

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 553.5:662

*Е.В. Аламтиева*

### ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА И ЕЕ ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

*Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития РГПУ  
им. А.И. Герцена на 2012–2016 гг. (мероприятие 2.3.1).*

Обогатительные фабрики и их хвостохранилища – существенный фактор негативного воздействия техногенеза на окружающую среду. Во-первых, происходит загрязнение поверхностного стока, почв и, как следствие этого, подземных вод. Во-вторых, общий спад производства может привести к практически полному отсутствию возможности поддержания горно-обогатительного комплекса на уровне экологической безопасности.

**Ключевые слова:** геоэкология; хвостохранилище; токсиканты; нанофракции; миграция.

В результате процессов изменения природных комплексов и биогеоценозов под воздействием производственной деятельности человека возникают ранее не существовавшие геологические образования, которые по технологическим свойствам, количеству и экономическим показателям могут быть использованы для удовлетворения практических нужд человека, что соответствует понятию «месторождение полезных ископаемых». Такого рода геологические объекты, сотворенные руками человека, сегодня называют техногенными месторождениями, но с формальной точки зрения большая их часть не отвечает этому определению, так как, согласно общепринятым требованиям, по ним не утверждались запасы полезного сырья и не проводилась оценка экономической целесообразности их разработки.

Хвостохранилище является накопителем отходов переработки различных руд и относится к числу экологически потенциально опасных инженерных объектов.

Человек «перекачивает» на поверхность из глубин земли огромные количества различных элементов, что приводит к нарушению экологического равновесия, поскольку в биологический круговорот вовлекается, согласно оценке О.П. Добродеева, Cd – в 160 раз меньше, чем извлекается, Sb – 150, Hg – 110, Pb – 35, F – 15, U – 6, Sn – 6, Cu – 4, Mo – в 3 раза. При этом многие из данных элементов являются высокотоксичными. Значительные объемы многих экологически опасных тяжелых металлов накапливаются в отвалах шахт и карьеров и хвостах обогащения руд, где в кислой среде они легко переходят в подвижные формы, попадая в грунтовые, поверхностные воды и в атмосферу (в виде пыли и кислотных дождей) [1].

Добыча и последующая переработка полезных ископаемых – один из наиболее мощных видов техногенеза. Его воздействие на природную среду возрастает и охватывает все большие территории [12. С. 269]. При разработке месторождений полезных ископаемых отрабатываются руды в основном на один полезный компонент. Элементы-попутчики главного рудного элемента часто не извлекаются из руд, попадая в отвалы горно-обогатительных фабрик. В своем большинстве горнорудные предприятия становятся градообразующими и в ряде мест современные районы городов рас-

полагаются вокруг них. Объемы отходов, накопленных за десятки лет, огромны и представляют собой терриконы вскрышных пород и продукты хвостовой пульпы, представленные песками, алевритами и глинами. Получение концентратов руд благородных и редких металлов на горно-обогатительных комбинатах сопровождается складированием значительных масс отходов в хвостохранилищах [3. С. 34–40].

В настоящее время хвостовые хозяйства рассматриваются как новый тип рудных объектов – техногенные месторождения. В ряде стран уже осуществляется их вторичная переработка, рентабельная ввиду того, что огромные массы пород уже извлечены из недр, а также за счет измельченности и более выдержанного минерального состава пульпы. Техногенные месторождения золота, помимо доизвлечения основного полезного компонента, могут являться ценным источником попутных элементов (платиноидов и рения), которые в начальный период добычи руд по тем или иным причинам не извлекались. Со временем под действием различных факторов гипергенеза благородные металлы и рений могут переходить в подвижные формы и мигрировать как по толще хвостов, так и за пределы хвостохранилища. Научные разработки позволят на современном уровне подойти к решению вопросов доизвлечения и вторичного извлечения химических элементов из отходов горно-обогатительных комбинатов.

Все процессы, происходящие в рудах в процессе гипергенеза, не прекращаются, усиливаясь в хвостохранилищах благодаря возрастающему механическому воздействию и доступу кислорода и воды. На хвостохранилищах нередко происходят подземные пожары и взрывы, так как в результате химических реакций выделяется тепло. Происходит специфическое минералообразование, связанное с техногенными растворами [4].

Урупское медноколчеданное месторождение находится в верхнем течении р. Уруп на территории Урупского района Карачаево-Черкесской республики, в 20 км к югу от районного центра станицы Преградной.

На базе месторождения с 1964 г. работает горно-обогатительный комбинат. Это комплексное горно-промышленное предприятие по добыче и переработке медноколчеданной руды. Его конечной продукцией в результате обогащения руд является медный и пирит-

ный концентрат. Дополнительно ведутся работы по получению цинкового концентрата. В процессе переработки концентрата на медеплавильных и аффинажных заводах получают золото, серебро и сопутствующие им редкие элементы (кадмий, селен, теллур и т.д.).

Урупское месторождение относится к золотосульфидному типу, основными рудными минералами которого являются: пирит  $\text{Fe}(\text{S}_2)$ , халькопирит  $\text{CuFeS}_2$ , сфалерит  $\text{ZnS}$ , борнит  $\text{Cu}_3\text{FeS}_4$ , молибденит  $\text{MoS}_2$ . Второстепенные рудные минералы: ковеллин ( $\text{CuS}$ ), пирротин ( $\text{FeS}$ ), арсенопирит  $\text{Fe}(\text{AsS})$ , малахит  $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ , блеклые руды (теннантит  $\text{Cu}_3\text{AsS}_3$ , тетраэдрит  $\text{Cu}_3\text{SbS}_3$ ), галенит ( $\text{PbS}$ ), гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), станин ( $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ ), халькозин ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), беегерит ( $\text{Pb}_6\text{Bi}_2\text{S}_9$ ). Исследования пород и руд с помощью микрорентгено-спектрального анализа выявило присутствие алтаита ( $\text{PbTe}$ ) и самородного теллура.

В составе Урупской горнообогатительной фабрики находятся хвостохранилища первой и второй очереди (главная особенность хвостохранилища), содержащие отходы обогащения Медногорского горнообогатительного комбината, в которых находится более 11,6 млн т пиритсодержащих хвостов. Хвостохранилище первой очереди функционирует с 1968 г. и представляет собой гидротехническое сооружение, по типу овражное, намывное. Общая площадь более 97 га, полезная площадь около 64 га, вместимость не менее 6 млн  $\text{м}^3$ . Хвостохранилище имеет длину почти 2 км и ширину от 250 до 550 м. К 1997 г. хвостохранилище первой очереди заполнено до проектных отметок и эксплуатация его в части складирования хвостов завершена. С 1998 г. здесь проводились работы по рекультивации, в процессе которых смонтирована установка по нейтрализации воды в прудке-отстойнике. В результате около 140 тыс.  $\text{м}^3$  воды из прудка нейтрализовано и откачено в хвостохранилище второй очереди. В дальнейшем проводились работы по засыпке части акватории прудка хвостами.

На хвостохранилище существует система замкнутого оборотного водоснабжения. После осветления воды в прудке-отстойнике, через водосборные колодцы (железобетонного, шахтного, шандорного типов) и коллектор вода подается самотеком в насосную станцию оборотной воды. Водосборный коллектор в ложе хвостохранилища выполнен из стальных труб в железобетонной обойме, за пределами хвостохранилища – из безнапорных железобетонных труб.

В систему оборотного водоснабжения входят также насосная станция оборотной воды, магистральный водовод и железобетонный резервуар емкостью почти 300  $\text{м}^3$ . По коллектору вода поступает в насосную станцию и насосами откачивается в резервуар, откуда подается в технологический процесс обогащения руды.

При необходимости сброса части оборотной воды в р. Уруп она проходит предварительное обеззараживание на станции нейтрализации воды. В состав очистительных сооружений входят распределительный колодец, контактный чан, радиальные отстойники, емкость для хранения серной кислоты. Часть сточных вод поступает в контактный смеситель и после обработки серной кислотой поступает в отстойники, а затем по коллектору сбрасывается в р. Уруп. В процессе нейтрализации рН воды снижается с 12 до 8.

Хвостохранилище второй очереди введено в эксплуатацию в 1998 г. Общая площадь более 100 га, имеет длину около 1 км и ширину около 600 м. Наименьшая отметка ложа хвостохранилища примерно 900 м. На хвостохранилище существует система замкнутого оборотного водоснабжения, содержащая до 145 тыс.  $\text{м}^3$  технической воды, которая в случае его прорыва может попасть в реки Богачуха и Кубань, а также Темрюкский залив Азовского моря.

Отвалы хвостохранилища представлены некондиционными рудами и отстойниками отходов обогатительного производства. Их физико-химические особенности существенно различны, поэтому и способы их освоения могут быть разными. Отстойники хвостохранилища Урупского горно-обогатительного комбината наиболее благоприятны для освоения, так как вещество, составляющее их, раздроблено до мелких фракций 0,01–0,1 мм; они находятся в непосредственной близости от обогатительной фабрики (1 км) и связаны с ней асфальтированной дорогой и трубопроводами.

При изучении хвостохранилища автором отобрано более 100 образцов при площадном опробовании хвостохранилища (по шурфовке и из керн скважин); собраны пробы воды из отстойников, ливневых колодцев, водоотводного канала, из речной системы района; проведено опробование почв и произрастающей на них растительности по мере удаления от хвостохранилищ.

Цель исследования – выявление закономерностей миграции химических элементов в системе хвостохранилища – почвы, растения – водная система района медно-колчеданного месторождения; изучение минеральной ассоциации Урупского медноколчеданного месторождения; выявление минерально-геохимических особенностей руд и отвалов горно-обогатительных комбинатов, месторождения золотосульфидной формации; проследить миграцию химических элементов на примере хвостохранилища Урупского горнообогатительного комбината (Урупский район, Карачаево-Черкесская республика).

Для достижения поставленных целей ставились и решались следующие основные задачи: проследить поведение химических элементов в водной системе района, оценить размер почвенных и биогеохимических аномалий, дать минералого-геохимическую характеристику руд, выявить геохимические особенности хвостов, а также подвижные формы элементов-токсикантов.

Хвосты состоят преимущественно из нерудных минералов (полевой шпат, кварц) и пирита, в небольшом количестве встречаются сфалерит, галенит, гематит. Преобладающая часть нерудных минералов наблюдается в свободных зернах, меньшая – в сростаниях с сульфидными. Медьсодержащие минералы представлены халькопиритом, борнитом, блеклой рудой. В рудах золото встречается в основном в халькопирите, сфалерите, борните, а также обнаружено в сростании с пиритом.

Извлеченные из недр и дезинтегрированные сульфидсодержащие породы в поверхностных условиях могут подвергаться быстрому окислению и переходу химических элементов в подвижное, миграционноспособное состояние. В отвальных хозяйствах накапливается значительное количество халькофильных элемен-

тов, многие из которых относятся к первой группе токсичности (Cu, Pb, Zn, As). В результате ветровой и водной эрозии вокруг хвостохранилищ создаются гидрохимические, почвенные и биогеохимические аномалии, размер которых на порядок и более превышает аналогичные природные аномалии [3. С. 34–40].

Складированные хвосты Урупского горно-обогатительного комбината относятся к V классу опасности в соответствии с критериями отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды. По степени воздействия на человека и окружающую природную среду хвосты относятся к IV классу опасности [4].

Все, что связано с обработкой месторождений, гипергенными процессами, техногенезом и рудничными водами, не проходит безрезультатно для окружающей среды. Накопленные в техногенных водах элементы выносятся за пределы рудопроявлений и рассеиваются в грунтовых и родниковых, а следовательно, и в питьевых водах. Эти процессы неизбежно нарушают экологическое равновесие в районе. Происходит губительное загрязнение окружающей среды.

Разрабатываемые и эксплуатируемые месторождения полезных ископаемых представляют собой источники мощного загрязнения окружающей среды токсичными элементами.

По результатам исследований, главные рудные элементы Cu, Pb, Zn на хвостохранилище ведут себя по-разному. Цинк характеризуется высокой подвижностью, поэтому крайне редко образует самостоятельные фазы, он накапливается в некоторых гипергенных минералах. При разработке месторождения сульфиды находятся во вскрышных рабочих остатках, в отвальных хозяйствах могут накапливаться халькофилы, элементы первой группы токсичности: S, Cu, Pb, Zn, As.

В результате физико-химических процессов, происходящих в зонах складирования, возникают новые минеральные фазы, изменяются формы нахождения химических элементов; они переходят в подвижное состояние и легко мигрируют на окружающие почвы, поступают в воды. Зафиксировано появление новообразованных металлоорганических форм, которые наиболее активно вовлекаются в биоценозы. Миграция происходит в минеральной, ионной, коллоидной, биогенной формах [5. С. 36–38; 6. С. 411; 7. С. 83; 8, 9]. Из-за того, что потоки вещества из отходов горнорудного производства изменяют состояние среды жизнедеятельности, отрицательно влияя на биоценозы, на развитие живых организмов, в том числе и человека, исключительно важным является изучение поведения *подвижных форм токсикантов*.

В условиях гипергенеза создаются благоприятные условия для образования наноразмерных частиц, поэтому в ранг первоочередных задач выдвигается проблема изучения *подвижных форм химических элементов на уровне наноразмерных частиц*, которые и являются наиболее биоактивными, но никогда не выделялись при разработке и обогащении руд. Выявление путей и форм нахождения токсикантов в объектах окружающей среды позволит разработать методы очистки зараженных территорий, что невозможно без устранения самого источника загрязнения. Кроме того, в связи

с ростом потребностей современной промышленности в широком спектре редких и рассеянных химических элементов и с появившимися возможностями извлечения наночастиц из проб отходы горнорудного производства могут стать новым дешевым источником редких и рассеянных элементов.

Проведенное опробование отвалов хвостохранилищ на глубину 2–3 м показало, что для них характерна стратиграфическая зональность отложения и они состоят из глинистых и песчано-алевритовых прослоев, имеющих мощность от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Преимущественным распространением пользуются алевриты. Они имеют желто-бежевую и бурую, а также темно-серую окраску. Светлоокрашенные горизонты состоят преимущественно из кварца, полевых шпатов, сульфидов (сфалерит, галенит), которые находятся в сростании с нерудными минералами. В темных прослоях преобладает пирит, реже халькопирит, борнит, блеклая руда. Зерна сульфидов окислены и покрыты тонкой пленкой водного сульфата железа – мелантерита. Бурая окраска появляется, когда все зерна таких слоев «одеты в рубашку» гидроксидов железа. Бурые пески накапливаются преимущественно в низах разрезов, что связано с сезонными затоплениями хвостохранилищ и активными процессами окисления в них. Методом ЯГР-спектроскопии в слоях разноокрашенных песков выявлено различное соотношение фаз ярозита, гидрогетита и гетита, которые и определяют окраску осадков.

При исследовании химического состава хвостов были использованы традиционные методы анализа: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП МС) и атомно-абсорбционный анализ с полным кислотным вскрытием проб на Au, Pt, Pd.

Методом ИСП МС в водных растворах нанофракций проб были обнаружены следующие содержания благородных металлов (г/т): Pt – до 0,035; Ru – до 0,022; Rh – до 0,15; Ir – до 0,0084; Os – до 0,00025; Re – до 0,34; Au – до 0,8; Ag – до 2,6 (табл. 1).

Таблица 1  
Содержания благородных металлов в водных растворах нанофракций хвостов по данным ИСП МС, г/т

Элемент / порог обнаружения	От	До
Au	0,0009	0,8
Ag	0,011	2,6
Pt	<0,0004	0,0035
Ru	<0,0001	0,022
Rh	0,012	0,15
Ir	<0,0001	0,0084
Os	<0,0001	0,00025
Re	0,009	0,34

Примечание. Pd ниже 0,0006 г/т.

Полученные данные свидетельствуют о накоплении в водных вытяжках платиноидов и рения, которые не образуют собственных минеральных фаз. Для золота и серебра преимущественным распространением в хвостах пользуются микроминеральные формы. Содержания этих элементов в пробах хвостов выше, чем их содержания в нанофракции. Для платиноидов и рения характерно накопление в нанофракции. Причем коэффициент накопления рения в нанофракции, рассчитанный по формуле  $KН = \text{содержание в нанофракции} / \text{содержание в пробе}$ , может достигать 10. Анализ распределения его

водорастворимых форм по разрезу показал, что рений концентрируется в нанофракции на глубине 60 см от поверхности хвостов. Полученные данные свидетельствуют о постепенном вымывании благородных металлов и рения из алевритов хвостохранилища, что приведет со временем к разубоживанию хвостов или их полной потере. В результате физико-химических процессов происходит дифференциация вещества в объеме хвостохранилища. Рудные минералы при этом растворяются, ионы тяжелых металлов закрепляются с помощью адсорбции на глинистом материале либо образуют собственные минералы. Далее связанные и закрепленные элементы вновь вовлекаются в миграционные потоки, могут вымываться из хвостов. В результате многократного переотложения в объеме хвостохранилищ могут формироваться зоны выноса и зоны скопления полезных компонентов. Учитывая тот факт, что алевриты хвостов представляют собой дешевый продукт, прошедший предварительное измельчение, отходы горно-обогатительного комбината можно рассматривать в качестве удобного и рентабельного сырья для вторичной переработки.

Проведенный анализ проб хвостов с полным разложением и ИСП МС окончательно показал наличие высоких содержаний в них токсичных элементов, превышающих кларк осадочных пород: Cu, As, Cd, Se – более 100 раз; Pb, Zn, Sb, Mo – от 20 до 80 раз; U, Tl, Co, Ni – от 2 до 15 раз (табл. 2). Высокие содержания токсикантов (до 1 000 г/т), а в ряде случаев до 12%, соответствуют уровню рудных концентраций.

Анализ содержаний этих элементов в водном растворе нанофракции показал, что в пробах хвостов содержится значительная доля водорастворимых форм химических элементов (табл. 2). Следует отметить в целом высокий уровень содержаний токсикантов в ви-

де водорастворимых форм в алевритах хвостохранилища. Для многих элементов наблюдается обогащение водной вытяжки по сравнению с пробой алеврита (Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Se, U). Для Zn и Cd водорастворимая форма преобладает над минеральной формой во всех проанализированных пробах; средний коэффициент накопления составил 2,9 и 3,5 соответственно.

Таблица 2  
Содержание химических элементов в пробах хвостов и в водных растворах их нанофракций, г/т

Элемент	Содержание в пробе			Содержание в нанофракции		
	от	до	среднее	среднее	от	до
Cu	569	12217	4873	2051	3,7	19570
Zn	442	10810	3448	9906	64	35840
Pb	248	668	441	193	0,01	2300
As	120	558	278	7,2	0,8	22
Cd	1,4	36	12	42	1,5	170
Sb	17	56	34	1,1	0,09	8,2
Mo	46	73	58	3,3	0,01	31
Co	20	83	51	41	3,7	163
Ni	19	102	36	29	9,3	86
U	0,8	3,4	2,2	1,6	0,05	7,6
Tl	3,3	8,3	5,2	0,5	0,08	3,1
Se	8,7	17	12	8,1	1,8	30

Учитывая вышеперечисленное, можно сделать выводы: 1) хвосты горно-обогатительного производства медно-колчеданного месторождения можно рассматривать в качестве источника доизвлечения полезных компонентов, а также в качестве перспективного источника вторичного извлечения платиноидов и рения; 2) анализ содержания и поведения водорастворимых форм химических элементов позволит оценить реальные последствия загрязнения окружающей среды в районе действующего горно-обогатительного комбината.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Домаренко В.А. Эколого-экономическая оценка месторождений (твердые полезные ископаемые) : учеб. пособие / под ред. проф. Рихванова. Томск, 2007.
2. Бабошкина С.В., Горбачев И.В., Пузанов А.В., Балыкин С.Н. Тяжелые металлы (Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Cr, Hg) в техноземах, почвах и растениях горнопромышленных ландшафтов северо-западного алтая // Ползуновский вестник. 2006. № 2. С. 269–272.
3. Панова Е.Г. Закономерности формирования природных и техногенных почвенных и биогеохимических аномалий в условиях полупустынного ландшафта // Вопросы геохимии и типоморфизм минералов. 1995. Вып. 4. С. 34–40.
4. Фондовая литература Урупского горно-обогатительного комбината.
5. Аламтиева Е.В., Панова Е.Г. Актуальные проблемы вторичной переработки и складирования отходов золотосульфидного месторождения // Геология, геоэкология и эволюционная география. 2009. Т. 9. С. 36–38.
6. Акинфиев Н.Н., Баронецкая Л.Д., Осмоловский И.С., Швец В.М. Физико-химическая модель формирования состава вод отвалов горнодобывающих предприятий // Геоэкология. 2001. № 5. С. 411–419.
7. Олейникова Г.А., Панова Е.Г. Геоинформационный ресурс анализа нанофракций горных пород // Литосфера. 2011. № 1. С. 83–93.
8. Аламтиева Е.В., Панова Е.Г. Геохимическая характеристика отходов горно-обогатительного производства на медноколчеданном месторождении // Геология, геоэкология и эволюционная география. 2011. Т. 11. С. 176–180.
9. Аламтиева Е.В., Панова Е.Г., Янсон С.Ю. Оценка экологического состояния техногенного месторождения, входящего в состав Урупского горно-обогатительного комбината // Геология, геоэкология и эволюционная география. 2010. Т. 10. С. 99–102.
10. Барабанов В.Ф. Геохимия. Л. : Недра, 1985. 423 с.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 9 октября 2013 г.