

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД В ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНАХ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Н.И. Грехнев, И.Ю. Рассказов

ФГБУН Институт горного дела ДВО РАН, ул. Тургенева 51, г. Хабаровск, 680000;
e-mail: adm@igd.khv.ru, grh@igd.khv.ru

Поступила в редакцию 22 апреля 2015 г.

Рассмотрены важнейшие реакции окисления гипогенных сульфидов в горнопромышленных районах юга Дальнего Востока накопленных в виде хвостохранилищ при разработке рудных месторождений в поверхностной зоне земной коры, приводящие к преобразованию их в группы сульфатных минералов, обладающих высокой растворимостью и за счет этого подвижностью в областях летних муссонов в южных приокеанических территориях. Основными агентами гумидного техногенеза рассматриваются дождевые осадки, обогащенные кислородом, сульфат- и нитрат-ионами, углекислотой и другими газами, которые генерируют химические процессы окисления и преобразования первичных сульфидов в окисленные группы высоко растворимых сульфатных минералов. Образующаяся при реакциях окисления серная кислота активно участвует в преобразовании и разрушении структуры гипогенных минералов других классов.

Ключевые слова: геохимическая трансформация, химическое загрязнение, токсичные элементы, окружающая среда, кислотная обстановка, гумидный гипергенез, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное освоение Дальневосточного региона, продолжающееся уже почти 200 лет, первоначально было связано с разработкой россыпных месторождений благородных металлов, а позднее – прочих полезных ископаемых. Минерально-сырьевой потенциал реализовывался преимущественно за счет разработки металлических коренных (олово, свинец, цинк, вольфрам, серебро и др.) и россыпных (золото, серебро, платина) месторождений, некоторых видов горно-химического сырья (флюорит, боросиликаты), энергетических ресурсов (каменные и бурые угли) и строительных материалов. В конце XX столетия в регионе работало свыше десятка крупных горно-обогатительных комбинатов (ГОКов), сотни предприятий по разработке золотороссыпных месторождений, различных видов сырья и строительных материалов [1]. В последнее время интерес горняков сместился на добычу золота и других благородных металлов (Au, Ag, Pt) и резко снизился интерес к цветным металлам.

В результате широкого и интенсивного развития горных работ в Дальневосточном регионе накопились огромные объемы хвостов обогащения и других отвальных минеральных отходов, большинство из которых содержат в промышленных концентраци-

ях многие ценные металлы и могут рассматриваться как крупные комплексные техногенные месторождения [11]. Однако планы промышленной разработки этих месторождений могут рассматриваться лишь в отдаленной перспективе, т. к. требуют применения новых прогрессивных технологий извлечения металлов и крупных финансовых вложений. В настоящее время хвостохранилища представляют собой наиболее опасные и долгосрочные источники химического загрязнения окружающей природной среды высокотоксичными элементами, многие из которых относятся к 1-му и 2-му классам опасности (ГОСТ 17.41.01–83).

Исследования поверхностных хвостохранилищ и происходящих в них химических процессов имеют важное научно-практическое значение для охраны экосистем поверхностных водных бассейнов и окружающей среды горнопромышленных районов. Для этого в изучение был вовлечен ряд объектов (табл. 1). Основное внимание уделялось изучению минералогического и химического состава непосредственно материала самих хвостохранилищ, концентрации дренажных вод, вытекающих из них. В опробование были вовлечены также гидрохимические и литохимические потоки поверхностных водотоков, дренирую-

Таблица 1. Расположение наиболее крупных хвостохранилищ в южной части Дальневосточного региона.

| Горнопромышленные районы (ГПР) и ГОКи | Количество хвостохранилищ в ГПР | Площадь хвостохранилищ, (га) | Объемы песков в хвостохранилищах (млн т) | Приоритетные химические загрязнители |
|--|---------------------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| Вознесенский ГПР, Ярославский ГОК, Приморский край | 3 | > 100 | 55.6 | F, Li, Rb, Sr, Zn |
| Кавалеровский ГПР, Хрустальненский ГОК, Приморский край | 6 | > 200 | 48.3 | Pb, Zn, As, Cu, Sb |
| Дальнегорский ГПР, ОАО «ГМК«Дальполиметалл», Приморский край | 5 | >100 | > 100 | Pb, Zn, Ag, As, Cd, Bi |
| ОАО «Бор», Приморский край | 2 | 100 | 150 | B, Pb, Zn |
| Лермонтовская ГРК, Приморский край | 1 | 9.2 | > 15 | Cu, Pb, Mn, S |
| «Приморский» ГОК, Приморский край | 1 | 40 | 10.3 | Fe, As, S |
| Солнечный ГПР, Солнечный ГОК, Хабаровский край | 3 | 180 | 36.0 | Cu, Pb, Cd, Zn, As, Sb, Mn |
| Хинганский ГПР, Комбинат «Хинганолово», ЕАО | 1 (2) | 50 | 3.95 | F, Mn, Zn, редкие земли |
| Ниже-Амурский ГПР, Многовершинный ГОК, Хабаровский край | 1 | 50 | 25 | Цианиды, роданиды, Ag, Zn, Co |
| Покровский ГОК, Амурская область | 1 | 50 | > 50.0 | Cu, Zn, Ag |
| Всего: | 25 | 940 | > 500 | |

щих рудные районы (вода, донные илы, взвеси и водная растительность [5–9]).

ГУМИДНЫЙ ГИПЕРГЕНЕЗ И ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ИМ ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОТВАЛАХ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Известно, что подавляющее большинство рудных месторождений Тихоокеанского пояса относится к сульфидной рудной формации, поэтому в рудах, а особенно в измельченных отходах их переработки, значительный процент составляют сульфидные, часто рудоносные минералы, которые в составе руд различных месторождений составляют от 10 до 40 %. Тела хвостохранилищ, сформированные в зоне гипергенеза с ярко выраженным муссонным климатом, подвержены интенсивному окислению, благодаря обильным летним дождям (более 800 мм в год), которые насыщены растворенными в них кислородом, углекислотой и другими газами, и выступают в качестве основных агентов окисления сульфидных минералов. Образующиеся водные сульфаты являются промежуточным продуктом преобразования сульфидов в зоне гипергенеза, они затем преобразуются в карбонаты, оксиды и гидроксиды. Отличительной особенностью водных сульфатов является их высокая растворимость и устойчивость в ионных растворах, что обеспечивает им высокую подвижность катионных металлов, которые в сульфатной форме приобретают высокую токсичность.

Широкое площадное распространение хвостохранилищ с сульфидными отходами в Дальневосточном регионе (рис., табл. 1) является наиболее опасной и длительной угрозой химического загрязнения экосистем в горнопромышленных районах токсичными элементами 1 и 2-го класса опасности. [1, 4, 5]. Химическому загрязнению подвергаются, прежде всего, поверхностные водные бассейны, включая их донные осадки, горизонты промышленных подземных вод и акваландшафты речных долин, используемые, как правило, для расположения горняцких поселений.

Расположение хвостов обогащения в поверхностных условиях обеспечивает легкую доступность основным агентам гумидного гипергенеза в тела хвостохранилищ, при этом вовлекается в реакции окисления их сульфидная части с преобразованием окисленных сульфидов во вторичные сульфатные минералы. Вновь образованные сульфаты, выщелачиваясь дождевыми водами, приобретают высокую подвижность и легко вовлекаются в реакции базовых элементов экосистем. Реакция окисления сульфидов сопровождается образованием серной кислоты и гидроксидов железа, которые сами по себе являются активными окислителями, особенно в лежалых хвостохранилищах ранее функционировавших горных предприятий (АО «ГМК» Дальполиметалл), Солнечный, Вознесенский и другие ГОКи).

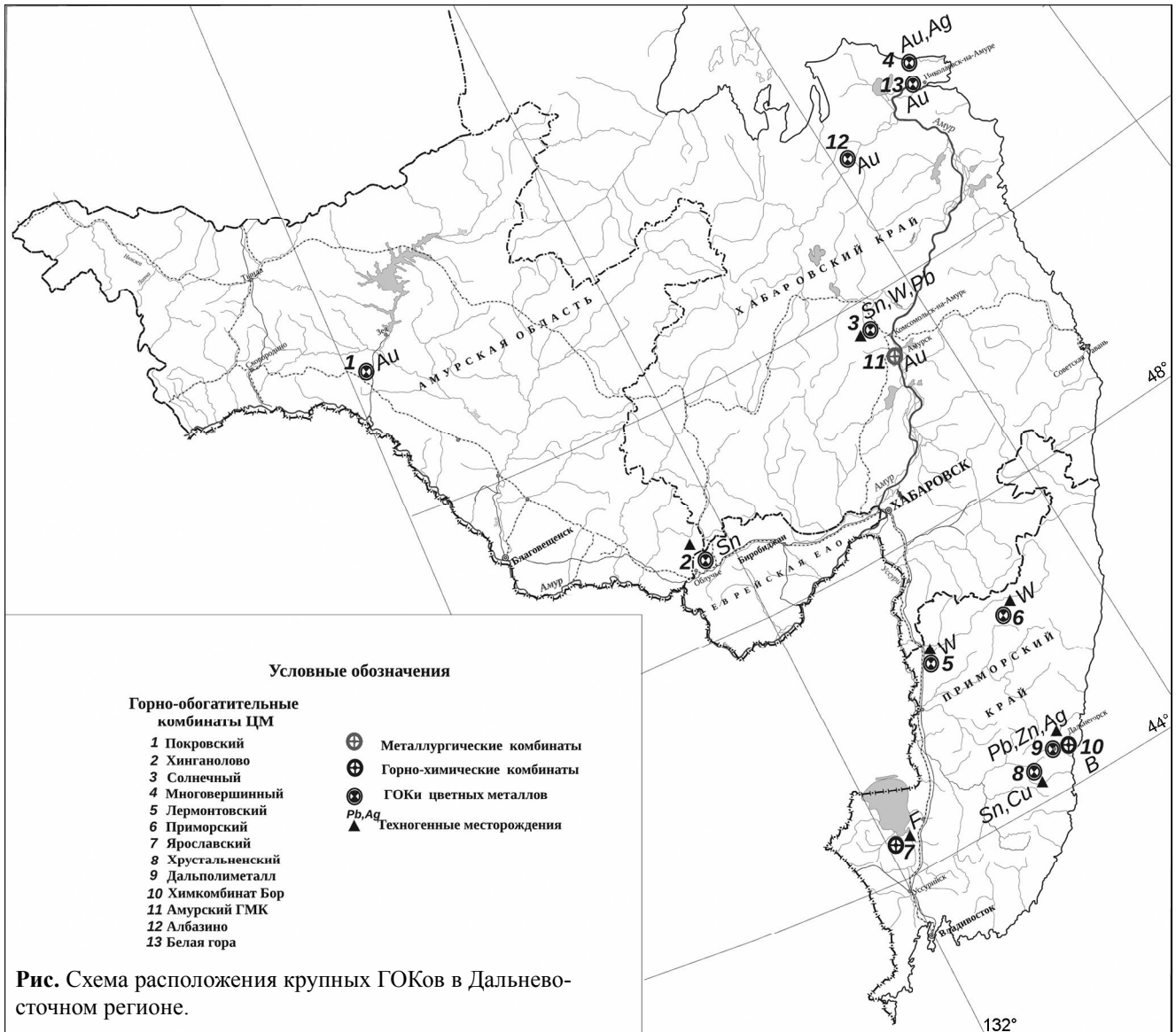


Рис. Схема расположения крупных ГОКов в Дальневосточном регионе.

СПЕЦИФИКА ГОРНОГО ГИПЕРГЕНЕЗА В МИНЕРАЛЬНЫХ ОТХОДАХ СУЛЬФИДНЫХ РУД

Образование месторождений сульфидных формаций происходит в восстановительной среде, при дефиците кислорода и избытке свободного сероводорода (H_2S). Оказываясь в зоне гипергенеза с избытком кислорода и других газов, растворенных в дождевой воде, сульфиды, окисляясь, преобразуются в неустойчивые в поверхностных условиях минералы: сульфаты, карбонаты и оксиды (гидроксиды). Реакции окисления являются экзотермическими с выделением значительного количества тепла, поэтому проходят очень активно. Отмечается, что в зонах окисления сульфидных руд температура может достигать $300^{\circ}C$ и выше с обильным выделением удушливых газов (SO_2 , SO_3 , H_2S) и паров воды [5]. Естественно, что к такой обста-

новке биосфера не успевает приспособиться и погибает или перестраивается.

Сульфатная стадия минералов, судя по величине растворимости (табл. 2), является стадией активной миграции в растворенной форме, которая активно поддерживается кислой реакцией среды и снижается с понижением кислотности. Однако не все сульфаты обладают одинаково высокой растворимостью и, следовательно, ведут себя в водных растворах различно. Весьма показательно разделение, по сравнению с рудными телами, в аномальных водных потоках свинца и цинка, вольфрама и серебра, железа и меди, обладающих, как правило, различной растворимостью их сульфатов. Так при окислении халькопирита ($FeCuS_4$) образующийся сульфат меди халькантит ($CuSO_4$) хорошо растворим в воде и устойчив в ионных растворах,

Таблица 2. Вероятные преобразования сульфидных минералов в зоне гипергенеза (с использованием материалов В.П. Зверевой, Л.К. Яхонтовой [9, 15]).

| Первичный сульфид | Процессы гипергенеза в кислотных средах | | | |
|-------------------|--|--|---|---|
| | Вероятные реакции | Агенты влияния | Продукты реакций | Растворимость сульфатов |
| Пирит Пирротин | $2\text{FeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 = 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$ $2\text{Fe}_7\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 31\text{O}_2 = 7\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$ | H_2O , O_2 , H_2SO_4 | Мелантерит – $\text{Fe}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | Мелантерит – растворим |
| Халькопирит | $2\text{CuFeS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 = 2\text{CuSO}_4 + 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2$ | H_2O , O_2 | Мелантерит – $\text{Fe}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ Халькантит – $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ | Мелантерит – растворим, Халькантит – растворим |
| Арсенопирит | $2\text{FeAsS} + 2\text{H}_2\text{O} + 7\text{O}_2 = 2\text{FeAsO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ | H_2O , O_2 , H_2SO_4 | Скородит – $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | Скородит – растворяется в кислотах |
| Сфалерит | $2\text{ZnS} + 2\text{H}_2\text{O} + 15\text{O} + 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 = 2\text{ZnSO}_3 + 4\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$ | H_2O , O_2 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ | Госларит – ZnSO_3 , Мелантерит. – $\text{Fe}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | Госларит – растворим |
| Галенит | $\text{PbS} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$, $\text{PbS} + \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{PbO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4 + 6\text{H}_2\text{SO}_4$ | H_2O , O_2 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, H_2SO_4 | Англезит – PbSO_4 , Плюмбоарюзит – $\text{PbO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4$ | Англезит – растворим, Плюмбоарюзит – растворим |
| Буланжерит | $(\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}) + 2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 = \text{PbSO}_4 \cdot \text{Sb}(\text{SO}_3)(\text{OH}) + \text{H}_2\text{SO}_4$ | H_2O , O_2 , H_2SO_4 | $\text{Fe}_2(\text{SO}_4) - \text{Fe}(\text{OH})_2$ | Сурьмяные охры – труднорастворимы |

тогда как сульфат железа легко гидролизуется с образованием железистого гидроксида $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (табл. 2).

В конечную стадию дальнейшего преобразования сульфатов (на примере отвалов Солнечного ГОКа) происходит образование большого количества гидроксидов с 3-х валентным железом, отлагающихся в виде ноздреватых агрегатов или метаморфоз по первичным минералам. В промежуточных стадиях образуются многочисленные сульфаты железа (мелантерит – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, феррагексагидрит – $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, роценит – FeSO_4 и др., магнезия и кальция (эпсомит и гипс), полиметаллов (англезит – PbSO_4), госларит (ZnSO_3), плюмбоарюзит ($\text{PbO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4$), которые через какое-то время преобразуются в карбонаты и оксиды (гидроксиды). Однако только в группе сульфатов отмечается такая высокая растворимость (табл. 2), которая значительно повышает токсичность металлических катионов вновь образованных соединений, в результате чего повышается их экологическая опасность для окружающей природной среды, особенно биосферы. Тем не менее, некоторые сульфаты, такие как англезит, относятся к труднорастворимым минералам, а их карбонатная форма (церуссит) отличается еще меньшей растворимостью [4, 5]. Поэтому присутствие свинца в аномальных значениях в донных осадках р. Силинки (Солнечный ГПП) не вписывается в

концепцию их слабой растворимости. Можно полагать, что широкому распространению свинца в донных илах способствуют комплексные химические образования, типа плюмбоарюзита – $\text{PbO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [9, 15].

В числе важных факторов, влияющих на ход реакции окисления сульфидов, С.С. Смирновым рассматриваются климатические условия и геологическая структура рудного поля [12]. Действительно, климатические особенности с летними муссонными дождями, насыщенными кислородом и другими газами, обладают высокими окисляющими свойствами и, просачиваясь в зону окисления, расходуют кислород на окисление гипогенных сульфидов, в т. ч. рудоносных, и насыщаются растворимыми солями, которые затем с дренажными потоками выходят в поверхностные водооток или подземные водные горизонты.

При окислении сульфидов и преобразовании их в сульфатные группы минералов происходит потеря энергии кристаллической решетки, снижается поляризуемость ионов, значительно увеличивается растворимость и выщелачиваемость сульфатов. Высокая растворимость сульфатов позволяет относить каждое сульфидсодержащее хранилище отходов к источнику загрязнения окружающей среды и в целом экосистем. Последнее обстоятельство имеет весьма важное значение для оценки и характеристики источников

химического загрязнения экосистем, поскольку растворимость сульфидов, как и большинства первичных рудных минералов, составляет лишь миллионные доли грамм-молекул [12], а растворимость сульфатов достаточно высока (табл. 2), то перевод первой категории минералов во вторую значительно повышает геохимическое загрязнение окружающей среды токсичными элементами.

Согласно исследованиям Э.Ф. Емлина (1991) на Уральских колчеданных месторождениях, зона техногенеза подразделяется на верхнюю, кислородную подзону (зону кислородного окисления и выщелачивания) глубиной 30–35 м, и нижнюю — вторичного сульфидного обогащения, мощностью 20–25 м. В верхней подзоне происходит выщелачивание меди и других металлов (до 80 %), в нижней — в основном их осаждение за счет привноса металлоносных растворов из верхней подзоны и смены кислотной обстановки на слабощелочную. Граница этих подзон проходит на глубине 30–35 м и отделяет верхнюю кислородную обстановку от нижней — сернокислотной. В верхней происходит накопление гидроксидов железа и марганца, а в подзоне обогащения мобилизуются халькофильные и литофильные элементы. Таким образом, кислородная граница служит нижним уровнем окисления только там, где нет дополнительных источников кислот. При встрече концентрированных кислых вод, несущих растворенные металлы, с сероводородными происходит образование вторичных сульфидов, что приводит к вторичной концентрации металлов на месторождении. В областях дальневосточных муссонов, особенно в горных районах, параметры зоны гипергенеза будут изменяться, однако химические процессы выщелачивания и накопления будут оставаться такими же.

Структура рудного поля, как и минералогический состав хвостов обогащения, существенно влияет на характер и интенсивность окисления сульфидов. Наличие известково-карбонатных пород в геологическом строении рудных полей, с одной стороны, ускоряет инфильтрацию атмосферных осадков, что должно бы влиять на интенсивное окисление сульфидов, однако напротив, это ускоряет процесс их перевода в карбонаты, а затем в оксиды. Это хорошо подтверждается в сопоставлении спектра окисленных минералов по хвостохранилищам Краснореченского ГОКа и ОАО «ГМК «Дальполиметалл» [13].

Минеральный и фазовый состав свинца и цинка в старых и новых хвостохранилищах Краснореченского ГОКа и ОАО «ГМК «Дальполиметалл», рассчитанные по фактическим данным [13], приведены в статье [11]. Различия между старыми и новыми хвостохра-

нилищами Краснореченского ГОКа представлены разными физико-химическими параметрами по pH и Eh: старое хвостохранилище имеет кислую реакцию среды (pH = 1.86–2.0), в то время как новое — кислую и слабощелочную (pH = от 6.5 до 8.0). В хвостохранилищах Дальполиметалла среда остается щелочной (pH = 10.16–11.9) как в старых, так и в новых хвостохранилищах, что обусловлено наличием известковых толщ в геологическом строении рудных полей и широким развитием жильного кальциевого комплекса, в то время как краснореченские руды представлены преимущественно силикатным составом.

Исследованием минералогического и фазового состава свинца и цинка в хвостохранилищах Краснореченского ГОКа и ОАО «ГМК «Дальполиметалл» занимались Тарасенко И.А. и др. [13], основные выводы которых сводятся к следующему:

1. Снижение содержаний сульфидных и рост сульфатных минеральных форм в старых хвостохранилищах по сравнению с новыми особенно показательно для хвостов обогащения Краснореченского ГОКа.

2. Соотношение между окисленной и сульфидной фазами серы свидетельствует о преобладании в новых хвостохранилищах Краснореченской обогатительной фабрики (КОФ) руд сульфидного состава над окисленными, тогда как для старых хвостохранилищ характерно значительное превышение окисленной фазы серы.

3. Различие между старыми и новыми хвостохранилищами КОФ выражается в том, что в новых хвостохранилищах отмечается более низкая степень минеральных преобразований по сравнению со старыми.

Основываясь на минералогических исследованиях, проведенных при объемном изучении хвостохранилищ ОАО «ГМК «Дальполиметалл» и Краснореченского ГОКа, можно полагать, что процесс перевода сульфидных минералов в окисленные формы будет продолжаться достаточно долго (150–200 лет). Следовательно, все это время хвостохранилища, помимо геологического интереса, представляют социальные и экологические проблемы как активные источники химического загрязнения базовых компонентов окружающей среды [14].

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С РЕАКЦИЯМИ ОКИСЛЕНИЯ СУЛЬФИДОВ В ЗОНЕ ГИПЕРГЕНЕЗА

Воздействующие на окружающую среду гипергенные и эколого-геохимические факторы, связанные с окислением минеральных отходов горного произ-

водства, приводят к физико-механическому нарушению структуры и целостности геологической среды, образованию провалов, сдвигов и мульдообразных проседаний в земной поверхности, образованию депрессионных гидрогеологических воронок, иссушению почвенно-грунтового покрова, изменению уровня подземных вод и нарушению водоснабжения в селитебных районах, а также к выдавливанию на поверхность метана и других газов в угледобывающих районах, что часто приводит к катастрофическим последствиям. Однако наиболее вредным, охватывающим значительные территории, является не столько техногенная деформация, сколько химическое загрязнение природной среды, оказывающее вредное воздействие на живые организмы и человека в большинстве горно-промышленных районов [2–6, 13, 14].

Под влиянием климатических особенностей Дальневосточного региона с обилием летних атмосферных осадков (годовое количество около 850–1000 мм) и резко выраженных окислительных процессов в поверхностной зоне происходит трансформация гипогенных рудных сульфидов во вторичные минеральные формы с высокой растворимостью катионных металлов сульфатных минералов с последующим их выщелачиванием и выносом дренажными растворами из хвостохранилищ в поверхностные водотоки, подземные водные горизонты и аквальные ландшафты речных долин.

Исследованиями П.В. Елпатьевского [1995, 1998] и В.С. Аржановой с соавторами [1995] показано, что сточные воды хвостохранилищ Дальнегорского района вдвое увеличивают суммарную минерализацию вод р. Рудной относительно фоновых показателей, насыщая дренирующие их реки свинцом, цинком, магнием, кадмием, железом, алюминием и др. Также отмечается, что в типично кислой среде большинство металлов выщелачивается из отвалов горных выработок в виде насыщенных растворов, которые беспрепятственно поступают в поверхностную гидросеть [6].

Приводимые табличные сведения в [11] показывают высокую окислительную способность дренажных вод (рН от 3.05 до 4.50) и аномально высокое содержание сульфат-иона, который при химической реакции в водонасыщенной среде образует агрессивные сернокислотные растворы, способные преобразовывать многие рудные сульфиды, выщелачивать катионы, которые и выносятся в поверхностные водные системы. На примере Ново-Монастырского (Приморский край) и Солнечного (Хабаровский край) месторождений выщелачиваемые металлы характеризуются высокой аномальностью (Cu, Zn, As, Cd, Fe, Al), а в отвалах Фестивального месторождения

дополнительно – мышьяка. Дренажные растворы из отвалов этих месторождений по концентрациям в них отдельных металлов могут рассматриваться как рудные растворы для получения меди, кадмия, цинка, мышьяка и других элементов [6, 9, 13]. Поэтому обилие сульфидов в рудах и рудовмещающих породах и формирующаяся на этой основе высокая кислотность в зоне гипергенеза являются главными факторами растворения и выноса химических токсикантов из хвостов обогащения в окружающую среду. При этом дренажные подотвальные воды обладают даже более высокой кислотностью и солевой концентрацией по сравнению с шахтными стоками, поскольку разработка рудных блоков на большинстве месторождений производится значительно ниже зоны гипергенеза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве основных источников химического загрязнения окружающей природной среды в старых горнопромышленных районах выступают отходы обогащательных фабрик, которые накапливаются в крупных хвостохранилищах, зачастую расположенных в днищах речных долин, и представляют собой долговременные и мощные источники химического загрязнения поверхностных водотоков, подземных вод и долинных ландшафтов. Измельченные до песчаной фракции сульфидные минералы в гумидных условиях окисляются с образованием вторичных сульфатов и, таким образом, трансформируются в легко растворимые минеральные соли.

Время перевода сульфидных минералов в окисленные устойчивые формы оценивается продолжительностью в среднем до 150–200 лет, следовательно, все это время хвостохранилища будут представлять собой активные источники химического загрязнения окружающей среды. Период же полужизни токсикантов из почвенно-грунтового покрова, или удаления половины от начальной концентрации, оценивается продолжительным временем: для цинка – от 70 до 510 лет, для кадмия – от 13 до 110, для меди – от 310 до 1500 и для свинца – от 740 до 5900 лет [14].

Рекультивацию хвостохранилищ, особенно с существенно сульфидным минеральным составом хвостов обогащения, широко распространенных в Дальневосточном регионе, рекомендуется проводить путем их консервации, направленной на ограничение поступления дождевых вод в тела хвостохранилищ, чтобы исключить или замедлить химические реакции по окислению первичных сульфидов и образованию сульфатных минеральных форм. Замедление химических реакций позволяет также сохранять на более длительный срок запасы ценных рудных металлов в техногенных месторождениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанова В.С., Елпатьевский П.В. Геохимия ландшафтов и техногенез. М.: Наука, 1990. 194 с.
2. Грехнев Н.И., Жовинский Э.Я. Геохимия техногенеза Дальнегорского горнопромышленного района южного Приморья России // *Мінерал. журн. (Україна)*. 2009. Т. 31, № 4. С. 77–82.
3. Грехнев Н.И., Рассказов И.Ю. Техногенные месторождения в минеральных отходах Дальневосточного региона как новый источник минерального сырья // *Горн. информ.-аналит. бюл. ОВ «Дальний Восток-1»*. 2009. № 4. С. 38–46.
4. Грехнев Н.И., Усиков В.И. Региональные экономические и экологические проблемы, связанные с минеральными отходами горных производств // *Регион. проблемы*. 2011. Т. 14, № 1. С. 38–46.
5. Грехнев Н.И. Геохимическая трансформация гипогенных минералов в хвостохранилищах юга Дальнего Востока // *Пошукова та Екологічна геоімія*. 2011. № 1 (11). Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН Україна, Київ, 2011. С. 17–19.
6. Грехнев Н.И., Липина Л.Н. Особенности геомеханических реакций окисления в зоне гипергенеза в климатических условиях юга Дальнего Востока // *Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых*. 2014. № 4. С. 183–189.
7. Елпатьевский П.В. Металлоносность вод горнопромышленного техногенеза // *Добыча золота. Проблемы и перспективы*. Хабаровск, 1997. Т. II.
8. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1991. 256 с.
9. Зверева В.П. Экологические последствия гипергенных процессов на оловорудных месторождениях Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2008. 165 с.
10. Основные проблемы изучения и добычи минерального сырья // *Минералого-сырьевой комплекс на рубеже веков*. Хабаровск: Изд-во ДВВИМСа, 1999. 160 с.
11. Рассказов И.Ю., Грехнев Н.И., Александрова Т.Н. Техногенные месторождения в отвалах горно-обогатительных комбинатов Дальневосточного региона // *Тихоокеан. геология*. 2014. Т. 33, № 1. С. 102–114.
12. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 330 с.
13. Тарасенко И.А., Зиньков А.В. Экологические последствия минералого-геохимических преобразований хвостов обогащения Sn-Ag-Pb-Zn руд (Приморье, Дальнегорский район). Владивосток: Дальнаука, 2001. 218 с.
14. Химическое загрязнение почв и их охрана. Словарь-справочник / Д.С. Орлов, М.С. Малинина, Г.В. Мотузова и др. М.: Агропромиздат, 1991. 303 с.
15. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Основы минералогии зоны гипергенеза. Владивосток: Дальнаука, 2000. 331 с.

Рекомендована к печати Б.А. Вороновым

N.I. Grekhnev, I.Yu. Rasskazov

Geochemical transformation of waste products of concentrate in applied mining regions of the southern Far East

The most important reactions of oxidation of hypogene sulphides in applied mining regions of the southern Far East have been considered when developing ore deposits in the surface area of the earth's crust, resulting in their transformation into a sulfate minerals group with high solubility and thus mobility in the areas of summer monsoon in the southern seashore areas. Basic agents of humid technogenesis are oxygen-enriched rainfall, sulfate- and nitrate ions, carbon dioxide and other gases that generate chemical conversion and oxidation and transformation of the primary sulfide group into oxidized groups of highly soluble sulfate minerals. The sulfuric acid formed during the oxidation process is actively involved in the transformation and destruction of hypogene minerals structures of other classes.

Key words: geochemical transformation, chemical pollution, toxic elements, environment, acidic environment, humid technogenesis, Far East of Russia.