

УДК 502.55:622(571.6)

*В.П. Зверева, А.В. Савченко, А.М. Костина,  
О.В. Коваль*

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ГОРНОПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОГЕННОЙ  
СИСТЕМЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОМСОМОЛЬСКОГО  
РАЙОНА НА ГИДРОСФЕРУ**

---

Оловорудная промышленность в Комсомольском районе развивается около шестидесяти лет. Ее развитие привело к появлению многочисленных канав, расчисток, карьеров, штолен и хвостохранилищ, что способствовало созданию горнопромышленной техногенной системы площадью десятки тысяч гектар. Так как при развитии горнорудной промышленности в районе санитарные нормы не были соблюдены, то жилые зоны — пос. Горный и пгт. Солнечный оказались расположены в пределах горнопромышленной техногенной системы, гипергенные процессы активизируются. Главными сульфидными минералами, которые в процессе гипергенеза интенсивно окисляются, являются сульфиды: пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, галенит, сфалерит и др. Окисление сульфидов и появление гипергенных растворов, видимо, правильнее описывают уравнения, относящиеся к условиям среды с  $\text{pH} \leq 3$  [1]. Процесс окисления сульфидов начинается в микропорах и микротрещинах, где образуются растворы с повышенной концентрацией кислых ионов, в том числе и  $\text{HSO}_4^-$ , в связи с чем первыми продуктами окисления сульфидов, скорее всего, будут комплексные катионы типа  $[\text{AHSO}_4]^+$ , где А —  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$  — в зависимости от окисляющегося минерала, и соответствующие комплексные катионы  $[\text{FeHSO}_4]^+$ ,  $[\text{FeHSO}_4]^{+2}$ ,  $[\text{CuHSO}_4]^+$ , которые в дальнейшем при разбавлении растворов могут испытывать гидролизные превращения по схеме  $[\text{AHSO}_4]^{+2} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow [\text{A}(\text{OH})\text{SO}_4]^+ + 2\text{H}^+$ . В результате в пределах горнопромышленной техногенной системы возможна кристаллизация широкого спектра гипергенных и техногенных

минералов Fe, Cu, Pb и Zn [2], главным образом класса сульфатов. Проведенные одним из авторов минералогические исследования [1, 3] позволили в рассматриваемой горнопромышленной техногенной системе установить более 80 гипергенных и техногенных минералов (табл. 1).

Большая часть обнаруженных гипергенных минералов относится к классу сульфатов — это купоросы — водные сульфаты  $Fe^{2+}$  или их разновидности с изоморфной примесью Cu, Zn, Mg и Mn. Среди них в техногенной системе данного района отмечаются роценит, сидерит, мелантерит и др. К числу водных сульфатов  $Fe^{3+}$  относятся ярозит, фиброферрит и глоккерит. Большинство сульфатов являются купоросами, которые характерны для начального этапа гипергенеза. Купоросы в большинстве своем образуются исключительно как сезонные или техногенные минералы в засушливую погоду, а в период дождей могут растворяться и исчезать. Это легко растворимые в воде нормальные водные сульфаты, среди которых наиболее обычны халькантит. К числу широко распространенных сульфатов относятся также основные соли меди — антлерит и брошантит. Часто встречаются и такие редкие сульфаты меди, как познякит, ктенасит, серпиерит, вудвардит и роуволфит. Среди сульфатов свинца обнаружен только англезит. Самостоятельных сульфатов цинка не установлено. Цинк входит в состав серпиерита или изоморфно замещает медь в других сульфатах.

Техногенные сульфаты белого, желтого, коричневого и зеленого цвета разных оттенков отмечаются в виде выцветов, налетов и порошковидных корочек на стенках горных выработок, в карьерах, на рудных отвалах, на поверхности и в толще хвостов. Они могут быть как моно-, так и полиминеральными, т. е. одновременно содержать два и более минералов.

Наличие карбонатных вмещающих пород позволило раскристаллизоваться минералам Fe, Cu, Pb и Zn — сидериту, малахиту, азуриту, церусситу, смитсониту и др. (табл. 1).

Кремнистые минералы и вмещающие породы привели к образованию в техногенной системе гипергенных минералов класса силикатов, главным образом нонtronита, гизингерита и хризоколлы. Присутствие в рудах арсенопирита и его окисление способствовало образованию многих минералов  $Fe^{+3}$ , Cu и Pb класса арсенатов — оливолениту, бедантиту, клиноклазу, церулеиту, дюфтиту, байлдониту, питтициту и др.

Таблица 1  
*Гипергенные минералы оловорудных месторождений  
 Дальнего Востока*

Широко распространенные	Мало распространенные
<b>Самородные элементы и сульфиды</b>	
Медь самородная Халькозин $\text{Cu}_2\text{S}$ Ковеллин $\text{CuS}$ Борнит $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ Марказит $\text{FeS}_2$ Кермезит $\text{Sb}_2\text{S}_2\text{O}$	
<b>Оксиды и гидроксиды</b>	
Куприт $\text{Cu}_2\text{O}$ Тенорит $\text{CuO}$ Гидрогётит $\alpha\text{-FeO}\cdot\text{OH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ Гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ Лепидокрокит $\gamma\text{-FeO}\cdot\text{OH}$ Трипугиит $\text{FeSb}_2\text{O}_6$ Кварц $\text{SiO}_2$ <u>Гидрагиллит</u> $\text{Al}(\text{OH})_3$	Пирролюзит $\beta\text{MnO}_2$ Криптомелан $\text{K}(\text{Mn}^{+2}, \text{Mn}^{+4})_4\text{O}_{16}$ Голландит $\text{Ba}(\text{Mn}^{+2}, \text{Mn}^{+4})_8\text{O}_{16}$ Псиломелан $(\text{Ba}, \text{Mn}^{+2})_3\text{Mn}_8^{+4}(\text{OH})_6\text{O}_{16}$ Халькофанит $\text{ZnMn}_3\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ Бернессит $(\text{Ca}, \text{Na})\text{Mn}_7\text{O}_{14}\cdot 2,8\text{H}_2\text{O}$
<b>Сульфаты</b>	
<u>Гипс</u> $[\text{CaSO}_4]\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ <u>Халькантит</u> $\text{Cu}[\text{SO}_4]\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ <u>Ктенасит</u> $(\text{Cu}, \text{Zn})_5[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ <u>Брошантит</u> $\text{Cu}_4[\text{SO}_4](\text{OH})_6$ <u>Познякит</u> $\text{Cu}_4[\text{SO}_4](\text{OH})_6\cdot \text{H}_2\text{O}$ <u>Роуволфит</u> $\text{Cu}_4[\text{SO}_4](\text{OH})_6\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ <u>Серпиерит</u> $(\text{Cu}, \text{Zn})_5[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ <u>Вудвардит</u> $\text{Cu}_4\text{Al}_2[\text{SO}_4](\text{OH})_{12}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Ярозит $\text{KFe}_3^{+3}[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$	<u>Антлерит</u> $\text{Cu}_3[\text{SO}_4](\text{OH})_4$ <u>Англезит</u> $\text{Pb}[\text{SO}_4]$ <u>Линарит</u> $\text{PbCu}[\text{SO}_4](\text{OH})_2$ <u>Биверит</u> $\text{Pb}(\text{Cu}, \text{Fe}, \text{Al})_3[\text{SO}_4]_2(\text{OH})_6$ <u>Роченит</u> $\text{Fe}[\text{SO}_4]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ <u>Сидеротил</u> $\text{Fe}[\text{SO}_4]\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ <u>Мелантерит</u> $\text{Fe}[\text{SO}_4]\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ <u>Галотрихит</u> $\text{FeAl}_2[\text{SO}_4]\cdot 22\text{H}_2\text{O}$ <u>Пиккеренгит</u> $\text{MgAl}_2[\text{SO}_4]_4\cdot 22\text{H}_2\text{O}$ <u>Фиброферрит</u> $\text{Fe}^{+3}[\text{SO}_4](\text{OH})\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ <u>Старкеит</u> $\text{Mg}[\text{SO}_4]\cdot 4\text{H}_2\text{O}$

<u>Глоккерит</u> $\text{Fe}_4^{+3}[\text{SO}_4](\text{OH})_{10} \cdot (1-3)\text{H}_2\text{O}$	<i>Алуноген</i> $\text{Al}_2[\text{SO}_4]_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ <u>Ростит</u> $\text{Al}[\text{SO}_4](\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Плюмбоярозит $\text{PbFe}_6^{+3}[\text{SO}_4]_4(\text{OH})_{12}$
<b>Карбонаты</b>	
Малахит $\text{Cu}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_2$ Азурит $\text{Cu}_3[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_2$ Церуссит $\text{Pb}[\text{CO}_3]$ <u>Кальцит</u> $\text{Ca}[\text{CO}_3]$	Смитсонит $\text{Zn}[\text{CO}_3]$ Аурихальцит $(\text{Zn}, \text{Cu})_5[\text{CO}_3]_2(\text{OH})_6$ Сидерит $\text{Fe}[\text{CO}_3]$ Магнезит $\text{Mg}[\text{CO}_3]$ <u>Алюмогидрокальцит</u> $\text{CaAl}_2[\text{CO}_3](\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
<b>Арсенаты</b>	
Оливенит $\text{Cu}_2[\text{AsO}_4](\text{OH})$ Бедантит $\text{PbFe}_3^{+3}[\text{AsO}_4][\text{SO}_4](\text{OH})$ <u>Скородит</u> $\text{Fe}^{+3}[\text{AsO}_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<u>Церулеит</u> $\text{CuAl}_4[\text{AsO}_4]_2(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Клиноклаз $\text{Cu}_3[\text{AsO}_4](\text{OH})_3$ Байлдонит $\text{Cu}_3\text{Pb}[\text{AsO}_4]_2(\text{OH})_2$ Дюфтит $\text{CuPb}[\text{AsO}_4](\text{OH})$ <u>Лискирдит</u> $(\text{Al}, \text{Fe}^{+3})[\text{AsO}_4](\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ <u>Питтицит</u> $\text{Fe}_2^{+3}[\text{AsO}_4][\text{SO}_4](\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$ Миметезит $\text{Pb}_3[\text{AsO}_4]_3 \cdot \text{Cl}$
<b>Ванадаты</b>	
	Ванадинит $\text{Pb}[\text{VO}_4]_3 \cdot \text{Cl}$
<b>Фосфаты</b>	
Вивианит $\text{Fe}_3^{+3}[\text{PO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Псевдомалахит $\text{Cu}_5[\text{PO}_4]_2(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ <u>Эвансит</u> $\text{Al}_3[\text{PO}_4](\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ Пироморфит $\text{Pb}_5[\text{PO}_4]_3 \cdot \text{Cl}$
<b>Силикаты</b>	

Хризоколла $H_4Cu_4[Si_4O_{10}](OH)_8 \cdot nH_2O$	Каламин $Zn_4[Si_2O_7](OH)_2 \cdot H_2O$
Нонтронит $Fe_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot 2H_2O$	Глауконит (K, Ca, Na)(Al, Fe <sup>+3</sup> , Fe <sup>+2</sup> , Mn) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>
Яхонтовит (Cu, Fe <sup>+3</sup> ) <sub>2,5</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub> · 3H <sub>2</sub> O	[AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ] <sup>-</sup> · nH <sub>2</sub> O
Гидромусковит (K, H <sub>3</sub> O)Al <sub>2</sub> [AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O	Стильпноделан (K, H <sub>3</sub> O)(Fe <sup>+2</sup> , Fe <sup>+3</sup> , Mg, Al) <sub>3</sub>
<u>Аллофан</u> $m Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot pH_2O$	[Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O
	<u>Гизингерит</u> $Fe_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot nH_2O$
	Ломонтит (Ca, Na) <sub>2</sub> [AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ] <sup>-</sup> · 4H <sub>2</sub> O

*Примечание. Подчеркивание означает, что минерал чаще техногенный; жирным шрифтом выделены первые (авторские) находки в районе*

Поровые растворы, дренажные и концентрированные рудничные воды, из которых кристаллизуются вышеперечисленные минералы, выносятся круглосуточно, ничем не сдерживаемые, и попадают в поверхностные и грунтовые воды на протяжении многих десятилетий. Они выносят огромные количества широкого спектра элементов, значительно изменяя гидрохимический фон района, и ухудшают состав поверхностных и грунтовых вод, из которых в районе проводится водозабор для населения.

Сильные ветра, характерные для данного района, способствуют загрязнению атмосферы тонкодисперсным материалом хвостов обогащения, которые, попадая в почву, окисляются. Кислые почвенные растворы, обогащенные рудными элементами, способствуют их накоплению в растениях, что приводит к изменению биохимического фона района.

Наличие горнопромышленных техногенных систем и активно протекающих в них гипергенных процессов привело к тому, что Комсомольский оловорудный район по показателям загрязнения водного и воздушного бассейнов характеризуется как территория с критической и катастрофической экологической ситуацией. Поселок Горный и пгт. Солнечный находятся в данной зоне. С каждым годом границы этой зоны расширяются, а площади увеличиваются [4].

Дорогостоящие мониторинговые работы в горнорудных районах позволяют оценить экологическое состояние экосферы в

определенный промежуток времени, а также прогнозировать процессы ее загрязнения на ближайшее время. К сожалению, они не дают количественной оценки широкого спектра элементов, выносимых из горнопромышленной техногенной системы, а именно из хвостохранилищ.

Использование же современной программы «Селектор-Windows» (разработчики И.К. Карпов, К.В. Чудненко, В.А. Бычинский) компьютерного моделирования природного процесса минералообразования позволяет рассчитать объемы элементов, выносимых из хвостохранилищ и сделать прогноз на десятилетия и даже столетия. Программа «Селектор-Windows» находит глобальный минимум того или иного термодинамического потенциала, т. е. минимум функции свободной энергии Гиббса, и вычисляет на этой основе минеральный парагенезис.

Таблица 2

*Схема физико-химического моделирования экологической ситуации на хвостохранилищах*

Тип модели		Характеристика места нахождения и состояния отходов горнорудного производства – хвостов	Факторы, учитываемые при моделировании процессов гипергенеза
I модель		Хвосты после удаления рудного концентрата (в трубопроводе)	Состав шламовых вод
II модель	I вариант	Действующее хвостохранилище, закрытое полностью шламовым озером, объем хвостов возрастает	Состав шламовых, дождевых и талых вод
	II вариант	Не работающее хвостохранилище, закрытое частично шламовым озером, объем хвостов постоянный	
III модель		Осушенное хвостохранилище, объем хвостов постоянный	Состав дождевых и талых вод

При этом минимизация энергии Гиббса подразумевает как равновесие водного раствора с его компонентами и минералами, выпадающими из него, так и равновесие раствора и выпадающих из него минералов с геохимическим составом пород и руд. Все

изменения, происходящие с хвостами можно представить в виде ряда физико-химических моделей (табл. 2).

Начальный процесс изменения отходов горнорудного производства — хвостов начинается на стадии переработки руд, извлечения концентрата и сброса пульпы на хвостохранилище с помощью трубопровода. На этой стадии происходит взаимодействие руды и хвостов с реагентами, которые используются при гравитационном методе извлечения концентрата (I модель, табл. 2). В качестве реагентов в обогащительном процессе используются (г/т): серная кислота – 825, бутиловый ксантогенат – 50, флотационное масло – 15 (сосновое, которое состоит в процентах из: пинена – 40, лимонена – 40, борнилацетата – 11 и спирта – 9), жидкое стекло – 750, Ди-2-ЭГФК (ди-2-этилгексилфосфорная кислота) – 500 и изооктиловый спирт – 550. Шламные воды на начальном этапе формирования хвостохранилища состоят практически из выше перечисленных реагентов, в которые при переработке руды и извлечении рудного концентрата добавляется вода.

Таблица 3

*Схема физико-химического моделирования экологической ситуации на хвостохранилищах Комсомольского района*

Характеристика хвостохранилища и состава хвостов	Первое	Второе	Третье
Тип модели	I модель II модель I и II вариант III модель	I модель II модель I и II вариант III модель	I модель II модель I вариант
Период накопления хвостов (гг.)	1963-1997 (34)	1969-2001 (32)	2001-2008 (7)
Возраст хвостохранилища (г.)	45	39	7
Хвостохранилище закрыто шламовым озером (г.)	30	24	7
Хвостохранилище осушено (г.)	15	15	осушено частично
V хвостов (млн.т) и его S (га)	10,6 20	6,8 30,5	24,09 40,3
Минеральный состав хвостов (из расчета 100%)	Кварц – 37,5 Кварц роговиков – 41,1 Полевые шпаты – 1,84 Слюда – 0,46 Амфибол и др. – 2,3 Турмалин – 12,1 Пирит, марказит – 1,3 Пирротин – 0,89 Арсенопирит – 0,67 Халькопирит – 0,35 Сфалерит – 0,35 Галенит – 0,45 Вольфрамит – 0,4 Касситерит – 0,25 Станнин – 0,04	Кварц – 35,6 Кварц роговиков – 44,1 Полевые шпаты – 1,96 Слюда – 0,49 Амфибол и др. – 2,45 Турмалин – 10,2 Пирит, марказит – 0,9 Пирротин – 1,3 Арсенопирит – 1,3 Халькопирит – 1,17 Сфалерит – 0,15 Галенит – 0,05 Вольфрамит – 0,05 Касситерит – 0,23 Станнин – 0,05	Кварц – 36,6 Кварц роговиков – 42,7 Полевые шпаты – 1,88 Слюда – 0,47 Амфибол и др. – 2,35 Турмалин – 11,2 Пирит, марказит – 1,1 Пирротин – 1,1 Арсенопирит – 0,94 Халькопирит – 0,7 Сфалерит – 0,25 Галенит – 0,22 Вольфрамит – 0,2 Касситерит – 0,24 Станнин – 0,05



*Примечание. Содержание ороговикованной породы на хвостохранилищах (%): первое – 45,7, второе – 49, третье – 47,4.  
Состав ороговикованной породы (%): кварц – 90, полевые шпаты – 4, слюда – 1, амфибол и др. минералы (пироксен, гранат, андалузит, кордиерит и силлиманит) – 5.*

После попадания жидких хвостов в хвостохранилище происходит активное разбавление их атмосферными осадками — дождевыми и тальными водами. Пока горное предприятие работает и сбрасывает отходы в хвостохранилище оно сверху закрыто шламовым озером. В этот период хвосты находятся в жидком состоянии (I вариант II модели, табл. 2). Шламовые воды частично дренируют и уже в виде дренажных растворов попадают в поверхностные и грунтовые водные системы. При создании критической ситуации в результате прорыва дамбы шламовые озера и хвосты частично или полностью попадают в поверхностные водотоки. Аварии во всех горнорудных районах происходят достаточно часто.

После прекращения поступления пульпы в хвостохранилище и до момента высыхания шламового озера проходят десятки лет (II вариант II модели, табл. 2). Далее хвосты десятилетиями находятся в сухом виде (III модель, табл. 2) и активно пылят. Таким образом, не рекультивированные хвостохранилища будут постоянно воздействовать на экосферу. В период с прекращения поступления пульпы в хвостохранилище до исчезновения шламового озера работают совместно вторая (II вариант) и третья модели. Каждое хвостохранилище в зависимости от продолжительности работы горного предприятия в районе и его возраста проходит все три стадии с различной длительностью (табл. 2).

В горнопромышленном районе Солнечного ГОКа накоплено три хвостохранилища, для каждого из которых приводятся этапы моделирования (табл. 3).

В таблице указывается возраст хвостохранилищ, занимаемая площадь, объем накопленных хвостов и их минеральный состав в процентном соотношении. Следует отметить, что при создании физико-химических моделей учитываются и климатические факторы: годовое количество осадков (570 мм), что составляет  $0,15 \cdot 10^9$  кг воды на 1 га, средняя скорость ветра – 5-10 м/сек, температура воздуха, которая посезонно изменяется от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  и давление - 1 атм.

Проведенное физико-химическое моделирование, с помощью программы «Селектор-Windows», позволило рассчитать максимально возможные концентрации Cu, Pb, Zn и других элементов, выносимые из хвостохранилищ горнопромышленного района и попадающие в гидросферу в результате процессов гипергенеза, а также сделать прогноз на будущие столетия.

*Работа выполнена при поддержке ДВО РАН, проекты № 09-2-СО-08-008 и № 09-III-B-08-454.*

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Постникова, В.П.* Минералогия зоны гипергенеза оловорудных месторождений Комсомольского района / В.П. Постникова, Л.К. Яхонтова. - Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1984. – 122 с.
2. *Яхонтова, Л.К.* Минералы зоны гипергенеза / Л.К. Яхонтова, В.П. Зверева. - Владивосток: Дальнаука, 2007. - 164 с.
3. *Зверева, В.П.* Экологические последствия гипергенных процессов на оловорудных месторождениях Дальнего Востока. - Владивосток: Дальнаука, 2008. - 166 с.
4. *Мирзеханова, З.Г.* Тенденция изменения геоэкологической обстановки в Хабаровском крае / З.Г. Мирзеханова, И.Д. Дебелая, В.А. Булгаков // География и природные ресурсы. - 2003. - № 1. - С. 93-99. **ГИАБ**

#### **Коротко об авторах**

*Зверева В.П.* – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник,

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, [zvereva@fegi.ru](mailto:zvereva@fegi.ru).

*Савченко А.В.* – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии ДВО РАН, г. Владивосток, <mailto:alsav@poi.dvo.ru>.

*Костина А.М.* - аспирантка, Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток.

*Коваль О.В.* - аспирантка, Дальневосточный государственный университет, г. Владивосток.

