УДК 502.5, 504.054

М.А.КУЛИКОВА, *канд. техн. наук, ассистент, mix2ra@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

M.A.KULIKOVA, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, mix2ra@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЩИТНОГО ЭКРАНА ДЛЯ ОТСЫПКИ ОТВАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Негативное воздействие горной промышленности на окружающую среду ежегодно возрастает. Это связано с объективным увеличением потребления человечеством материальных ресурсов. В условиях современного горного производства выход готовой продукции составляет менее 10 %, остальной объем представлен отходами добычи и переработки, для складирования которых отводятся сотни тысяч гектаров земель. Минеральные отходы, как правило, содержат компоненты, которые, находясь на открытом воздухе и подвергаясь воздействиям климатических факторов, способны трансформироваться в новые соединения и мигрировать на десятки и сотни километров от источника.

***Ключевые слова*:** месторождение, донные осадки, почвы, тяжелые металлы, техногенный ореол рассеяния.

JUSTIFICATION OF THE NECESSITY OF FORMING A PROTECTIVE SCREEN FOR DUMPING WASTE DUMPS IN THE DEVELOPMENT FIELDS

The negative impact of mining on the environment is increasing annually. This is due to an objective increase in consumption of material resources by humanity. In today's mining output of finished goods is less than 10%, the rest of the volume represented by mining and processing wastes, which are assigned for the storage of hundreds of thousands of hectares of land. Chemical waste, as a rule, contain components which, being outdoors and being exposed to the impacts of climatic factors, can be transformed into new compounds, and to migrate hundreds of kilometers from the source.

***Key words*:** ore deposits, sediments, soils, heavy metals, technogenic scattering halo.

Наиболее значительной техногенной нагрузке подвергается природная среда в районах складирования сульфидсодержащих отходов. Вследствие окисления сульфидной серы происходит формирование кислых дренажных вод и, соответственно, лито- и гидрогеохимических ореолов загрязнения с крайне низкими значениями показателя pH. Это приводит к уничтожению растительности, трансформации состава покровных отложений, поверхностных и подземных вод.

В 2010 г. начата разработка месторождения полиметаллических сульфидных руд «Озерное», расположенного в 350 км от особо охраняемой зоны оз. Байкал, что приведет к образованию отходов, содержащих сульфидную серу и тяжелые металлы, являющихся одновременно поллютантами и потенциальным минеральным сырьем.

Проект освоения месторождения включает строительство карьера и обогатительного комплекса, где будут применяться методы селективно-коллективной сепарации; организацию складирования отходов производства; развитие инфраструктуры района. В результате обогащения планируется получение цинкового, свинцового и пиритного концентратов.

Таблица 1

Содержание элементов в продуктах и отходах добычи и переработки для месторождения «Озерное»

Продукт	Выход, %	Содержание, %		
		Pb	Zn	S
Руда	100,0	0,85	4,73	20,12
Свинцовый концентрат	1,07	45,80	4,39	29,85
Цинковый концентрат	8,57	0,57	47,04	39,39
Пиритный концентрат	30,39	0,53	1,22	40,70
Отвальные хвосты (окисленные руды, сульфидные руды)	59,97	0,26	0,47	7,20

Добыча и переработка свинцово-цинковых руд месторождения предполагает размещение более 600 млн т отходов различных классов опасности на площади свыше 200 га. Проведенные технологические испытания позволили оценить содержание полезных компонентов в получаемом продукте и токсичных примесей в минеральных отходах (табл.1). При разработке месторождения произойдет формирование следующих техногенных массивов:

• насыпных массивов, представленных вскрышными породами зоны окисления рудных тел, с содержанием водорастворимых форм свинца от 0,2 до 2,0 %, цинка от 0,3 до 1,8 %;

• насыпных массивов, представленных отвалами пустой породы с содержанием сульфидной серы до 7,2 %;

• намывных массивов, представленных хвостами обогащения с содержанием сульфидной серы до 40,7 %;

• техногенных наносов, формирующихся в результате пылесдувания с поверхностей хранения минеральных отходов.

Сульфиды неустойчивы в водных растворах и в присутствии кислорода переходят в окисленные соединения: оксиды, гидроксиды, сульфаты, карбонаты и т.п.

Складирование сульфидсодержащих отходов сопряжено с опасностью формирования кислых дренажных вод, вследствие инфильтрации поверхностных или подземных вод через массив отходов с окислением сульфидных минералов (пирита, сфалерита и галенита) по следующим схемам соответственно:

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \rightarrow 2FeSO_4 + 2H_2SO_4;$$

$$4FeSO_4 + 2H_2SO_4 + O_2 \rightarrow 2Fe_2(SO_4)_3 + 2H_2O;$$

$$2ZnS + 2Fe_2(SO_4)_3 + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2ZnSO_4 + 4FeSO_4 + 2H_2SO_4;$$

$$2PbS + 2Fe_2(SO_4)_3 + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2PbSO_4 + 4FeSO_4 + 2H_2SO_4.$$

Растворимость сульфатов металлов в несколько раз превосходит растворимость их сульфидов (табл.2).

Таблица 2

Растворимость минеральных соединений в воде при 18-25 °С (pH = 3÷4)

Элемент	Растворимость, г/кг	
	сульфида	сульфата
Zn^{2+}	1·10-7	541
Pb^{2+}	8·10-9	0,04
Cd^{2+}	1·10-8	76,4
Cu^{2+}/Cu^{+}	3·10-4/2·10-2	205/–
Hg^{2+}/Hg^{+}	5·10-21/2·10-20	0,05/–

Из данных табл.2 следует, что окисление сульфидных минералов до сульфатов при хранении минеральных отходов, а также складированных вскрышных пород, содержащих сульфаты свинца и цинка, приведет к загрязнению поверхностных и подземных вод тяжелыми металлами, закислению почв с формированием на прилегающей территории высококонтрастных литохимических ореолов и гидрохимических потоков загрязнения и, как следствие, к угнетению и гибели биотических компонентов природной среды.

Исследования по определению потенциальной экологической опасности отходов включали отбор проб с отвала и бортов раз-

ведочной штольни (пройденной в 1963-1964 гг.) на различной глубине, отбор проб донных отложений ручья, дренирующего отвал, что позволило определить остаточные содержания свинца и цинка в отходах, а также оценить их миграционную способность.

Отобранные и подготовленные пробы анализировались в следующей последовательности:

1) натурные исследования с применением портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра для предварительной оценки содержания токсикантов;

2) лабораторные исследования с определением минерального состава образцов методом рентгеноспектрального фазового анализа; валового элементного состава проб методом рентгеновской флуоресценции и содержания основных токсикантов методом атомно-абсорбционной спектрометрии.

Проведенные исследования с применением рентгеновских методов анализа показали, что отходы разведочной штольни в основном состоят из пирита, сидерита, кальцита, доломита, содержащих 4,5-25 г/кг Pb, 13-35 г/кг Zn, 170-240 г/кг S, 215-640 мг/кг As, 180-320 мг/кг Cu, 40-115 мг/кг Cd. Тяжелые металлы в основном находятся в сульфатной форме вследствие их нахождения в окислительной обстановке.

Фазовый состав отходов штольни по глубине залегания, следующий:

Глубина, м	0-0,4	1,2-1,6	2,2-2,6
Основные соединения	**Пирит, кварц, сидерит,** слюда, магнетит, доломит, гипс, каолинит, цинковый купорос, свинцовый купорос	**Пирит, кварц,** сидерит, слюда, магнетит, кальцит, каолинит доломит, слюда	**Пирит,** кварц, сидерит, слюда, доломит, магнетит, кальцит, сфалерит, галенит

Примечание. Выделены минералы, преобладающие в образцах.

Мониторинговые исследования позволили сделать вывод, что инфильтрация вод в окислительной обстановке через тело отвала инициирует процессы образования вод с пониженным pH и выщелачивание металлов, находящихся в отвале. Это приведет к формированию техногенных ореолов загрязнения, контрастных по цинку, свинцу и другим тяжелым металлам. Экологическая ситуация в регионе может усугубиться тем, что техногенные массивы будут дренироваться р. Гундуй-Холой, впадающей в р.Уда, которая, в свою очередь, относится к бассейну оз. Байкал.

Согласно проекту строительства, отходы будущего ГОКа отнесены к IV и III классам опасности, соответственно малоопасные и умеренно опасные для окружающей природной среды. По нормативным методикам отходы добычи относят к IV классу опасности, а отходы обогащения – к III классу без учета содержаний в отходах соединений серы и тяжелых металлов, их миграционной способности.

Натурные наблюдения и экспериментальные исследования показали, что тяжелые металлы в кислотной, окислительной обстановке находятся (или переходят) в хорошо растворимые формы, что обеспечивает возможность миграции загрязняющих компонентов на значительные расстояния.

В результате оценки негативного воздействия техногенных массивов на поверхностные и подземные воды установлено, что формирование кислых дренажных вод и миграция загрязняющих компонентов определяется физико-химическими процессами метаморфизации инфильтрационных вод (растворение отходов, десорбция пород зоны аэрации).

Процесс образования кислых вод, т.е. скорость и пределы падения pH дренажных вод, вид зависимости концентрации ионов H^+ от времени $pH = f(t)$, определяется следующими факторами: гранулометрическим и минеральным составом отходов, концентрацией в них сульфидных минералов, активностью протекания биохимических процессов, содержанием в отходах нейтрализующих кислотность минералов и их типом (карбонаты, глинистые минералы).

Полевые исследования позволили установить степень вымываемости тяжелых металлов, находящихся в отвале разведочной

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в образцах донных отложений ручья Безымянный

Элемент	Место отбора пробы по фарватеру водотока, м										
	0	50	100	200	300	500	750	900	1150	1300	1500
Zn	0,8	0,62	0,66	0,65	0,46	0,22	0,13	0,08	0,08	0,05	0,02
Pb	0,16	0,16	0,12	0,08	0,11	0,16	0,15	0,07	0,05	0,02	0,02
As	11	10	11	7	7	8	5,5	6	4	4	3
Cu	122	100	85	81	71	50	50	41	37	35	28

Примечание. Содержание Zn и Pb – в граммах, As и Cu – в миллиграммах на килограмм.

выработки. Пробы отбирались с шагом 50 м по центру водотока, дренирующего отвал, и анализировались с помощью портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра (табл.3).

Важным источником поступления загрязняющих веществ в речные воды являются очаги вторичного загрязнения, сформировавшиеся в донных отложениях. Количество взвесей, поступающих из почвенных и снеговых геохимических аномалий, и масса веществ, осевшая на участке реки*:

$$M = (C_{исх} - C_{кон})Q,$$

где Q – объем воды, протекающий через участок; $C_{исх}$ и $C_{кон}$, – исходная и конечная концентрации взвеси на участке соответственно. Скорость, при которой происходит аккумуляция наносов,

$$U_0 = 3{,}83 d^{1/3} H^{1/6}.$$

Так, например, для частиц крупностью $d = 0{,}01$ мм в потоке глубиной H = 1,5 м и скоростью $U_0 = 0{,}1$ м/с время осаждения равно 105 с, а расстояние, на котором происходит осаждение, составляет несколько километров.

Обменные процессы между загрязненными донными отложениями и речными потоками определяются несколькими факторами, основными из которых являются: перепад концентраций между поровым раствором и водой в реке; наличие фильтрации в отложениях, физико-механические характеристики отложений и вид растворенного вещества. Диффузия примесей из донных отложений в воду в условиях отсутствия подруслового фильтрационного потока определяется только молекулярной диффузией, описываемой уравнением Фурье – Фика:

$$\frac{\partial C(Z,t)}{\partial t} = D_r \frac{\partial^2 C(Z,t)}{\partial Z^2},$$

где C – концентрация примеси в поровом растворе в момент t в точке Z (по глубине донных отложений); t – время; Z – глубина расположения точки с концентрацией C; D_r – коэффициент диффузии примеси в отложениях.

Интегрирование этого уравнения дает массу продиффундировавшей примеси из донных отложений:

$$m = 2F(C_г - C_в)\sqrt{\frac{D_z t}{\pi}},$$

где F – площадь поверхности загрязненных отложений; $C_г$ и $C_в$ – концентрация примеси в отложениях и в воде соответственно; D_z – коэффициент поперечной диффузии.

Количественная оценка поставки ионов As^{5+}, Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+} в воду из донных отложений в зависимости от величины pH воды водотока представлена в табл.4.

Таблица 4

Поставка ионов металлов из донных отложений в воду, т/(км^2·год) при различных pH

pH	As5+	Pb2+	Zn2+	Cu2+
7,3	0,04	0,07	2,41	1,13
6,2	0,065	0,09	12,05	2,15
4,9	0,106	0,2	13,5	8,07
4,2	0,138	0,26	16,92	10,95
3,9	0,168	0,336	19,71	–
3,6				

* *Семячков А.И.* Эколого-экономическая оценка техногенно-минеральных образований / А.И.Семячков, В.В.Балашенко, О.В.Косолапов, Екатеринбург, 2009, 196 с.

Semyachkov A.I. Ecological and economic evaluation of technogenic mineral formations. // A.I.Semyachkov, V.V.Balashenko, O. V.Kosolapov. Yekaterinburg, 2009, 196 p.

Анализ показывает, что при площадях загрязнения донных отложений, составляющих $n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{1}$ км^2, величина поступления металлов в речную сеть сопоставима с величиной поступления из других источников.

Окислительно-восстановительное состояние донных отложений контролируется рельефом дна водотока и содержанием кислорода. В результате в глубоких участках Eh снижается до 235 мВ, и разность потенциалов между речной водой достигает почти 400 мВ. Возникающий геохимический барьер, осаждает практически все изучаемые элементы. Но происходит и диффузионный отток тех же компонентов в контактную водную среду. Прямым следствием этого является загрязнение водной системы ручья Безымянный активными формами металлов из донных отложений (табл.5). Анализ данных показывает, что доля элементов, поступающих в ручей из донных отложений, сопоставима с их поступлением с площади водосбора. Это связано с высокой интенсивностью процесса миграции металлов, превосходящей естественную в сотни и тысячи раз.

Таблица 5

Оценка миграционного баланса металлов ручья Безымянный, кг/год

Элемент	Поступление из донных отложений	Вынос за пределы	Поступление в водоток с площади водосбора
Zn	0,91	2,11	7,5
Pb	0,73	1,23	4,5
As	0,05	0,155	0,5
Cu	0,025	0,45	0,3

Степень «загрязненности» донных отложений металлами установить сложно, так как их содержания в донных грунтах не нормируются. В качестве критерия используются обычно ПДК почв. Сравнение средних значений содержания металлов в донных отложениях водных объектов бассейна ручья Безымянный со значениями ПДК почв показывает, что содержания Zn и Pb в них в несколько десятков раз превышают ПДК в почве. Также превышают значения ПДК содержания Cu и As.

Расчеты показали, что с учетом климатических характеристик района месторождения из отвала ежегодно вымывается свыше 4,5 кг свинца и свыше 7,5 кг цинка.

Проведенные исследования позволяют с большой достоверностью смоделировать экологическую ситуацию при масштабной разработке месторождения Озерное. В результате будет произведена выемка большого объема окисленных руд и пустых сульфидных пород, находившихся до этого момента в восстановительной обстановке. Складирование сульфидсодержащих соединений на открытом воздухе обеспечит свободный доступ кислорода и атмосферной влаги, спровоцирует процессы окисления сульфидных минералов с образованием сульфатов тяжелых металлов. В результате указанных процессов произойдет образование и распространение вод с пониженным pH (до 2-3), выщелачивание цинка, свинца и других тяжелых металлов.

Уровень потенциальной техногенной нагрузки от складирования отходов при разработке месторождения, в связи с изменением их основных характеристик при хранении, позволяет отнести отходы окисленных руд, сульфидсодержащие отходы добычи к I классу опасности для окружающей природной среды.

Анализы ландшафтно-геохимической обстановки, минерального и элементного состава отходов месторождения позволили установить, что при складировании отходов добычи для надежной защиты водных ресурсов, почвенного покрова, растительности от воздействия кислых вод и загрязнения тяжелыми металлами необходимо:

- строительство оградительной дамбы и создание противофильтрационного экрана из полимерных материалов;
- проведение дренажной системы с отводом кислых вод из оснований будущих техногенных массивов, нейтрализацией этих вод и осаждением содержащихся в воде токсикантов с повышенной миграционной способностью.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования научным оборудованием Горного университета при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.