УДК 504.064.36: 550.4+ 622*17 (571.6)

Л.Н. Липина, Т.Н. Александрова

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ РАЙОНЕ ЮГА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к изменению основных физико-химических свойств литосферы, в том числе ее экологических функций — геодинамической, геофизической, ресурсной и геохимической. Изучение параметров геохимической функции литосферы и их изменения в процессе разработки месторождения является одной из целевых задач эколого-геохимической оценки. Основным объектом исследования представлено одно из предприятий по переработке рудного золота Хабаровского края. Анализ данных мониторинговых наблюдений позволил выявить основные источники воздействия горнопромышленного комбината. На динамику процессов гипергенеза в «хвостах» обогащения существенное влияние оказывают гранулометрический состав: тонкодисперсные материалы заметно обогащены тяжелыми металлами по сравнению с грубым материалом. Анализ гранулометрического состава «хвостов» с использованием лазерного анализатора частиц (Анализетте–22) показал преобладание мелкодисперсной фракции, что благоприятствует происходящим геохимическим реакциям. В составе «хвостов» обогащения находятся мелантерит, ярозит, гипс — минералы, соли серной кислоты, что свидетельствует об окислении сульфидов и переводе их в сульфатные группы. Растворимость сульфатов достаточно высока, то перевод первой категории минералов во вторую значительно повышает геохимическое загрязнение окружающей среды токсичными элементами. Наиболее радикальным решением проблемы предотвращения загрязнения окружающей среды, является необходимость во внедрении наилучших доступных технологий в части складирования хвостов обогащения.

Ключевые слова: окружающая среда, месторождения, горнопромышленный комбинат, экологические проблемы, мониторинг, хвосты обогащения.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-64-70

Проблема загрязнения окружающей среды особо остро обстоит для регионов, основой экономики которых является деятельность предприятий по добыче и переработке минерального сырья. Хабаровский край является одним из ведущих регионов России по добыче золота. В 2016 г. в крае добыто 20,4 т золота, из них 16,7 т из рудного золота, 3,7 т из россыпного [1].

Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к изменению основных физико-химических свойств литосферы, в том числе ее экологических функций — геодинамической, геофизической, ресурсной и геохимической [2, 3].

Изучение параметров геохимической функции литосферы и их изменения в процессе разработки месторождения является одной из целевых задач эколого-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 7. С. 64–70.
© Л.Н. Липина, Т.Н. Александрова. 2017.

геохимической оценки их потенциальной или реальной опасности.

Геохимическая среда рассматривается многими учеными в качестве важнейшего экологического фактора. Для современного развития биосферы характерно постоянное возрастание роли антропегенеза в формировании миграционных потоков химических элементов [4, 5] и др.

Основным объектом исследования представлено одно из предприятий по переработке рудного золота Хабаровского края. Многовершинное рудное поле расположено в пределах Ульской вулкано-плутонической структуры у северного окончания Восточно Сихотэ-Алинского вулканического пояса. Месторождение относится к золото-адуляр-халцедон-кварцевой или убогосульфидной формации, золото-галенит-сфалерит-халькопиритовому минеральному типу.

К главным минералам относятся: кварц, пирит, сфалерит, халькопирит, галенит; к второстепенным: гидрослюды, мусковит, адуляр, хлорит, карбонаты и др. жильные минералы, а также пирротин, тетраэдрит, золото, и др. рудные минералы [6]. В табл. 1 показаны результаты изученности проб месторождения «Многовершинное».

В экологическом отношении рудные месторождения и их первичные ореолы представляют собой природные очаги химического загрязнения среды тяжелыми металлами, а возникающие при промышленном освоении продукты техногенеза формируют химически опасные ореолы и потоки рассеивания, негативно влияющие на экологическое состояние экосистем. В результате геохимической миграции может происходить как рассеяние химических элементов, так и их концентрирование. Как известно, что накапливающие загрязняющие вещества (почвы, растительный покров, снеговой покров, донные отложения) являются депонирующими средами, перемещение

Таблица 1

Геохимические признаки для сопоставительного анализа экологичности изученных проб месторождения «Многовершинное» [6]

Фактор сравнения	Рудное тело				
	Оленье	Фланговое	Северное	Ценральное	Верхнее
По вещественному составу					
Пирит, %	1,1	2,07	1,23	0,73	2,75
Кварц и сростки, %	33,28	36,95	27,52	79,73	77,68
Карбонаты и сростки, %	0,24	2,06	—	1,25	—
Березит и сростки, %	16,54	12,12	28,35	—	—
Полевые шпаты и сростки, %	20,03	10,74	9,92	5,41	6,46
Сопутствующие сульфиды	ZnS, $CuFe_2S_3$, CuS, Fe_7S_8	ZnS	ZnS, FeAsS, CuFeS, Hg_2S, PbS	ZnS	CuS
Породы исходные	андезиты	андезто-дациты	дациты и риодациты	андезиты	пироксениты и андезиты
По основности	ближе к средним	ближе к средним	ближе к кислым	ближе к основным	основные
Шламы, %	17,55	18,86	15,74	12,59	17,3

в основном происходит в транспортирующих средах в водно-миграционных и воздушно-миграционных потоках.

Переработка руды Многовершинного месторождения происходит на золотоизвлекательной фабрике (ЗИФ) по сорбционной технологии с извлечением из них драгоценных металлов. Товарным продуктом является золото лигатурное, соответствующее ТУ 117-2-7-75.

Анализ данных мониторинговых наблюдений позволил выявить основные источники воздействия горнопромышленного комбината на водосборные бассейны малых рек, а именно — шахты (сброс загрязненных дренажных вод), отвалы пород вскрыши и некондиционных руд (выщелачивание токсичных элементов атмосферными осадками), ЗИФ, в частности цех гидрометаллургии (жидкие хвосты цианирования), хвостохранилища, осадки, выпадающие на поверхность водных объектов и содержащие пыль и загрязняющие вещества от промышленных выбросов.

По результатам опробования шахтных вод установлено превышение концентраций взвешенных веществ, сульфатов, меди, железа, цинка, нефтепродуктов, марганца по отношению к ПДК. Значительный вклад в загрязнение поверхностных вод вносит неорганизованный сброс с территории производственных площадок предприятия. В поверхностных стоках неорганизованного сброса превышение ПДС наблюдается по взвешенным веществам, нефтепродуктам, тяжелым металлам (железу, меди, цинку, марганцу, свинцу) и другим токсикантам.

На ЗИФ образуются стоки — обеззолоченные хвосты сорбционного выщелачивания, жидкая их фаза содержит такие вредные химические компоненты, как: цианид- и роданид-ионы, комплексные цианистые анионы железа, цинка, никеля и т.п. Значительная часть цианидов находится в пульпе в виде простых солей — NaCN, KCN, Ca $(CN)_2$, т.е. в форме реагентов, используемых при цианировании. Синильная кислота образуется в стоках в результате гидролиза солей или их взаимодействия с кислотами. В результате реагирования простых водорастворимых цианидов с компонентами твердой и жидкой фаз пульпы образуются простые нерастворимые в воде и комплексные нерастворимые цианиды [7].

Хвосты ЗИФ сбрасываются в хвостохранилище площадь, которого составляет 59,8 га. Хвостохранилище расположено в долине руч. Бирсалали, с которым связаны основные экологические проблемы, решение которых важно как для условий проживания человека, так и для природы в целом.

Согласно проектной документации основной сток ручьев Бирсалали и Грозового был отведен руслоотводящим каналом по левому борту хвостохранилища в естественное русло руч. Бирсалали ниже хвостохранилища. Однако на откосах плотины образуются борозды размыва — проявления процессов линейной эрозии. Увеличение их размеров по уклону ослабляет устойчивость откоса и способствует активизации оползневых явлений. Неудачное техническое решение оказалось о пропуске меженных расходов ручьев Бирсалали и Грозового, что усиливает дренаж, образование наледей и вынос загрязняющих веществ в речную сеть. Расчетное количество дренажных вод (835 тыс. $м^3$/год) возвращается на технологические нужды ЗИФ, остальная часть сбрасывается в руч. Бирсалали.

Сточные воды хвостохранилища (по фондовым данным Дальневосточного УГМС, Многовернинного ГОКа) вдвое и больше увеличивают суммарную минерализацию р. Лев. Ул (река 1 категории) относительно фоновых показателей, насыщая воды реки Zn, Cu, Mg, Cd, Fe, Pb, Cd, фенолом и др. токсикантами, ока-

зывая негативное воздействие на близлежащие территории и подземные воды. Содержание хлоридов в дренажных пробах превосходит отобранных выше хвостохранилища — в 61 раз, а в пробах воды ниже хвостохранилища — в 10 раз [8], что свидетельствует о значительном перерасходе гипохлорита кальция, применяемого при обезвреживании цианидных стоков, образованных в процессе технологического процесса, в результате которого есть риск образования стойких органохлоридов (например, полихлорированные бифенилы).

Класс опасности отхода является основным показателем, устанавливающим степень возможного или опосредованного воздействия отхода на компоненты окружающей среды, который определяет степень нарушения экологической системы и период ее восстановления в результате воздействия отхода при его размещении в окружающую среду.

Расчет показателя степени опасности исследуемого отхода (Ki) и отнесение к классу опасности для окружающей среды проводились с применением программы «Waste_Wange» [9]. Суммарный показатель опасности Ki равен 42,69690, что соответствует согласно «Критериями отнесения отходов к I—V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду», утвержденными приказом МПР России от 4 декабря 2014 г. № 536 [10], класс опасности — IV. Степень воздействия на окружающую среду малоопасная, но существенное влияние в «хвостах» оказывают процессы гипергенеза. Анализ гранулометрического состава «хвостов» обогащения с использованием лазерного анализатора частиц (Анализетте 22) показал преобладание мелкодисперсной фракции (средний арифметический диаметр от 14,5 до 19,2 мкм, удельная поверхность 5441-7042 — 1/м).

Происходящим геохимическим реакциям преобразования минерального состава накопленных хвостов благоприятствует тонкозернистость отложений, обеспечивающая обширную площадь

Таблица 2

Предполагаемые реакции окисления пирита и арсенопирита, протекающие в процессе окисления сульфидных минералов (пирита и арсенопирита)

№ пп	Реакции	Q кДж/моль
1	$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O = 2FeSO_4 + 2H_2SO_4$	2572,7
2	$4FeSO_4 + O_2 + 2H_2SO_4 = 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O$	395,0
3	$4FeS_2 + 15O_2 + 2H_2O = 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2SO_4$	5540,4
4	$4FeSO_4 + O_2 + 4H_2O = 2Fe_2O_3 + 4H_2SO_4$	41,7
5	$4FeS_2 + 15O_2 + 8H_2O = 2Fe_2O_3 + 8H_2SO_4$	5187,1
6	$4FeAsS + 11O_2 + 2H_2O = 4HAsO_2 + 4FeSO_4$	4801,1
7	$2HAsO_2 + O_2 + 2H_2O = 2H_3AsO_4$	319,7
8	$4FeAsS + 13O_2 + 6H_2O = 4H_3AsO_4 + 4FeSO_4$	5440,6
9	$Fe_2(SO_4)_3 + 2H_3AsO_4 = 2FeAsO_4 + 3H_2SO_4$	272,6
10	$2FeAsS + 13Fe_2(SO_4)_3 + 16H_2O = 28FeSO_4 + 2H_3AsO_4 + 13H_2SO_4$	152,5
11	$4FeS_2 + 16NaOH + 15O_2 = 4Fe(OH)_3 + 8Na_2SO_4 + 2H_2O$	4980,8
12	$2FeAsS + 10NaOH + 7O_2 = 2Na_3AsO_4 + 2Na_2SO_4 + Fe_2O_3 + 5H_2O$	3767,8
13	$CaCO_3 + H_2SO_4 = CaSO_4 + CO_2 + H_2O$	96,8
14	$2Na_3AsO_4 + 3Ca(OH)_2 = Ca3(AsO_4)_2 + 6NaOH$	-184,2

контакта плагиоклазов с кислородом и водой, широкое развитие капиллярной и пленочной воды, которая мигрирует к фронту сезонного вымерзания, т.е. к дневной поверхности в зимнее время, и испарительной конденсации в летнее. Эти процессы миграции вызывают в летние периоды возникновение на всей поверхности обсохших хвостов белесой пылевато-соляной корки толщиной до 5—30 мм, которые препятствуют пылению пляжей хвостохранилища [11]. Однако в составе образовавшейся корки находятся мелантерит ($FeSO_4 \cdot 7H_20$), ярозит ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$), гипс ($CaSO_4$) — минералы, соли серной кислоты H_2SO_4, что свидетельствует об окислении сульфидов и переводе их в сульфатные группы. Некоторые наиболее вероятные реакции окисления основных сульфидных минералов и тепловой эффект реакций приведены в табл. 2.

Анализ данных показывает. что в кристаллической структуре сульфидов обособляются комплексные анионы SO_4^{2-}, более слабые образуют основные соли, часто весьма неустойчивые, например сульфаты окисленного железа, более сильные основания — двойные соли и кристаллогидраты. Растворимость сульфатов достаточна высока, то перевод первой категории минералов во вторую значительно повышает геохимическое загрязнение окружающей среды токсичными элементами.

Это, несомненно, отражается на ухудшении здоровья людей и повышения общей экологически опасной ситуации в горнопромышленном районе.

Наиболее радикальным решением проблемы предотвращения загрязнения водоемов сточными водами, возникает необходимость во внедрении наилучших доступных технологий в части складирования хвостов обогащения, в соответствии с программой экологической ответственности бизнеса и стандартами ISO14000 и его центрального документа ISO14001.

Одним из вариантов складирования хвостов является способ «сухого» складирования хвостов цианирования, при котором хвостовая пульпа после обезвреживания подвергается не только сгущению, но и фильтрации. Получаемый кек хвостов транспортируется в спецотвал для захоронения, кроме того возврат фильтрата и промывных вод, содержащих цианиды, в технологию, позволит уменьшить расход цианистого натрия.

Исследование возможности обогащения и переработки техногенных отходов и образований с целью оценки технологической возможности и экономической целесообразности их вовлечения в производство в настоящее время только начинается. Для принятия стратегического решения о переработке того или иного техногенного месторождения и оценки технико-экономической целесообразности необходимо выполнить его прогнозную технологическую оценку, включающую исследование состава и свойств техногенного сырья и выявление оптимальных способов его обогащения и переработки для извлечения ценных компонентов и выпуска дополнительной товарной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Промышленная* добыча золота [Электронный ресурс]. — режим доступа http://zolotodb.ru/.http://habarovsk.bezformata.ru

2. *Беляев А. М.* Принципы отображения эколого-геохимического состояния литосферы на мелкомасштабных электронных эколого-геологических картах / Материалы международной конференции «Науки о Земле и образование». — СПб.: СПбГУ, 2002. — С. 24—26.

3. *Липина Л.Н.*, *Александрова Т.Н.*, *Грехнев Н.И.* Эколого-геохимическая оценка базовых компонентов окружающей среды горнопромышленного района (на примере ЗАО «Многовершинное») // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 2. — С. 348—356.

4. *Емлин Э.Ф.* Техногенез колчедановых месторождений Урала. — Свердловск: изд-во Уральского университета, 1991. — 256 с.,

5. *Аржанова В.С.*, *Елпатьевский П.В.* Геохимия ландшафтов и техногенез. — М.: Наука, 1990.

6. *Ятлукова Н.Г.*, *Александрова Т.Н.* Выполнение работ по определению технологических параметров обогащения 3 проб руды месторождения «Многовершинное». Инф. записка по хоз. договору. — Хабаровск, 2008. — 89 с.

7. *Александрова Т.Н.*, *Липина Л.Н.* Геоэкологические и технологические аспекты влияния отходов рудной золотодобычи на окружающую среду при освоении недр // Экологические системы и приборы. — 2011. — № 1. — С. 2—6.

8. *Александрова Т.Н.* Развитие методов оценки и управления эколого-технологическими системами при рудной и россыпной золотодобыче и использовании вторичного сырья в Дальневосточном регионе. Дисс. на соискание уч. ст. доктора техн. наук. — Хабаровск: ЧитГУ, 2008.

9. *Александрова Т.Н.*, *Федосеев А.А.* Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета класса опасности отходов «Dang_Waste» версия 1,0, № 2009612788.

10. Приказ № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I — V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду», Введ. 04.12. 2014. — М.: Министерство природных ресурсов РФ, 2015.

11. *Александрова Т.Н.*, *Липина Л.Н.* Техногенные отходы горнопромышленных предприятий как потенциальный резерв золотодобычи // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — СВ 19. — С. 201—205. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Александрова Татьяна Николаевна — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: alexandrovat10@gmail.com, Санкт-Петербургский горный университет,
Липина Любовь Николаевна — кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: GEO-LIPINA@rambler.ru, Институт горного дела ДВО РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 7, pp. 64–70.

UDC 504.064.36: 550.4+ 622*17 (571.6)

L.N. Lipina, T.N. Aleksandrova

ENVIRONMENTAL ISSUES OF POLLUTION IN A MINING REGION ON THE SOUTHERN FAR EAST OF RUSSIA

Mining leads to change the basic physical and chemical properties of the lithosphere, including its ecological functions — geodynamic, geophysical, geochemical and resource. First target of the ecological and geochemical evaluation is study of the parameters of the geochemical features of the lithosphere and their changes in the process of development of the field. The main object of the study is one of the enterprises for processing of gold ore of the Khabarovsk Territory. Analysis of the data monitoring observations revealed the main sources exposure of the mining plant. Grain size substantially influenced to dynamics of hypergenesis processes in the «tails» of enrichment: fine materials significantly enriched in heavy metals compared to the coarse material. Analysis of the particle size distribution of the «tails» with a laser particle analyzer (Analysette — 22) showed

the predominance of the fine fraction, which favors the ongoing geochemical reactions. As part of the «tails» of enrichment are melanterite, jarosite, gypsum — minerals, salts of sulfuric acid, which indicates the oxidation of sulphides and translating them into sulfate groups. Solubility sulfate is high enough, the translation of the first to the second category of minerals greatly increases the geochemical pollution with toxic elements. To introduce the best available technologies to storage of tailings is the most radical solution to the problem of pollution prevention.

Key words: environment, field, mining factory, environmental problems, monitoring tailings.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-64-70

AUTHORS

Aleksandrova T.N., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Chair, e-mail:alexandrovat10@gmail.com,
Saint Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia,
Lipina L.N., Candidate of Technical Sciences, Researcher,
e-mail: GEO-LIPINA@rambler.ru,
Institute of Mining of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, Russia.

REFERENCES

1. *Promyshlennaya dobycha zolota*, available at: http://zolotodb.ru/.http://habarovsk.bezformata.ru.

2. Belyaev A. M. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Nauki o Zemle i obrazovanie»* (Proceedings of the International Conference «Earth Science and Education»), Saint-Petersburg, SPbGU, 2002, pp. 24—26.

3. Lipina L. N., Aleksandrova T. N., Grekhnev N. I. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 2, pp. 348—356.

4. Emlin E. F. *Tekhnogenez kolchedanovykh mestorozhdeniy Urala* (Technogenesis of pyrite deposits in the Ural), Sverdlovsk, izd-vo Ural'skogo universiteta, 1991, 256 p.,

5. Arzhanova V. S., Elpat'evskiy P. V. *Geokhimiya landshaftov i tekhnogenez* (Geochemistry of landscapes and technogenesis), Moscow, Nauka, 1990.

6. Yatlukova N. G., Aleksandrova T. N. *Vypolnenie rabot po opredeleniyu tekhnologicheskikh parametrov obogashcheniya 3 prob rudy mestorozhdeniya «Mnogovershinnoe»*. Informatsionnaya zapiska po khoz. dogovoru (Examination of the technological parameters of 3 samples of ore beneficiation field MNV. Inf. Note on households agreement), Khabarovsk, 2008, 89 p.

7. Aleksandrova T. N., Lipina L. N. *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2011, no 1, pp. 2—6.

8. Aleksandrova T. N. *Razvitie metodov otsenki i upravleniya ekologo-tekhnologicheskimi sistemami pri rudnoy i rossypnoy zolotodobyche i ispol'zovanii vtorichnogo syr'ya v Dal'nevostochnom regione* (Development of the assessment and control methods for the ecology-and-technology systems in mining of gold ore deposits and placers and in waste regaining in Russian Far East region), Doctor's thesis, Khabarovsk, ChitGU, 2008.

9. Aleksandrova T. N., Fedoseev A. A. Svidetel'stva o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Programma rascheta klassa opasnosti otkhodov «Dang_Waste» versiya 1,0, № 2009612788 (Certificate of state registration of computer programs. The program of calculation of class of danger of waste «Dang_Waste» version 1.0, no 2009612788).

10. *Prikaz № 536 «Ob utverzhdenii Kriteriev otneseniya otkhodov k I–V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu»*, Vveden 04.12. 2014 (The order no 536 «On approval of Criteria for classification of waste to I–V hazard classes according to the degree of negative impact on environment». Introduced 04.12. 2014), Moscow, Ministerstvo prirodnykh resursov RF, 2015.

11. Aleksandrova T. N., Lipina L. N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, Special edition 19, pp. 201—205.