.2	2.7	<0.5	<0.5	1.3	3.7	201	3.8
Cd	0.05	0.26	0.47	0.15	0.19	0.008	0.012	2	7.4	4.3	2.3	17.3	3.4
Sn	1.1	0.35	2.9	4.9	5.3	0.38	0.36	0.48	0.39	0.64	5.8	7	4.2
Sb	0.6	4.3	9.0	3.1	3.3	11.1	8.9	12.3	47.6	30.3	27.8	205	54.3
Cs	2.0	0.26	1.1	6.8	6.7	2.0	2.3	14.7	4.1	26.3	0.3	0.8	0.6
Ba	605	59.9	142	928	1072	58.8	60.0	1565	650	732	1826	1826	389
Hf	4.0	0.49	2.2	12.5	2.4	0.001	0.004	<0.5	<0.5	<0.5	1.9	0.6	1.2
Ta	0.54	1.8	12.7	6.6	7.5	<0.01	<0.01	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	0.2	6.9
W	0.86	8.7	9.1	47.1	54.5	3.0	3.6	<0.6	<0.6	<0.6	3.5	5.4	6.9
Tl	0.32	0.10	0.13	0.38	0.4	0.019	0.017	0.7	2.04	0.57	0.2	2.5	<0.1
Pb	30.1	106	10.6	7	7.5	2.1	0.77	2407	2509	493	1601	3102	378
Bi	0.14	0.10	0.07	0.1	0.079	0.006	0.013	7.9	1.2	1.0	6.2	2.7	0.9
Th	4.6	0.74	11.0	9.4	9.7	0.014	0.012	307	26.4	119	293	16.6	108
U	1.1	0.38	1.2	1.8	1.8	1.7	1.6	27.7	11.0	10.6	30.4	12	11.4

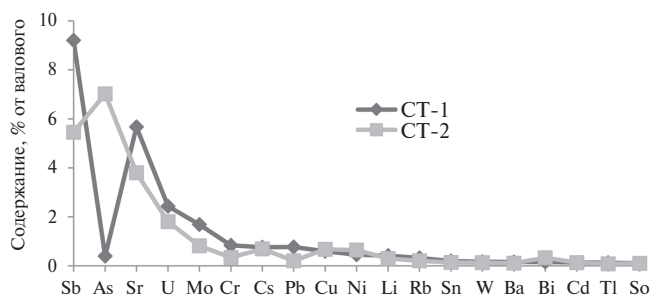


Рис. 3. Содержание водорастворимых форм элементов, % от валового, в пробах СТ-1 и СТ-2 Албынского месторождения.

W в опытных экстрактах выше, чем в природных водах Албынского месторождения.

Состав соединений элементов в водной вытяжке обычно достаточно сложный: присутствуют легкорастворимые соединения, труднорастворимые соли, растворимые в воде комплексные соединения элементов с органическими и неорганическими лигандами [7]. С эколоксикологических позиций наибольшую опасность для окружающей среды при разработке Албынского месторождения будут представлять As, Sb, Cd, W, Mo, U, Be, что обуславливает необходимость пристального внимания к их геохимической активности. Максимальное количество водорастворимых форм Sb достигает 9.2% валового содержания, As – 7.0, Sr – 5.7, U – 2.4, Mo – 1.7, Cr, Cs, Pb – 0.8, Cu – 0.7, Ni – 0.6%, Sn, W, Ba, Bi – 0.2, Cd, Tl, Co – 0.1%, для остальных элементов < 0.1% валового содержания (рис. 3). Сравнение данных по валовому содержанию элементов в породе и перешедших в раствор указывает на то, что Sb, As, U, Mo могут легко вымываться из пород тальми водами и дождем, рассеиваться и, таким образом, на территории рудника быть вторичным источником загрязнения природных вод.

Фракция, выделяемая с помощью ацетата аммония, моделирует действие почвенных растворов и позволяет оценить содержание подвижных форм элементов, которые представлены водорастворимыми соединениями, а также элементами, специфически адсорбированными на поверхности минералов, органического вещества и гидроксидов Fe и Mn [19]. Под специфически сорбированными ионами, входящими в состав твердофазных соединений, понимается вся их совокупность, удерживаемая породными компонентами за счет связей, отличных от ионных [7]. Кроме того, из-за комплексообразующей способности ацетат-иона происходит разрушение наименее устойчивых комплексов металлов.

Применение слабокислого буферного раствора может приводить к частичному растворению карбонатов и некоторых малорастворимых соединений металлов, а также к переводу в раствор металлов, связанных с карбонатами.

В ацетат-аммонийные вытяжки в целом перешло большее количество элементов, чем в водные. Обращают на себя внимание высокие содержания микроэлементов Cr, Sc, Pb, Ni, Co, Bi, Th, Cd, U, Tl, As, Sb, Zn, перешедших в растворы из всех анализируемых пород (табл. 6). Только для Sn, Ga, Hf, W, Zr, Ti, Ta и Nb обнаружено незначительное количество подвижных форм, для остальных элементов доли ацетат-аммонийных форм высокие, что свидетельствует о большой вероятности их перехода в раствор при воздействии почвенных растворов. Высоки доли форм, переходящих в раствор в слабокислой среде (pH 4.8), и макроэлементов: Ca – 71, Mn – 44, Sr – 73% (рис. 4). Опасное влияние загрязненных почвенных растворов на природные водотоки может быть нивелировано природными слабощелочными водами, когда при их смешении происходит нейтрализация и формирование твердых фаз – гидроксидов и оксидов Fe, Mn, являющихся хорошими сорбентами для микроэлементов.

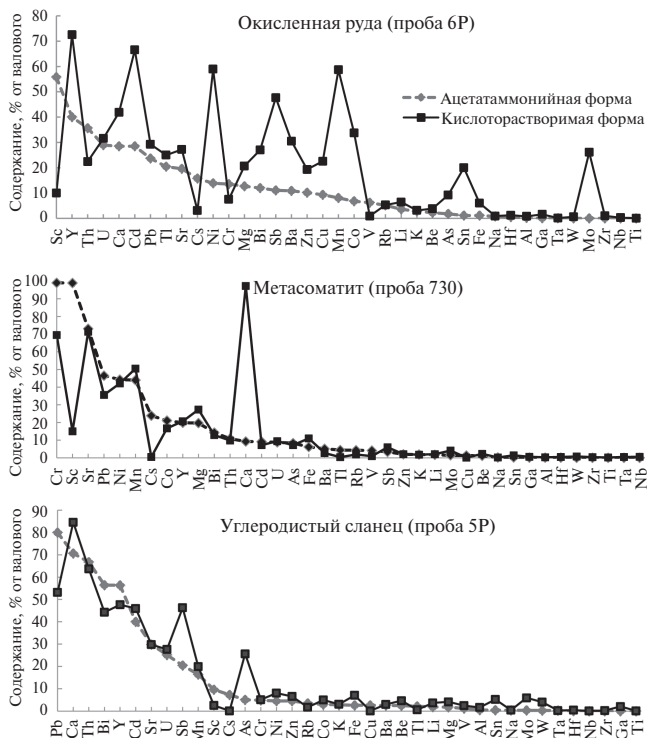


Рис. 4. Содержание кислоторастворимых и подвижных (по ацетат-аммонийной вытяжке) форм элементов в образцах метасоматита, углеродистого сланца, окисленной руды Албынского месторождения.

Под действием лимонной кислоты из горных пород выщелачивается значительное количество макро- и микроэлементов (табл. 6; рис. 4), даже таких химически инертных, как Ti, Zr. Известно, что низкомолекулярные органические кислоты увеличивают скорость растворения

алюмосиликатов [26], глинозема [27]. В [28] представлено несколько примеров повышения растворимости минералов за счет присутствия в контактирующей водной фазе простых лигандов. При этом могут работать следующие факторы растворения: кислая среда обычно приводит

Таблица 6. Среднее содержание химических элементов в экстрактах после воздействия микроскопических грибов на горные породы, мкг/дм³ (содержание элементов в вытяжках приведено с учетом холостой пробы – среды Чапека после взаимодействия с породой)

Элемент	Микромицеты								
	Penicillium canescens			Trichoderma aureoviride			Penicillium simplicissimum		
	5P	6P	730	5P	6P	730	5P	6P	730
Ti	626	174	254	0	0	0	28	0	39
Al	105448	39531	27734	-133.6	57.52	485	2740	1041	7191
Fe	179180	57291	377887	-251	0	4787	4994	985	32398
Mn	6110	152736	38350	-196	-322	1937	663	58751	8766
Mg	51477	13779	67665	-8722	-174	7551	-6872	4485	8111
Ca	558484	22011	1496871	-6871	22773	167401	116535	11759	563852
Na	112640	83797	-38571	-21512	-29036	24872	-47791	42789	42713
K	74961	34618	13749	-114349	-9484	7512	-113369	18741	25925
Li	117.04	46.97	21	-3.18	1.98	8.32	0.44	9.46	10.65
Be	3.4	1.61	2	0	0	0	0	0.13	0.34
Sc	29.79	0	0	0	0	0	2.23	0	0
V	161	2.48	11	-0.45	2.83	1.7	1.17	0	0.51
Cr	238.11	21.86	140	0	0	0	0	0	38.13
Co	51.73	83.42	10	0	0.62	0	0	22.74	0.97
Ni	195.82	21.69	82	-16.17	5.31	15.8	-19.44	10.11	2.8
Cu	89.84	56.93	84	-1.14	18.96	45.82	13.08	2.2	2.9
Zn	593	989	1601	0	29.72	10.18	10.89	30.66	13.95
Ga	13.22	16.49	15	0	0	0	0	0	0
As	106	1713	7371	-15.01	-62.43	1680	3.36	-137	1825
Rb	163	24.77	50	-6.5	0.58	6.27	-0.85	0.87	7.25
Sr	3477	952	14080	85.7	92	1523	774	414	5518
Y	1089	319	313	-0.55	0.05	19.4	82.95	13.19	110
Zr	34.94	14.29	52	-0.18	-0.09	3.51	2.45	1.37	11.18
Nb	0.73	4.3	109	-0.01	0	4.62	0.03	0.08	17.35
Mo	2.7	14.7	3	0.67	25.04	14.64	0.3	-60.64	-3.77
Ag	-0.44	0	0	-0.53	0.82	0.22	0.57	0.32	2.13
Cd	3.02	12.79	8	0	-0.06	0.39	0.16	1.54	0.66
Sn	6.42	3.07	6	0.13	0.2	0.81	0.21	-0.04	1.36
Sb	17.53	48.98	61	-1.23	3.15	-3.11	-2.9	20.6	-0.36
Cs	-0.61	0.35	-4	-0.42	0.12	0.07	-0.52	0.13	1.52
Ba	424	391	405	-21.9	86.16	144	102	373	185
Hf	1.72	0	1	-0.05	-0.05	0.12	0.13	-0.03	0.43
Ta	0	0	13	0	0	0.45	0	0	2.25
W	2.56	4.14	8	-0.08	0.02	-0.94	-0.15	-0.23	-0.12
Tl	0.54	3.41	0	-0.02	0.01	0.09	0.04	0.8	0.22
Pb	1502	261	528	-1.7	0.8	27.76	5.24	3.22	18.8
Bi	3.41	0.96	1	0.02	0	0.15	0.1	0	0.11
Th	413	7.49	89	-0.11	-0.05	4.4	10.01	0.24	20.68
U	21.06	3.16	4	1.86	3.93	5.43	0.7	2.31	-0.38

к увеличению скорости растворения; органические кислоты могут образовывать комплексы с ионами металлов в растворе, в частности с Al(III), тем самым увеличивая растворимость; органические кислоты могут облегчить удаление ионов металлов с поверхности минерала путем формирования поверхностных комплексов с их последующим переносом в раствор [27].

Следует отметить, что после взаимодействия лимонной кислоты с горными породами экстракционные растворы подщелачиваются. Наиболее значительное изменение pH обнаружено в вытяжке из метасоматитов (проба 730) – сильнокислый раствор лимонной кислоты (pH 2.20) нейтрализуется до 3.92, что, вероятно, обусловлено растворением карбонатов, содержание которых в пробе метасоматитов составляет 10% (табл. 1). Например, взаимодействие пород, содержащих кальцит, с кислотным раствором протекает по следующей реакции: $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. При взаимодействии с лимонной кислотой из данной пробы (проба 730) в раствор в значительных количествах выносятся Ca из-за разложения карбонатов. Для углеродистого сланца и окисленной руды аналогичные явления выражены значительно слабее. На фоне разложения карбонатов в растворы в значительных концентрациях также выносятся Fe, Mn, Mg. Деструкция слюд приводит к дополнительному поступлению в экстракты Al, который считается одним из самых труднорастворимых элементов.

Из метасоматита (проба 730) в лимоннокислый раствор в больших количествах, по сравнению с ацетат-аммонийной вытяжкой, выносятся Nb, W, Sn, Sb, Zr, Be, Ta. Из углеродистых сланцев в раствор лимонной кислоты переходит в 5–15 раз больше As, Mo, Sn, W, чем в ацетат-аммонийную вытяжку. Резкий скачок концентрации Mo наблюдается при кислотной обработке окисленной руды. Кроме того, в растворе в заметных количествах появились Co, Ni, As, Sn, Cu, Sb, Cd, Ga, Nb. Анализ элементного состава полученных экстрактов (табл. 6; рис. 4) свидетельствует о существенной роли органических соединений в деструкции минералов. Обобщая результаты оценки потенциально подвижных форм элементов, образуемых в результате вскрытия пород золоторудного месторождения, можно заключить, что в водорастворимой фракции содержится незначительное количество потенциально подвижных форм токсичных элементов, но при подкислении среды возможен вынос большого количества токсичных и особо токсичных элементов.

Микологическое выщелачивание химических элементов из горных пород

Механизм микологического выщелачивания горных пород сложен и до конца не изучен. Жизнедеятельность микроскопических грибов может быть как прямой, так и косвенной причиной разрушения кристаллических решеток минералов и перехода содержащихся в них химических элементов в подвижное состояние. Известные механизмы воздействия микроорганизмов на горную породу подразделяют на два типа: поглощение микроэлементов в ходе биосорбции и биоаккумуляции и деструкция с помощью органических и неорганических грибных метаболитов. Усредненные данные элементного состава вытяжек из трех типов горных пород под действием разных видов микромицетов представлены в табл. 6; данные приведены с учетом холостых проб, которыми служили экстракты из пород стерильной питательной средой Чапека. После взаимодействия микроскопических грибов с породой происходят изменения pH среды Чапека – ее значение от нейтрального показателя уменьшается на 2–3 единицы, что может быть обусловлено способностью микроскопических грибов к кислотообразованию и указывает на механизм кислотного выщелачивания элементов из горных пород под действием микромицетов.

Анализ результатов экспериментального био-выщелачивания пород Албынского месторождения микромицетами с разной адаптационной стратегией показывает, что максимальные концентрации элементов в экстрактах характерны для выщелачивания пород *P. canescens*, в то время как концентрации элементов в растворах после выщелачивания пород представителями микроскопических грибов, выделенных с территории Албынского месторождения, в десятки–сотни раз меньше. Этот факт свидетельствует о том, что в настоящее время на Албынском месторождении не наблюдается интенсивного воздействия техногенного фактора на среду обитания микобиоты, микромицеты не находятся в зоне стресса, и, соответственно, у них не выражена адаптивная реакция – усиленная биохимическая активность. Признаком этого, скорее всего, – и отрицательные величины концентраций многих элементов в грибных экстрактах, особенно после воздействия на породы микромицета *T. augeoviride*. С другой стороны, при биовыщелачивании нельзя исключить влияние противоположного процесса – сорбции высвобождающихся элементов клеточной поверхностью микромицета или поверхностью мине-

ралов. Подобное явление описывают в [22] при наблюдении оседания совместно скоагулированных гидрогелей Si и Al аллофаноидной природы, сорбирующих щелочи и оксиды щелочноземельных металлов, на поверхности бактериальных клеток и частиц минерала в процессе разрушения полевых шпатов бактериями *Basillus* sp.

При биовыщелачивании прослеживается следующая количественная тенденция извлечения элементов: в концентрациях в десятки и сотни миллиграмм на 1 л в выщелачивающих растворах выделяются в основном порообразующие макроэлементы Ca, Na, K, Fe, Al, Mn, Mg. Большие величины концентраций растворенных элементов в жидкой среде указывают на их более активную возможную миграцию и в природных условиях. К группе элементов со средними концентрациями (от 10 до 1 мг/л) в растворах относятся Sr, As, Pb – из углистого сланца. Остальные элементы относятся к группе с концентрациями в выщелачивающем растворе < 1 мг/л. Таким образом, терригенные микроскопические грибы, особенно р. *Penicillium*, могут растворять минеральный субстрат пород Албынского месторождения, переводя в подвижные формы порообразующие элементы (Si, Ca, Na, K, Fe, Al, Mn, Mg), микроэлементы (Sr, As) и Pb.

Для более полной оценки роли биотической составляющей в выветривании пород на Албынском месторождении проведен подсчет доли извлечения элемента из пород микроскопическими грибами (рис. 5). Микромицеты, особенно р. *Penicillium* (*P. simplicissimum*), выделенные из грунтов Албынского золоторудного месторождения, наиболее активно извлекали из пород в раствор Mg, Ca, Mn, K, Co, Ni, Sr, Y, Cd, Ba, Tl, As, U. Степень извлечения Mg из разных пород за 10 сут выщелачивания колебалась от 0 до 30.93, Ca – от 9.68 до 37.57, Tl – 0.1 до 8%. Что касается элементов, имеющих высокие показате-

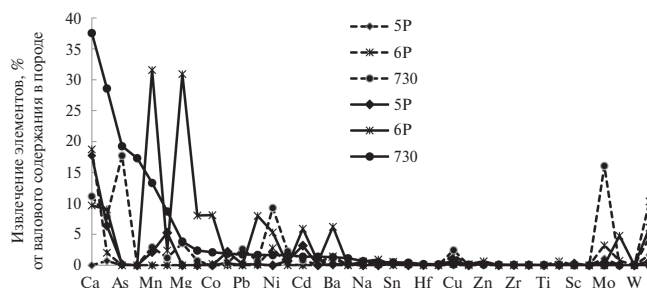


Рис. 5. Доля извлечения элементов из образцов пород метасоматита (проба 730), углеродистого сланца (проба 5P), окисленной руды (проба 6P) микромицетами в модельных экспериментах, масс. %; пунтир – *Trichoderma aureoviride*; прямая – *Penicillium simplicissimum*.

тели экологической опасности для данного месторождения, наибольшая доля извлечения – As из метасоматитов (17.7–19.3%), только Sb – из окисленной руды (0.73–4.79%), W практически не выщелачивался грибами ни из одной породы. Под воздействием *P. simplicissimum* выщелачивалось 0.12–0.16% Be и 1.4–5.92% Cd. Наибольшая доля извлечения – Mo (1.08–16.09%) при воздействии на породы *T. aureoviride*. При использовании в качестве “растворителя” культуральной жидкости с *P. simplicissimum* выщелачивалось от 0 до 6.08% U, а при использовании *T. Aureoviride* – 1.69–10.34% U.

Результаты лабораторных исследований сложно экстраполировать на природные условия в силу существенной разницы состава искусственной культуральной среды и природных водных обстановок, однако модельные эксперименты позволяют проводить аналогию между процессами, которые могут происходить на Албынском золоторудном месторождении при биогенном выветривании. Геоэкологическими последствиями отработки месторождения открытым способом могут быть активизация выщелачивания из рудного вещества токсичных и особо токсичных элементов различными природными агентами, рассеивание их в зоне влияния разработки месторождения и их функционирование в качестве вторичных источников загрязнения природных сред.

ВЫВОДЫ

Оценка потенциальной токсичности рудного вещества Албынского месторождения выявила группу экологически опасных элементов, которые либо за счет значительного количественного содержания (As, Sb, Mo, W), либо за счет высокого класса токсичности (Cd, Be, U) могут создать значительную геохимическую нагрузку на региональную экогеосистему при разработке месторождения открытым способом.

В составе природных водотоков поля Албынского золоторудного месторождения отмечено превышение ПДК_{вр} по Mo, W и As в воде руч. Маристого, Mo – в воде руч. Жедринского; в подземных водах и в воде руч. Жедринского зафиксированы высокие содержание Sb и U; подавляющая же часть микрокомпонентов содержится в концентрациях ниже ПДК_{вр} либо в концентрациях ниже предела обнаружения (Sc, Cr, Ga, Ge, Se, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, In, Te). Вероятно, высокие значения pH поверхностных и подземных вод Албынского месторождения –

неблагоприятный фактор для накопления в них элементов и их дальнейшей трансформации.

Анализ данных эксперимента, имитирующего процесс природного химического выветривания, показал возможность выщелачивания из рудного вещества Албынского золоторудного месторождения Sb, As, U, Mo талыми водами и дождем; при подкислении среды, в частности производными от жизнедеятельности микроорганизмов и растений, из породы возможен вынос значительных количеств токсичных и особо токсичных элементов As, Sb, Ni, Co, Be, Cd, U вследствие их перехода в легкорастворимые формы, в заметных количествах — Sn, Cu, Ga, Nb, Mo, W. Имитирование процессов биогенного выветривания пород показало возможность извлечения микроорганизмами значительного количества (от 6 до 29%) ряда токсичных элементов (Sb, Ba, Cd, Tl, Co, Ni, U, Mo, Cr, As, Sr) из метасоматитов и окисленной руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Айриянц А.А.* Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду. Новосибирск: СО РАН, 2003. 120 с.
2. *Гинзбург И.И., Яшина Р.С., Матвеева И.А., Беляцкий В.В., Нужделовская Т.С.* Разложение некоторых минералов органическими кислотами // *Химия земной коры*. Т. 1. М.: АН СССР, 1963. С. 290—305.
3. *Голева Р.В., Иванов В.В., Куприянова И.И., Маринов Б.Н., Новикова М.И. и др.* Экологическая оценка потенциальной токсичности рудных месторождений (методические рекомендации). М., 2001. 53 с.
4. *Дампилова Б.В., Федотов П.С., Дженлода Р.Х., Федюнина Н.Н., Карандашев В.К.* Сравнительное изучение методов оценки подвижности форм элементов в загрязненных почвах и техногенных песках в условиях статического и динамического экстрагирования // *Журн. аналит. химии*. 2017. Т. 72. № 10. С. 944—951.
5. *Даувальтер В.А.* Оценка токсичности металлов, накопленных в донных отложениях озер // *Вод. ресурсы*. 2000. Т. 27. № 4. С. 469—476.
6. *Зырин Н.Г., Малахов С.Г.* Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды. М.: Гидрометеиздат, 1981. 108 с.
7. *Ладонин Д.В.* Соединения тяжелых металлов в почвах — проблемы и методы изучения // *Почвоведение*. 2002. № 6. С. 682—692.
8. *Методические указания по определению ТМ в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства*. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
9. *Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения* // <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2070984>. Дата обращения 28.01.2015.
10. *Пересторонин А.Е., Степанов В.А.* Золоторудное месторождение Албын Приамурской провинции // *Изв. вузов. Геология и разведка*. 2015. № 4. С. 22—29.
11. *Практикум по агрохимии: Учеб. Пособие / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.*
12. *Радомская В.И., Радомский С.М., Павлова Л.М.* Геохимические аспекты влияния разработки Албынского золоторудного месторождения (Приамурье) на природную среду // *Разведка и охрана недр*. 2018. № 6. С. 55—64.
13. *Радомская В.И., Радомский С.М., Кулик Е.Н., Роголина Л.И., Шумилова Л.П., Павлова Л.М.* Геохимическая специфика редкоземельных элементов в поверхностных и подземных водах поля Албынского золоторудного месторождения (Амурская область) // *Вод. ресурсы*. 2016. Т. 43. № 6. С. 648—660.
14. РД 52.18.286-91. Методика выполнения измерений массовой доли водорастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. М.: Госкомгидромет, 1991. 65 с.
15. РД 52.18.289-90. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. М.: Госкомгидромет, 1990. 35 с.
16. *Рыженко Б.Н., Рябенко А.Е.* Моделирование состава шахтных (отвальных) вод на месторождениях Балхачского золоторудного района // *Геохимия*. 2013. № 11. С. 1021—1032.
17. *Сутурин А.Н., Куликова Н.Н., Бойко С.М., Сайбаталова Е.В.* Извлечение химических элементов из горных пород байкальской водой и органическими соединениями // *Геохимия*. 2013. № 5. С. 471—480.
18. *Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
19. *Федотов П.С., Сиваков Б.Я.* Статические и динамические методы фракционирования форм элементов в почвах, илах и донных отложениях // *Успехи химии*. 2008. Т. 77. № 7. С. 690—703.
20. *Хабидуллина Ф.М., Кузнецова Е.Г., Васенева И. З.* Микробицеты подзолистых и болотно-подзолистых почв в подзоне средней тайги на северо-востоке Европейской части России // *Почвоведение*. 2014. № 10. С. 1228—1234.
21. *Шварцев С.Л.* Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.

22. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Основы минералогии гипергенеза. Учеб. пособие. Владивосток: Дальнаука, 2000. 331с.
23. Blake R.E., Walter L.M. Kinetics of feldspar and quartz dissolution at 70–80 degrees C and near neutral pH: Effects of organic acids and NaCl // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1999. V. 63. P. 2043–2059.
24. Campbell P.G.C., Tessier A. Biological availability of metals in sediments: analytical approaches // *Heavy Metals in the Environment* / Ed. Vernet J. P. Geneva: CEP Consultant Ltd., Edinburgh, 1989. V. 1. P. 516–525.
25. Gadd G.M. Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation // *Mycol. Res.* 2007. V. 111. P. 3–49.
26. Huang W.L., Keller W.D. Dissolution of rock-forming silicate minerals in organic acids: simulated first-stage weathering of fresh mineral surfaces // *Am. Mineral.* 1970. V. 55. P. 2076–2094.
27. Stumm W., Furrer G. The dissolution of oxides and aluminium silicates; examples of surface-coordination-controlled kinetics // *Aquatic Surface Chemistry. Chemical Processes at the Particle–Water Interface* / Ed. Stumm W. New York: Wiley, 1987. P. 197–219.
28. Stumm W., Morgan J. Aquatic chemistry chemical, equilibria and rates in natural waters. New York: John Wiley and Sons Inc., 1996. 1040 p.
29. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the the speciation of particulate trace metals // *Anal. Chem.* 1979. V. 51. № 7. P. 256–273.

Hydrogeochemical Aspects Elements Behavior Under Development of the Albynskoe Gold Field, Amur Basin

V. I. Radomskaya^{1,*}, S. M. Radomskii¹, L. M. Pavlova¹, L. P. Shumilova¹

¹*Institute of Geology and Nature Management, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Blagoveshchensk, 675000 Russia*

*e-mail: radomskaya@ascnet.ru

Received: 16.06.2016 г.

Accepted: 26.04.2018 г

Composition of chemical elements in natural waters and rocks of the Albynskoe Gold Field have been studied to elucidate the possible environmental effects of open cast mining. The ore has been found to contain a group of environmentally hazardous elements, which, either because of a considerable concentration in the ore (As, Sb, Mo, W), or because of the high toxicity class (Cd, Be, U) can cause a considerable geochemical load onto the regional ecogeosystem. The natural watercourses in the zone of influence of the field show an excess of the MPC for water bodies used for fishery (MPC_{fish}) in terms of Mo, W, As, as well as high concentrations of Sb and U; the overwhelming majority of the microelements show concentrations below the respective MPC_{fish} or below their detection limits. The analysis of the results of laboratory experiments, simulating the processes of biochemical weathering of ore material by various natural agents, showed that toxic and extremely toxic elements can be leached and dispersed in the zone of influence of deposit

Keywords: surface water and groundwater, Albynskoe Gold Field, micromycetes, chemical weathering, biogenic leaching.

DOI: 10.31857/S0321-0596462191-206