



Макаров В.Н.
 д-р геол.-мин. наук, профессор
 ИМЗ СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории
 подземных вод и геохимии криолитозоны
 vnmakarov@mpi.ysn.ru

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОВ ЯКУТИИ

Рассмотрена концентрация химических элементов в жидкой и твердой фазах хвостов горно-обогатительных комбинатов рудных месторождений Якутии. Показано, что стоки хвостохранилищ приводят к образованию протяженных техногенных геохимических потоков в речной сети.

В зависимости от мощности и сплошности многолетнемерзлых пород техногенные аномалии могут формироваться и в подземных водах. Установлено, что хвостохранилища являются источниками долговременного загрязнения экосистем токсичными элементами. Сделан вывод о высоком уровне загрязнении окружающей среды в районе хвостохранилищ и возможных катастрофических последствий при возникновении аварийных ситуаций.

Ключевые слова: горно-обогатительные комбинаты, рудные месторождения, хвостохранилища, геохимия, токсиканты, Якутия.

Высокие токсикологические свойства ряда химических элементов определяют необходимость изучения их распространения, как в природных, так и в техногенных компонентах окружающей среды: атмосфере, снежном покрове, растениях, поверхностных и подземных водах, горных породах и почвах. Техногенными долговременными концентраторами токсичных элементов служат хвостохранилища ГОКов рудных месторождений полезных ископаемых. Даже при отсутствии чрезвычайных ситуаций они являются объектами техногенной и экологической опасности, источниками загрязнения грунтовых и поверхностных вод, почвенного покрова, растительности и атмосферы при испарении с поверхности и пылении.

Целью исследований была оценка роли хвостохранилищ горнодобывающих предприятий месторождений полезных ископаемых как потенциальных источников поступления токсичных элементов в окружающую среду и загрязнения природных экосистем на территории рудных районов Якутии.

Во всех странах вопросам охраны окружающей среды при проектировании и дальнейшей эксплуатации хвостохранилищ ГОКов месторождений полезных ископаемых уделяется особое внимание. Игнорирование этих факторов может привести к катастрофическим последствиям. Яркими примерами служат аварии на хвостохранилищах рудных месторождений по всему миру: Карамкен (Россия), Кумтор (Киргизия), Fundao (Бразилия), Mount Polley (Канада) и других. Аварийные ситуации могут происходить и при консервации хвостохранилищ. Так, авария на Карамкенском месторождении в Магаданской области произошла почти через 15 лет после прекращения горнорудных работ. Хвостохранилище не эксплуатировалось с 1994 г. Однако в конце августа 2009 г. при усилении процессов заводнения чаши хвостохранилища произошел прорыв паводковых вод. Это привело к залповому выбросу селеподобной массы, вызвавшему частичное разрушение жилого поселка в долине р. Хасын, гибель людей, уничтожение речных гидробионтов [2].

Таблица 1.
Геоэкологическое и геохимическое воздействие хвостохранилищ ГОКов рудных месторождений Якутии

Месторождения: объекты освоения	ММП: t, °C; мощность, м;	Геоэкологическое воздействие при аварийных ситуациях	Геохимические аномалии
Редкоземельное Томтор (бассейн р. Анабар)	-6,5 -8,4 165-750	Значительное загрязнение почвы, водотоков и водоемов, активизация термоэрозионных процессов, локальная деградация почвенно-растительного покрова, заболачивание	La, Ce, U, Th, Pb, Co, Zn, SO ₄ , pH
Золоторудное Кючюс (бассейн р. Яна)	-6,8 -10,0 300-500		As, Sb, Hg, Ni, Mn, Zn, SO ₄ , pH
Олова Северо-Янского оловоносного района: Барыллыэлах, Эге-Хая Депутатское, Кестер, Дьяхтардахское, Улахан-Эгеляхское, Чурпуньяа	-3 -7,2 270-500	Наличие геохимических аномалий, загрязнение воздуха, водотоков и водоемов, почвы, активизация эрозионных процессов, локальная деградация почвенно-растительного покрова,	Sn, Mo, Cu, Zn, Pb, Bi, Hg, SO ₄ , pH
Серебра, золота, олова, сурьмы Южно-Верхоянского района; Золото-сурьмяные Верхне-Индибирского района	-6,4 -9,1 190-400		As, Hg, SO ₄ , pH
Золоторудные Куранахского рудного поля.Якоцит-Селигдарское междуречье	-0,5 -4,0 180-300 талики	Наличие геохимических аномалий, загрязнение воздуха, водотоков и водоемов, подземных вод, почвы, деградация почвенно-растительного покрова на значительных площадях	As, Sb, Hg, SO ₄ , pH
Золоторудное Таборное, Южная Якутия	-4,5 300-400 талики		As, Sb, Hg, SO ₄ , pH
Железорудные (бассейн р. Торго)	-1,0 -3,5 20-300	Слабое загрязнение воздуха, водотоков и водоемов, деградация почвенно-растительного покрова на значительных площадях	Fe, Co, Ti
Эльконская урановоносная зона (месторождения U и Au)	-1,7 -4,5 120 -340 талики	Наличие геохимических аномалий, загрязнение воздуха, водотоков и водоемов, подземных вод, почвы, деградация почвенно-растительного покрова	U, As, Hg

Примечание: ММП – многолетнемерзлые породы

Другим примером является прорыв плотины и разлив хвостов на хвостохранилище рудника медно-золоторудного месторождения Маунт-Полли (Канада) произошедший 4 августа 2014 г. Площадь хвостохранилища составляла четыре квадратных километра, объем 175 млн. м³. В результате аварии было выпущено 10 млн. м³ воды и 4,5 млн. м³ потенциально токсичного шлама в практически нетронутые леса, реки и озера Канады. Компании Mount Polley Mining Company пришлось инвестировать более 70 миллионов долларов в восстановление природы после прорыва дамбы [7].

Большинство хвостохранилищ ГОКов рудных месторождений в Якутии пойменного типа, что увеличивает вероятность экологических рисков, интенсивного и долговременного загрязнения природы при нештатных ситуациях, подобных аварии на Маунт-Полли (Канада).

Анализ геолого-экологической обстановки в Якутии показывает, что основными территориями загрязнения окружающей среды при отработке рудных месторождений является Северо-Восток региона и юг – Алданский щит, т.е. районы богатые рудными полезными ископаемыми, где наиболее развита горнорудная промышленность, являющаяся одним из наиболее мощных факторов антропогенных преобразований окружающей среды. Химический состав техногенных геохимических аномалий не представляет загадки, так как практически аналогичен природным, сконцентрированным на месторождениях. При аварийных ситуациях на хвостохранилищах ГОКов рудных месторождений в окружающую среду поступит широкий комплекс химических элементов, в том числе и высоко токсичных, таких как As, Cd, Hg, F, Pb, Zn, Tl, Be, P (**таблица 1**).

Отработка рудных месторождений сопровождается извлечением на поверхность больших масс горных пород, оборотных технических вод, эксплуатацией хвостохранилищ. Техногенные процессы, связанные с извлечением на поверхность большой массы руд и вмещающих пород, сопровождаются активизацией физико-химиче-

ских и биогеохимических процессов. Подобные процессы происходят и в хвостохранилищах. Даже если хвостохранилища не эксплуатируются в них продолжается активное преобразование минерального состава, накопленных рудных отходов, их глинизация. Известно, что гипергенное разрушение горных пород происходит и при отрицательных температурах, что позволило даже разработать метод криогеотехнологии – добычи металлов при отрицательных температурах [5]. Стоки через дамбы приводят к резкому изменению химического состава природных вод и формированию протяженных техногенных геохимических потоков в речной сети, особенно в районах распространения мерзлых высокольдистых отложений, например, в арктических районах Якутии: Куларском золотоносном, Северо-Янском оловоносном [6].

Хвостохранилища являются источниками долговременного загрязнения экосистем токсичными элементами. Рудная пульпа, особенно после цианирования на золотоизвлекательных фабриках, обогащена металлами, содержащимися в пульпе (в основном халькофильной группы), в том числе такими высокотоксичными элементами как Zn, Cu, Pb, Sb, Hg, Tl. Некоторые хвостохранилища, где накапливаются отходы обогатительных фабрик месторождений олова, золота, сурьмы превратились в своеобразные техногенные месторождения. Содержание, например, As в осадках хвостохранилищ обогатительных фабрик, особенно в техногенных илах, достигают ураганных значений – до 1-1,5% (**таблица 2**).

Высокое содержание токсичных элементов наблюдается и в воде хвостохранилищ ГОКов, где концентрация, например, мышьяка превышает санитарные нормы в десятки раз (**таблица 3**).

Экологическая опасность продуктов обогащения связана с активизацией физико-химических процессов и миграционной способности металлов, что ведет к развитию контрастных и протяженных техногенных гидро- и литохимических потоков рассеяния [4]. Так, интенсивная отработка оловоносных россыпей Северо-Янского оловоносного района (Мамонт, Тасаппа, Тенкели

Таблица 2.

Содержание As в осадках хвостохранилищ обогатительных фабрик рудных месторождений, мг/кг.

Обогатительные фабрики	Мин	Макс	Среднее	Примечание
Аллах-Юньская	-	-	2000	Лежалые хвосты
Депутатская	-	1000	-	Хвостохранилище
	-	500	-	Отстойник
Дуэтская	-	-	500	Хвосты гравитации
Куларзолото	15	700	112	Лежалые хвосты
Нежданнинская,	890	970	-	Хвостохранилище, карта 5
Самолазовская	-	До 1,5%	-	Осадки отстойника
Самолазовская	-	До 1%	-	Осадки оборотных растворов
Сарылахская	-	2 000	-	Хвостовая пульпа

Таблица 3.

Содержание мышьяка в воде хвостохранилищ ГОКов рудных месторождений Якутии, мкг/л.

Адрес	Полезное ископаемое	Среднее	Максим	Примечание
Аллах-Юньская ЗИФ	Au	200	-	Действующее
Аллах-Юньская ЗИФ	Au	7	-	Действующее, старое
Куранахская ЗИФ	Au	22-23	-	Хвостохранилище
Куранахская ЗИФ	Au	59,4	2 800	Хвостовая пульпа
Нежданинское	Au	60	2 000	Хвостохранилище
Нежданинское	Au	240	890-970	Хвостохранилище
Сарылахская ОФ	Au, Sb	-	2 000	Пульпа
Депутатская ОФ	Sn	-	100	Хвостохранилище
Депутатская ОФ	Sn	-	50	Отстойник
ПДК		50		[1]

Таблица 4.

Степень химического загрязнения техногенных вод Куранахской ЗИФ

Техногенные воды	Уровень превышения над ПДК [1]			
	1000 n	100 n	10 n	n
Хвостовая пульпа фабрики	Fe (5700)	Mn, V(800-900), As, Cu (270), Cr, Zn (100-150)	Z (60), Pb, Hg, Ni (20-30)	-
Старое хвостохранилище (2 секция)	-	-	Z(70), Cu(40), Fe (10)	N(NH ₄), Ni(6-8) Mn, SO ₄ (2)
Старое хвостохранилище (3 секция)	-	-	Mn, Cu (12)	Z, Fe (4-7)
Хвостохранилище ЗИФ	-	-	Cu (30), Z (18), Fe (10)	NH ₄ (8), Ni, Mn, Zn (2-3)

Примечание

Z - цианиды

и др.) сопровождалась контрастными техногенными геохимическими аномалиями в гидросети, отличавшихся высокой мутностью воды, а их протяженность достигала десятков километров.

В Южной Якутии в бассейне реки Б. Куранах, где действует долголетний мощный техногенный объект – Нижнекуранахская золотоизвлекательная фабрика и расположены хвостохранилища Куранахской и Лебединской ЗИФ сформировалась комплексная геохимическая аномалия. Согласно критериям оценки степени химического загрязнения поверхностных вод [3] хвостовая пульпа Куранахской ЗИФ отвечает параметрам экологического бедствия, техногенные воды старого хвостохранилища во 2 секции чрезвычайной экологической ситуации, техногенные воды старого хвостохранилища в 3 секции и хвостохранилища ЗИФ – неблагоприятной экологической ситуации (таблица 4).

В воде хвостохранилища Куранахской ЗИФ обнаружен широкий комплекс токсичных элементов, однако их концентрация в десятки (Cu, Cr, Zn) и сотни (Fe, Mn, V, As) раз ниже, чем в хвостовой пульпе фабрики. В техногенных водах ЗИФ Куранахского рудного поля содержание цианидов достигает 1-4 мг/л, в хвостохранилище – 0,92-3,58; в хвостовой пульпе – 3,18 мг/л. Содержание цианидов в пруде хвостохранилища значительно снижается, по сравнению с концентрацией в хвостовой пульпе, что свидетельствует о хорошем естественном разложении цианидов.

Неблагоприятные мерзлотно-геологические условия (закарстованность горных пород и мощные таликовые зоны) способствуют миграции загрязнителей со дна хвостохранилищ в подземные воды. Наиболее высокая степень загрязнения подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса наблюдается в ряде скважин, где величина суммарного показателя химического загрязнения близка к показателям в хвостохранилище ЗИФ.

Нисходящая инфильтрация техногенных вод из хвостохранилищ Куранахской ЗИФ, обогащенных соединениями цианидов, по трещиноватым талым карбонатным породам загрязняет глубокозалегающие воды нижнекембрийского водоносного комплекса. Уровень химического загрязнения постепенно снижается к юго-западу и северо-востоку от хвостохранилища до минимальных значений, отвечающих удовлетворительной экологической ситуации. Зона неудовлетворительной экологической ситуации – загрязнения подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса, главным образом, соединениями азота, протягивается в северо-восточном направлении не менее чем на 5,5 км вдоль хвостохранилища ЗИФ. Ширина техногенного потока в подземных водах в центральной части – около одного километра.

В скважинах, пробуренных в долине р. Куранах выше Куранахской ЗИФ, суммарная концентрация азота в воде около 0,40 мг/л и отсутствуют

цианиды, в районе фабрики она возрастает до 6,52 мг/л и в подземных водах обнаруживаются цианиды и тиоцианиды. Техногенные воды, поступающие в подмерзлотный нижнекембрийский водоносный комплекс, приводят к изменению их геохимической обстановки за счет повышения в подземных водах концентрации железа и соединений азота: аммония, нитратов, цианидов и тиоцианидов. В скважинах, расположенных на некотором удалении от хвостохранилища, содержание цианидов и железа снижается до фоновых значений. Это свидетельствует о достаточно быстром разложении и осаждении их из растворенной фазы воды за счет биогеохимических и адсорбционных процессов, нейтрализации и разбавления. Параметры техногенной геохимической аномалии цианидов в подземных водах локальны, уже на расстоянии 500-600 м от Куранахской ЗИФ концентрация загрязняющих компонентов снижается до фоновых значений (рисунки 1).

Существующее техногенное воздействие на гидрогеохимическую обстановку не вызывает опасности возникновения чрезвычайных геоэкологических ситуаций. Этому способствуют специфические условия формирования и стока подземных вод, особенности их инфильтрационного питания и достаточно высокие водные ресурсы в регионе. Разгрузка основных техногенных потоков Нижнекуранахского хвостохранилища происходит в подземные воды нижнекембрийского

водоносного горизонта, однако их воздействие на подземные воды в целом локально.

В поверхностных водах, расположенных ниже хвостохранилищ зафиксированы аномальные содержания Hg, As, Cd, Pb. Поверхностный сток с хвостохранилищ ЗИФ (рисунки 2), в основном за счет слива дренажных вод, формирует гидрогеохимическую аномалию в р. Б.Куранах. Концентрация мышьяка в пределах гидрогеохимической аномалии в 6-10 раз выше фоновой концентрации в поверхностных водах Якобит-Селигдарского междуречья, но на порядок ниже гигиенических ПДК.

В реках и ручьях района Куранахского рудного поля, где на золотоизвлекательной фабрике цианиды используются при обогащении руд, содержание цианидов в воде изменяется в пределах 0,005-0,02 мг/л (устье р. Бол. Куранах – 0,02 мг/л). В техногенных водах ЗИФ Куранахского рудного поля содержание цианидов достигает 1-4 мг/л, в хвостохранилище – 0,92-3,58; в хвостовой пульпе – 3,18 мг/л.

Интенсивность и протяженность техногенных геохимических шлейфов различна и зависит от форм их нахождения и миграционных свойств. Протяженность литохимических аномалий As, Ag, W, Hg, Mo, Mn, Pb и Tl около 5 км.

Геохимическая оценка системы вода-донные осадки-почвы-растения выявила аномальные концентрации металлов (выше фоновых показателей n-10n) в нижних бьефах Нижнекура-

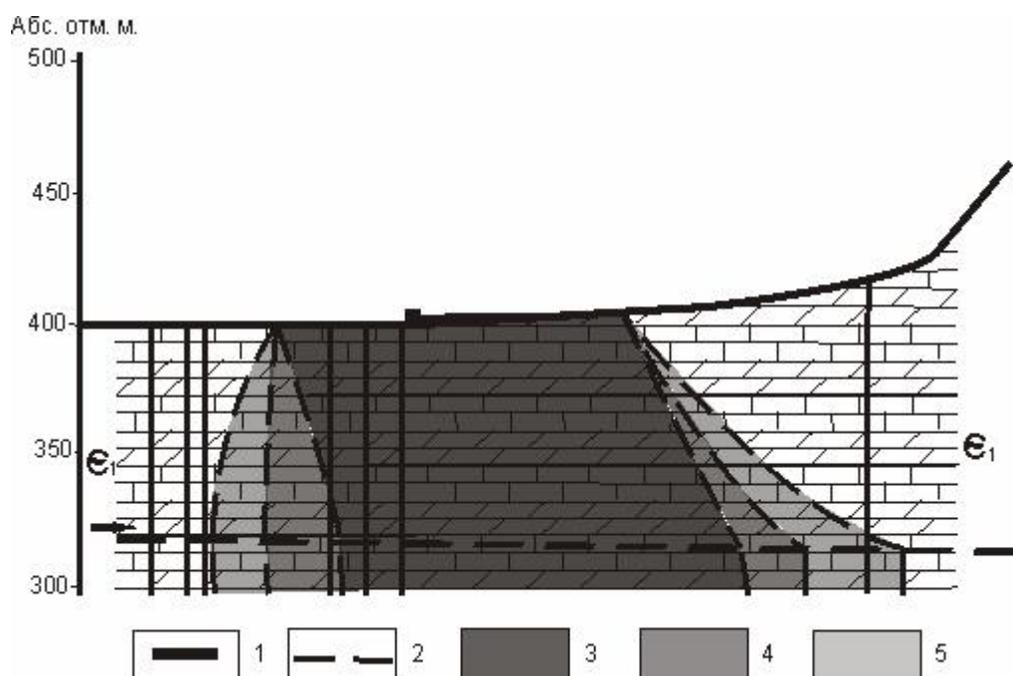


Рис. 1. Геохимическая аномалия цианидов в подземных водах (Куранахская ЗИФ)
 1 – хвостохранилище ЗИФ; 2 – уровень подземных вод; 3-5 – концентрация цианидов в подземных водах, мг/л:
 3 – 0,5, 4 – 0,3, 5 – 0,05



Рис. 2.
Перелив сточных вод из хвостохранилища Куранахской ЗИФ

Таблица 5.
Параметры техногенных аномалий в районе Нижнекуранахской ЗИФ

Компоненты экосистем		Кларк концентрации*
Фоновые системы		
Почвы Якут-селигдарского междуречья		2
Техногенные системы		
Куранахское рудное поле	Руда	125As, 3Cu, 2Sb, Pb, Mo, Co
	Вмещающие породы	50As, 40Tl, 7Sb
	Почвы	15As, 1,3Cu
Хвосты Нижнекуранахской ЗИФ		125Au, 88Sb, 35As, 32Ag, 12W, 3,6Tl, 2,5Mo, 1,2Pb, Zn, Hg
Нижний бьеф Нижнекуранахского хвостохранилища Долина р. Б.Куранах, руч. Латышский,	Вода	7 Cd, Tl
	Донные осадки	328Au, 9As, 8Ag, 5W, 2Hg, Mo, 1,4 Mn, Pb, Tl
	Почвы	19Ag, 9As, 5W, 3Mo, 2Mn, Hg, 1,4 Pb, Tl
	Растительность	Мох 245W, Cr, 150As, 34V, Mn, 25Ag, 6Cu, Mo, Pb Лиственница 49Cr, 25As, 14Mn, 5 Ag, W, 2Mo, Cu

нахского хвостохранилища (**таблица 5**) при их отсутствии или фоновом уровне в верхнем бьефе.

Хвостохранилища Депутатского ГОКа находятся на северо-востоке Якутии в зоне сочленения Селяннихской межгорной впадины с горной цепью Салтага-Тас. Климат района резко континентальный с суровой продолжительной зимой (8-9 месяцев) и коротким летом. Среднегодовая температура воздуха в районе -13,2°C. В отличие от мерзлотных условий Куранахского рудного поля многолетнемерзлые породы в районе Депутатского ГОКа имеют сплошной характер развития, мощностью около 500 м и температурой на подошве слоя годовых колебаний около -7,0°C, исключающих проникновение загрязнителей с поверхности в подземные водоносные горизонты. Сезонное оттаивание грунтов составляет от 0,4 до 1,8 м. Основными географическими факторами, отрицательно влияющими на преобразование экосистем криолитозоны в районе месторождения являются климатические (низкая температура, высокая повторяемость безветренных дней, туманы,

относительно высокая плотность воздуха), геоморфологические и геокриологические условия ландшафтов (льдистость отложений, температура горных пород, мощность сезонноталого слоя, наледи и другие мерзлотные процессы и явления).

К другой группе факторов, влияющих на последствия недропользования относятся геологические и горнотехнические условия залегания месторождения, рельеф местности (**рисунок 3**), глубина и мощность продуктивного слоя, физико-химические свойства и геохимический состав руд, эндогенных ореолов и вмещающих пород.

В целом, природные условия не благоприятствуют высокой активности гипергенных процессов. В основном, это лимитируется небольшой глубиной протаивания грунтов и малой мощностью рыхлых отложений, не превышающей 2-2,5 м.

Отрицательные экологические последствия разработки Депутатского месторождения олова имеют локальный характер по загрязнению атмосферы и литосферы и являются региональными по уровню техногенного давления на водные системы [4].

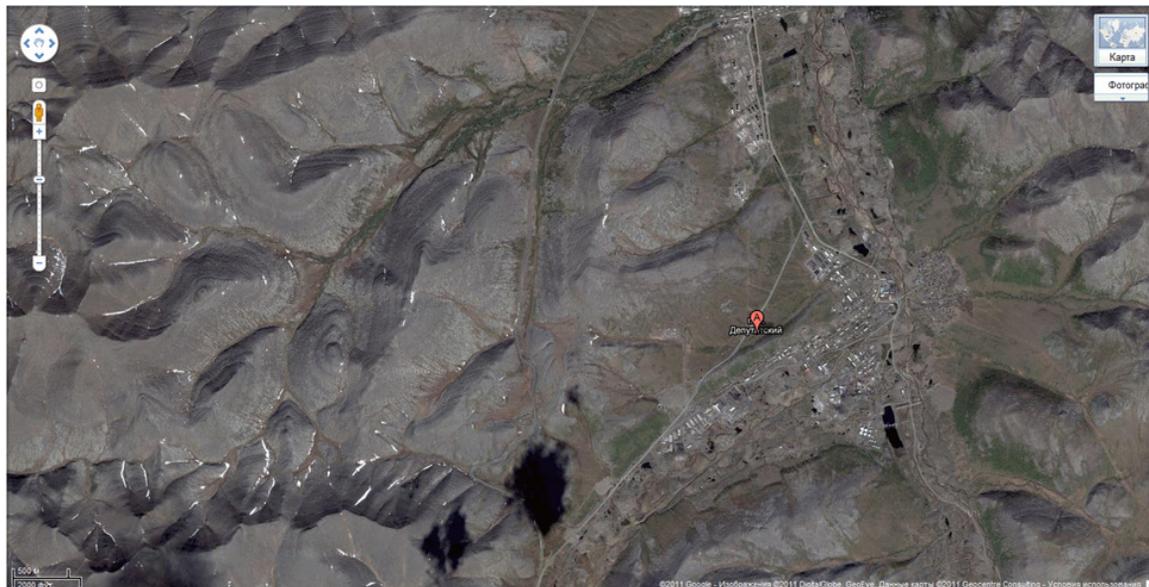


Рис. 3. Космический снимок района Депутатского месторождения

Таблица 6. Содержание макро- и микрокомпонентов в техногенных водоемах Депутатского оловорудного месторождения, мг/л.

Объекты	pH	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Zn	Cu	Mn	As
Хвостохранилище	2,6-3,5	405	0,034	11350	145	1,1	64	45	0,10
Водосброс, 1991 г.	2,6	1,0	0,005	1094	60	1,5	2,0	1,0	0,005
Водосброс, 2021 г.	2,9	< 0,5	1,31	1250	52	< 0,005	< 0,001	0,0043	0,005
[1]	-	0,1	0,02	100	40	0,010	0,001	0,010	0,010

Для техногенных стоков с хвостохранилища характерна стабильность поступления загрязнителей в водотоки. «Ураганная» кислотность, повышенная концентрация сульфатов и соединений азота наблюдается в водосбросе хвостохранилища Депутатского оловорудного месторождения на протяжении тридцати лет (таблица 6).

Поступление техногенных вод из хвостохранилища (рисунок 4) формирует контрастные техногенные гидрогеохимические аномалии в р. Депутатская, ручьях, расположенных ниже по течению и даже в крутой реке Иргичээн, куда сточные воды с накопителя жидких промышленных отходов на хвостохранилище прямоком спускаются в водосбросный лоток. При этом содержание, к примеру, аммония, Fe, Mn, Cu, Zn в воде, накапливающейся в хвостохранилище, превышает ПДК в сотни и даже в тысячи раз (см. таблицу 6).

Значительную опасность представляет такие высокотоксичные элементы как As и Pb, накапливающиеся в осадках отстойников и хвостохранилища, и способные быть источниками вторичного загрязнения воды. Содержание этих токсикантов в осадках, особенно в техногенных илах, достигает высоких концентраций (таблица 7).

Вода ручьев, расположенных ниже разрабатываемых месторождений Депутатского рудного

поля, представляет собой типичные «рудные» воды с преобладанием сульфатов в солевом составе и высокой концентрацией тяжелых металлов. Это очень агрессивные кислые воды с величиной pH 2,5-3,5 и повышенной минерализацией. Высокая кислотность и насыщенность природных вод сульфатами и тяжелыми металлами наблюдается практически на всем протяжении р. Депутатская. Химический состав воды ниже хвостохранилища ДОФ сульфатный магниево-кальциевый с минерализацией около 2,5 г/л.

Большие объемы загрязненных стоков попадают в водные системы при катастрофических паводках. На Депутатском ГОК в 2007 г. в период с 22 мая по 4 июня объем сброса составил 202 тыс. м³; в 2008 г. с 6 по 13 июня, было сброшено 103 тыс. м³ паводковой загрязненной воды при пропускной способности сифонного водосброса 600 м³/час.

Хвостохранилища являются источниками загрязнения почв, водотоков и растительности токсичными элементами также за счет эолового переноса.

При разработке Куранахского месторождения произошла существенная трансформация биогеохимической организованности экосистем сопряженных территорий в связи с усилением поступления вещества не только с нарушенных земель, но и с хвостохранилища. Это привело



Рис. 4. Хвостохранилище Депутатской ОФ

к заметному увеличению спектра типоморфных металлов золоторудного месторождения в растительности. Особенно чутко реагируют на атмосферный перенос с поверхности хвостохранилища мхи и лишайники. Содержания As во мхах и лишайниках достигает 14 мг/кг на воздушно-сухой вес, в золе – до 50 мг/кг, в лиственнице – 2,5 мг/кг, голубике – 0,7 мг/кг.

Другим примером олового загрязнения является атмосферный перенос с поверхности хвостохранилища № 2 ЗИФ Куларзолото Куларского золоторудного района на севере Якутии, в

Таблица 7.

Содержание As и Pb в осадках хвостохранилищ Депутатского ГОКа, мг/кг.

Объекты ГОКа	As	Pb
Хвостохранилище	1000	7
Отстойник	500	70
ПДК _{почв} [1]	10	32

Таблица 8.

Содержание As в растительности у хвостохранилища ЗИФ «Куларзолото»

Растительность	Среднее, мг/кг	Максим., мг/кг	Кол-во проб
Лиственница (кора)	33	50	9
Разнотравье	18	30	11
Мох	35	70	11
Ягель	34	50	11
Брусника	17	30	7
Среднее для растительности и района	22	-	92

результате которого сформировалась литохимические и биохимические аномалии As на расстоянии до 100-120 м от хвостохранилища. Среднее содержание As в растительности вблизи хвостохранилища изменяется в пределах 17-35 мг/кг (в среднем – 22 мг/кг). Максимальные концентрации – до 50 мг/кг наблюдаются во мхах, ягеле и коре лиственницы (таблица 8). ❶

Литература

1. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (2021) Москва: Минздрав РФ, 496 с.
2. Готов В.Е., Глотова Л.П., Бульбан А.П., Митрофанов И.Д. Хвостохранилище Карамкенского горно-металлургического комбината: инженерно-геологические проблемы и причины аварийного разрушения // Вестник ДВО РАН. 2010, № 3 (151). С. 31-39.
3. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – М.: Мин. охраны окружающей среды России, 1992. – 55 с.
4. Макаров В.Н. Геохимические потоки рассеяния в Северо-Янском оловоносном районе // Мат. Всероссийского симпозиума «Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий» и IX Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана по проблеме «Современное минералообразование», 29.11-02.12.2010. – Чита, 2010. – С.39-42.
5. Птицын А. Б., Абрамова В. А., Маркович Т. И., Эпова Е. С. Геохимия криогенных зон окисления. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т природ. ресурсов, экологии и криологии. – Новосибирск: Наука, 2009. – 87 с.
6. Шац М.М. Макаров В.Н. Геоэкологические особенности недропользования в Восточной Сибири. Всероссийская конференция с международным участием «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне», посвященная 60-летию образования ИМЗ СО РАН (28-30.09.2020 г.), Якутск: ИМЗ СО РАН. 2020. С.204-207.
7. Environmental and Safety Incidents concerning Tailings Dams at Mines: Results of a Survey for the years 1976-2016 by Mining Journal Research Services; a report prepared for United Nations Environments Program, Industry and Environment. Paris. 2017. P.135 (Инциденты в области охраны окружающей среды и техники безопасности, связанные с дамбами хвостохранилищ на шахтах: Результаты опроса за 1976-2016 годы, проведенного Mining Journal Research Services; отчет, подготовленный для Программы Организации Объединенных Наций по промышленности и окружающей среде. Париж. 2017. С.135).

UDC: 622:553 (571.56)

V. N. Makarov, PhD (Geology and Mineralogy), Dr. Habil, professor, Chief Researcher of Laboratory groundwater and geochemistry Permafrost, Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences, vnmakarov@mpi.ysn.ru

GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF TAILINGS OF MINING AND PROCESSING PLANTS IN YAKUTIA

Abstract: The concentration of chemical elements in the liquid and solid phases of the tailings of mining and processing plants of ore deposits in Yakutia is considered. It is shown that tailings runoff leads to the formation of extended technogenic geochemical flows in the river network. Depending on the thickness and continuity of permafrost, technogenic anomalies can also form in groundwater. It has been established that tailings are sources of long-term pollution of ecosystems with toxic elements. The conclusion is made about the high level of environmental pollution in the area of tailings and possible catastrophic consequences in the event of emergencies.

Keywords: mining and processing plants, ore tailings, tailings, geochemistry, toxicants, Yakutia.