

УДК 622.7.017

## Потенциальная экологическая опасность выведенных из эксплуатации хранилищ хвостов обогащения медно-никелевых руд

В. Н. МАКАРОВ, Т. Н. ВАСИЛЬЕВА, Д. В. МАКАРОВ, А. А. АЛКАЦЕВА, Е. Р. ФАРВАЗОВА, Д. П. НЕСТЕРОВ, В. В. ЛАЩУК

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева  
Кольского научного центра РАН,  
ул. Ферсмана, 26 а, Апатиты 184209 (Россия)

E-mail: makarovdv@chemy.kolasc.net.ru

(Поступила 25.02.04; после доработки 31.05.04)

### Аннотация

Проведено моделирование возможного загрязнения почв вследствие пыления хвостов обогащения медно-никелевых руд, выведенных из эксплуатации. Результаты показывают, что попадание сульфидосодержащих отвалных продуктов в почву приводит к достаточно интенсивному переводу тяжелых металлов в водорастворимую форму. Образующиеся при этом органоминеральные комплексы устойчивы и не поддаются очистке традиционными реагентами.

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе обогащения медно-никелевых руд образуется большое количество тонкодисперсных отходов, выход которых достигает 90 % и более от исходной руды. Эти отходы, в составе которых наряду с силикатами и гидросиликатами железа и магния содержатся недоизвлеченные сульфиды железа и цветных металлов, складировываются в хвостохранилищах. Как правило, для размещения отходов используют естественные ложбины, долины ручьев и временных потоков, овраги, котловины и впадины. Для увеличения емкости хвостохранилищ отсыпаются дамбы. В период эксплуатации хвостохранилищ вследствие применения оборотного водоснабжения на его поверхности создается искусственное озеро, а сами хвосты находятся в водонасыщенном состоянии. Во избежание загрязнения окружающей среды – поверхностных и подземных вод – реагентами, а также для снижения потерь воды создается более или менее совершенная гидроизоляция дамбы и дна хвостохранилища.

При эксплуатации хвостохранилища за его безопасным состоянием следит специальная

служба, на его содержание затрачиваются значительные финансовые и материальные ресурсы за счет прибыли от эксплуатации месторождения. После завершения эксплуатации поддержание безопасного состояния таких объектов становится проблематичным, так как финансовый источник иссякает.

Представляет интерес оценка потенциальной экологической опасности выведенных из эксплуатации хранилищ хвостов обогащения медно-никелевых руд. Принципиально возможны следующие механизмы загрязнения окружающей среды (почв и водоемов):

- за счет фильтрации поровых растворов через «тело» дамбы и дно хвостохранилища;
- вследствие пыления хвостохранилищ;
- в результате аварий дамб.

Вероятность последних определяется инженерно-геологическим состоянием хвостохранилища, является предметом специальных исследований и выходит за рамки настоящей работы. Оценка роли пыления и фильтрации в загрязнении окружающей среды тяжелыми металлами имеет принципиальное значение, исходя из следующего. При фильтрации растворов в условиях Балтийского шита с неглубоким залеганием скальных грун-

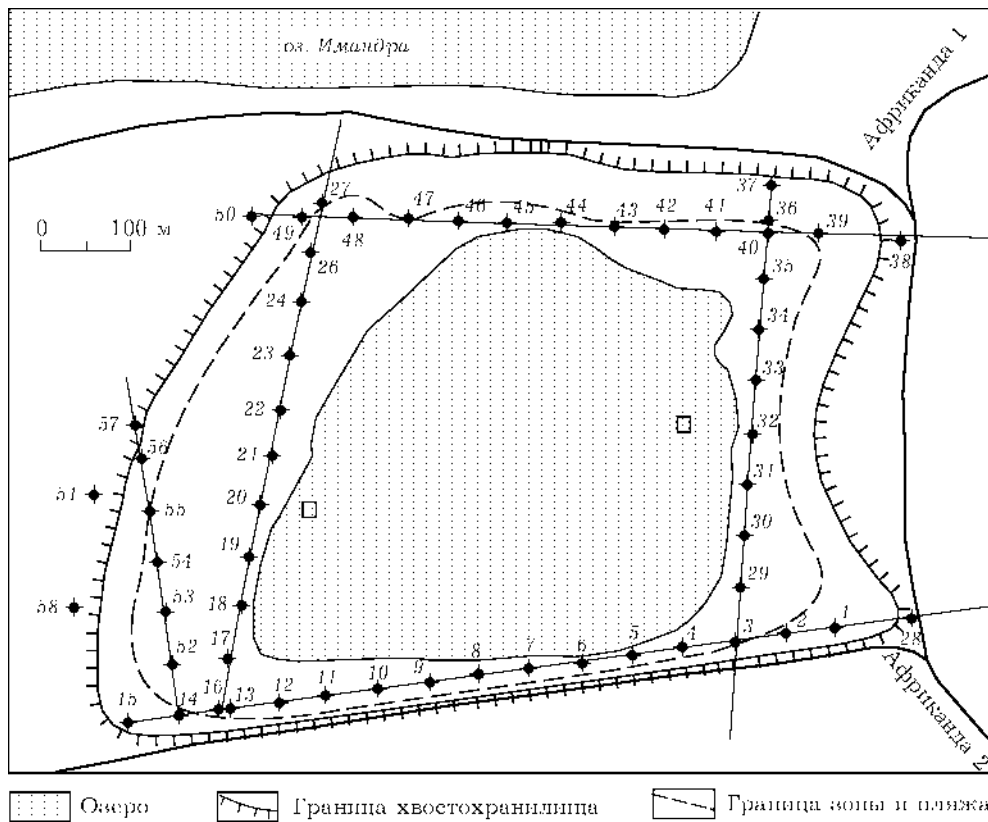


Рис. 1. Схема хвостохранилища опытной обогатительной фабрики в пос. Африканда: 1–58 – точки отбора проб.

тов загрязнение может проявляться вниз по склону местности. В этом случае эффективно применение искусственных геохимических барьеров. При пылении хвостов попадание тяжелых металлов в почву может иметь место и вверх по склону и проявляться на значительных площадях.

Для оценки роли фильтрации растворов и пыления хвостохранилищ в загрязнении природных грунтов тяжелыми металлами сопоставляли их концентрации в хвостах выведенного из эксплуатации хвостохранилища, в поровых растворах этих хвостов и в природных грунтах вблизи хвостохранилища. Также учитывалось, что в случае загрязнения грунтов пылящими хвостами важно определить возможность перехода содержащихся в них сульфидов в водорастворимое состояние. Как показано ранее, в самих хвостохранилищах образование водорастворимых сульфатов меди, никеля, кобальта и железа связано с процессами окисления сульфидов [1–3 и др.]. В природных грун-

тах, особенно в верхнем почвенном слое, в условиях тундры и лесотундры эти процессы также возможны из-за высокой концентрации органических веществ. Не исключено и взаимодействие сульфидов с органическими кислотами.

В качестве модельного объекта использовано хвостохранилище опытной обогатительной фабрики в пос. Африканда (Мурманская обл.). Фабрика была построена для переработки перовскитовых руд, однако в связи с изменением конъюнктуры и несовершенством технологии переработка этих руд была прекращена. В течение нескольких лет на фабрике обогащали медно-никелевые руды Печенгского рудного поля. Позднее фабрика использовалась как опытная НИИ «Механобр» (С.-Петербург) для отработки технологии обогащения руд разных месторождений СССР. Поскольку в этот период объем перерабатываемых руд был невелик, основную роль в составе хвостов играют отходы обогащения медно-никелевых руд.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для оценки склонности хвостов к пылению в пределах хвостохранилища по сети специальным пробоотборником отбирали пробы хвостов с ненарушенной структурой с поверхности и с глубины 0.5 м. Поскольку центральная часть хвостохранилища покрыта озером, опробовались только периферические участки. Места отбора проб обозначены на рис. 1.

По стандартным методикам определяли среднюю плотность грунта в естественном и сухом состоянии, истинную плотность грунта, его гранулометрический состав; рассчитывали влажность грунта, его пористость, коэффициент пористости, плотность сложения, степень водонасыщенности. Кроме того, определяли водоудерживающую способность искусственного грунта. Геохимическую и гидрохимическую характеристики хвостов определяли путем химического анализа твердой фазы и порового раствора. Содержание никеля, меди, кобальта, железа и оксида магния определяли атомно-абсорбционным методом, сульфатной серы – гравиметрическим или спектрофотометрическим методами (в зависимости от содержания). Аналогичным образом отбирали и анализировали пробы природных грунтов вблизи хвостохранилища.

Для оценки влияния органического вещества на переход тяжелых металлов в водорастворимое состояние исследования выполнены на лабораторных моделях. Так, для почвенного слоя характерны высокая влажность и ограниченный доступ кислорода, что удовлетворительно моделируется в аппарате Сокслета [4]. Материал помещали в нижнюю часть аппарата. При сливе выводилась капельно-жидкая вода с сохранением пленочной и капиллярной влаги. В эксперименте использовали органическое вещество верхнего органогенного горизонта подзолистых почв (массовая доля 52.6 %). Кислый водорастворимый гумус (рН 4.0), имеющий следующий состав, % от общего углерода: гуминовые кислоты (ГК) 22.4, фульвокислоты (ФК) 28.2, негидролизующий остаток 49.4,  $C_{ГК} : C_{ФК} = 0.8$ , – способствует активному выветриванию.

Материал, включающий в себя сульфидсодержащие минеральные продукты и органическое вещество, помещали в специальный

цилиндр, закрытый с нижнего и верхнего торцов шелковой тканью. Это обеспечивало свободную инфильтрацию растворов, но препятствовало удалению твердых частиц. Минеральное вещество располагали внутри органического в специальной мешочке из шелковой ткани. Навеска вещества составляла 25 г, в том числе 15 г минеральной и 10 г органической фазы. Материал обрабатывали в течение 100 ч, рН раствора определяли через каждые 8 ч при 20 °С. После завершения эксперимента твердую фазу высушивали, взвешивали и исследовали под микроскопом, анализировали рентгенометрическим и термографическим методами. Раствор отфильтровывали от взвеси и определяли химический состав. Взвесь анализировали рентгенометрическим и химическим методами.

В качестве минеральных фаз использовали сплошную сульфидную руду состава (массовая доля), %: пирротин 53.89, пентландит 29.25, халькопирит 2.81, магнетит 5.7 и силикаты, главным образом тальк и гидрохлориты (остальное) и хвосты обогащения медно-никелевых руд, состоящие в основном из гидросиликатов магния, но содержащие включения сульфидов (преимущественно пирротина). Суммарное содержание сульфидов менее 3 % (по массе).

В аппарате Сокслета обработка материала происходит при температуре около 70 °С, причем вода проходит фазу пара. Такие условия не благоприятствуют развитию микроорганизмов, участие которых в реальных процессах, происходящих в почве, несомненно.

Для предварительной оценки роли химических и биохимических составляющих при переводе тяжелых металлов в водорастворимую форму наряду с экспериментами в аппарате Сокслета поставлены опыты в термостатах при 30 °С. В качестве реагента использовали водную вытяжку органического вещества верхнего органогенного горизонта подзолистых почв. Длительность экспериментов составляла 100 ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение на местности загрязняющих веществ и их максимальная концентра-

ция в аэрозолях обусловлены, с одной стороны, сочетанием неблагоприятных метеорологических факторов, с другой – свойствами природных или искусственных грунтов. К метеорологическим факторам относятся рельеф местности, коэффициент температурной стратификации, роза ветров, средневзвешенная скорость ветра, количество и распределение осадков. К важнейшим свойствам грунтов, определяющим их способность к образованию аэрозолей, относятся гранулометрический состав, влажность, водоудерживающая способность и наличие водно-коллоидных связей между минеральными частицами.

Как известно, в соответствии с эффектом Бернулли при увеличении скорости движения воздуха, обтекающего сверху возвышающуюся частицу, на нее действует подъемная сила, которая при некоторой критической скорости ветра может превысить силу тяжести. В воздухе кинетическая энергия такой частицы значительно увеличивается за счет приобретения горизонтальной составляющей скорости, соответствующей движению ветра.

Критическая скорость ветра  $V_{кр}$  зависит от размера частиц и их массы:

$$V_{кр} = a[(\rho_{ТВ}/\rho_{В})gd]^{0.5}$$

где  $a$  – эмпирический коэффициент, зависящий от распределения частиц по фракциям, степени шероховатости поверхности, характера связи между частицами и др.;  $\rho_{ТВ}$  и  $\rho_{В}$  – плотности пылинки и приповерхностного воздуха соответственно;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $d$  – диаметр пылинки.

Для природных грунтов эта зависимость справедлива для частиц диаметром до 0.1 мм [5]. В грунтах с более мелким средним размером частиц увеличивается роль глинистой составляющей. Глинистые частицы обладают прочными водно-коллоидными связями, поэтому с уменьшением размера частиц критическая скорость не только не уменьшается, но даже возрастает.

В свежих техногенных продуктах практически нет ни глинистых частиц, ни органического вещества, способствующих образованию водно-коллоидных связей.

Анализ гранулометрического состава и некоторых других инженерно-геологических

ТАБЛИЦА 2

Статистические параметры распределения гранулометрического состава лежалых хвостов и прилегающих к хвостохранилищу грунтов

Статистический параметр	Размер фракции, мм						Средний диаметр минеральных зерен, мм
	>0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.025	<0.025	
<i>Глиноподобные лежалые хвосты</i>							
$M(x)$	0.36	4.19	13.58	19.96	17.19	44.72	0.069
$Med(x)$	0.040	1.365	6.535	16.260	14.950	40.585	0.060
$S(x)$	0.730	6.122	13.270	13.798	10.856	27.791	0.047
<i>Несвязные лежалые хвосты (аналоги пылеватых песков)</i>							
$M(x)$	2.75	27.20	47.73	15.72	4.63	1.97	0.212
$Med(x)$	1.950	26.340	47.880	12.560	3.680	1.240	0.210
$S(x)$	2.658	13.974	10.239	7.611	3.470	1.962	0.048
<i>Несвязные лежалые хвосты с включениями глиноподобных прослоек</i>							
$M(x)$	3.1	15.54	37.22	24.33	12.98	6.88	0.159
$Med(x)$	1.270	16.12	35.310	18.350	6.045	6.665	0.165
$S(x)$	6.436	10.298	15.160	17.872	22.972	4.974	0.065
<i>Природные грунты</i>							
$M(x)$	13.79	16.44	39.27	18.59	8.10	3.81	0.252
$Med(x)$	14.245	16.715	40.810	14.875	7.310	2.810	0.245
$S(x)$	16.572	6.515	17.074	8.096	4.405	2.166	0.109

Примечание.  $M(x)$  – среднее значение параметра;  $Med(x)$  – наиболее часто встречающееся значение параметра;  $S(x)$  – среднеквадратичное отклонение.

характеристик лежалых хвостов показал, что они заметно отличаются от хвостов текущей добычи. Это связано, прежде всего, с резким увеличением роли тонкодисперсных частиц и усилением влияния водно-коллоидных связей в некоторых их разновидностях. По составу и свойствам все лежалые хвосты могут быть объединены в три группы.

1. Глиноподобные лежалые хвосты, наиболее тонкодисперсные, в которых содержание частиц мельче 0.025 мм, как правило, составляет более 20 %. Такие грунты в сухом состоянии имеют камнеподобное сложение. Во влажном состоянии они обладают пластичностью, а при максимальной влажности могут переходить в текучее состояние. Эти искусственные грунты характеризуются низкими значениями коэффициента фильтрации (0.03–0.9 м/сут) и высокой водоудерживающей способностью. В проанализированной выборке (108 проб) глиноподобные грунты составляют чуть более 40 %.

2. Несвязные лежалые хвосты, характеризующиеся максимальной крупностью минеральных частиц и содержанием частиц мельче 0.025 мм, как правило, не более 5–7 % (по массе), а во многих случаях <1 %. Коэффициент фильтрации таких грунтов существенно выше и вследствие этого их влажность значительно ниже, чем глиноподобных. В проанализированной выборке такие грунты составляют чуть более 45 %.

3. Несвязные лежалые хвосты с включениями глиноподобных прослоек, линзочек и гнезд. По составу и свойствам занимают промежуточное положение.

Основные статистические параметры распределения гранулометрического состава лежалых хвостов и прилегающих к хвостохранилищу природных грунтов приведены в табл. 1, кумулятивная кривая гранулометрического состава показана на рис. 2. Видно, что для глиноподобных грунтов среднее содержание частиц размером менее 0.025 мм составляет почти 45 %, а частиц с крупностью зерен более 0.05 мм практически нет. Для несвязных грунтов характерно преобладание фракции от 0.25 до 0.1 мм (почти 48 %). По гранулометрическому составу несвязные лежалые хвосты близки к природным грунтам вблизи хвостохранилища (табл. 2, рис. 2).

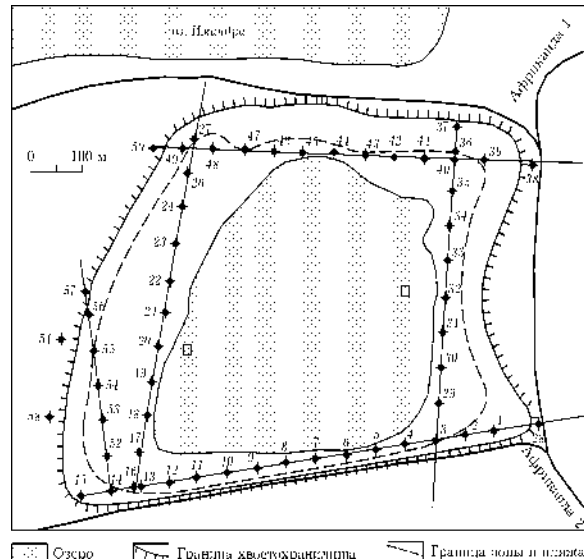


Рис. 2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава глиноподобных (1), несвязных (2), несвязных с включениями глиноподобных прослоек (3) лежалых хвостов и природных грунтов вблизи хвостохранилища (4).

В работе [6] представлены расчеты пылевых потоков хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд в районе станции Хибинь. Поскольку хвостохранилище действующее, предполагалось, что в процессе пыления участвует 10 % общей площади хвостохранилища. При значениях влажности 6–12 % (по массе) поток массы пыли на расстоянии нескольких километров составляет 4–8 г/(м<sup>2</sup> · сут). Максимальное значение потока пыли наблюдается в непосредственной близости от хвостохранилища.

В табл. 2 приведены такие параметры, как влажность, водоудерживающая способность, коэффициент водонасыщения, коэффициент фильтрации лежалых хвостов. Учитывая, что средний размер минеральных зерен хвостов обогащения медно-никелевых руд меньше, чем апатито-нефелиновых, а влажность несвязных и несвязных с глиноподобными прослоями лежалых хвостов сопоставима с влажностью, принятой для расчета пыления [6], можно полагать, что пыление хвостохранилищ может ощущаться на значительных площадях.

Наиболее важные гипергенные процессы в лежалых хвостах обогащения медно-никелевых руд рассмотрены нами в [7]. К ним следует отнести, прежде всего, значительное окисление сульфидных минералов и замеще-

ТАБЛИЦА 2

Некоторые гидрологические свойства лежалых хвостов

Статистический параметр	Влажность, %	Водоудерживающая способность грунта, %	Коэффициент водонасыщения	Коэффициент фильтрации, м/сут
<i>Глиноподобные лежалые хвосты</i>				
$M(x)$	24.829	37.223	0.476	0.208
$Med(x)$	23.46	35.39	0.47	0.30
$S(x)$	7.691	9.692	0.132	0.116
<i>Несвязные лежалые хвосты (аналоги пылеватых песков)</i>				
$M(x)$	10.08	24.83	0.211	25.26
$Med(x)$	8.7	23.31	0.185	18.8
$S(x)$	5.074	8.104	0.098	19.91
<i>Несвязные лежалые хвосты с включениями глиноподобных прослоек</i>				
$M(x)$	13.766	32.628	0.276	0.806
$Med(x)$	11.110	33.265	0.225	–
$S(x)$	7.281	7.602	0.141	–

ние их гидроксидами железа. Этими же процессами можно объяснить и более высокую роль в лежалых хвостах хлоритов и гидрохлоритов. В некоторых пробах обнаруживается присутствие гипса. Сопоставление результатов анализов проб лежалых хвостов и хвостов текущей переработки показало, что

ТАБЛИЦА 3

Статистические параметры распределения содержания некоторых компонентов в лежалых хвостах и прилегающих к хвостохранилищу грунтах

Статистический параметр	Массовая доля компонентов, %				
	Ni	Cu	Co	Fe	MgO
<i>Глиноподобные лежалые хвосты</i>					
$M(x)$	0.166	0.043	0.006	10.811	16.931
$Med(x)$	0.168	0.043	0.006	10.690	17.150
$S(x)$	0.032	0.011	0.001	1.147	1.294
<i>Несвязные лежалые хвосты (аналоги пылеватых песков)</i>					
$M(x)$	0.169	0.061	0.008	11.558	16.623
$Med(x)$	0.167	0.063	0.007	11.365	16.850
$S(x)$	0.033	0.014	0.001	1.068	1.977
<i>Несвязные лежалые хвосты с включениями глиноподобных прослоек</i>					
$M(x)$	0.147	0.048	0.006	10.311	15.700
$Med(x)$	0.160	0.051	0.007	10.930	16.750
$S(x)$	0.049	0.018	0.002	2.418	4.018
<i>Природные грунты</i>					
$M(x)$	0.106	0.039	0.005	8.161	11.236
$Med(x)$	0.089	0.037	0.005	9.900	12.300
$S(x)$	0.093	0.029	0.004	4.346	9.266

значительные отличия наблюдаются в содержании рудогенных элементов – никеля, меди, кобальта и серы, а также железа и оксида магния. В процессе хранения хвостов изменяются не только средние значения содержания рудогенных элементов, но и их форма (соотношение сульфидной и кислородсодержащих фаз). Ослабляется корреляционная связь между содержанием никеля и меди, в то время как аналогичные связи между никелем, с одной стороны, и кобальтом, железом и магнием – с другой, усиливаются. Нарушается и корреляционная связь между содержанием рудогенных элементов и крупностью продукта [7].

Сопоставление статистических параметров распределения содержания никеля, меди, кобальта, железа и оксида магния для лежалых хвостов и прилегающих к хвостохранилищу грунтов показывает, что по среднему содержанию последние наиболее близки к несвязным хвостам с включениями глиноподобных прослоек (табл. 3). В то же время эти выборки имеют значимые различия по критерию Фишера, что вполне естественно, так как загрязнение природных грунтов происходит крайне неравномерно по разным направлениям и на разных расстояниях. Еще большее сходство эти две выборки обнаруживают по соотношению содержаний никеля и меди, никеля и кобальта, никеля и железа, никеля и магния (рис. 3). Надо полагать,

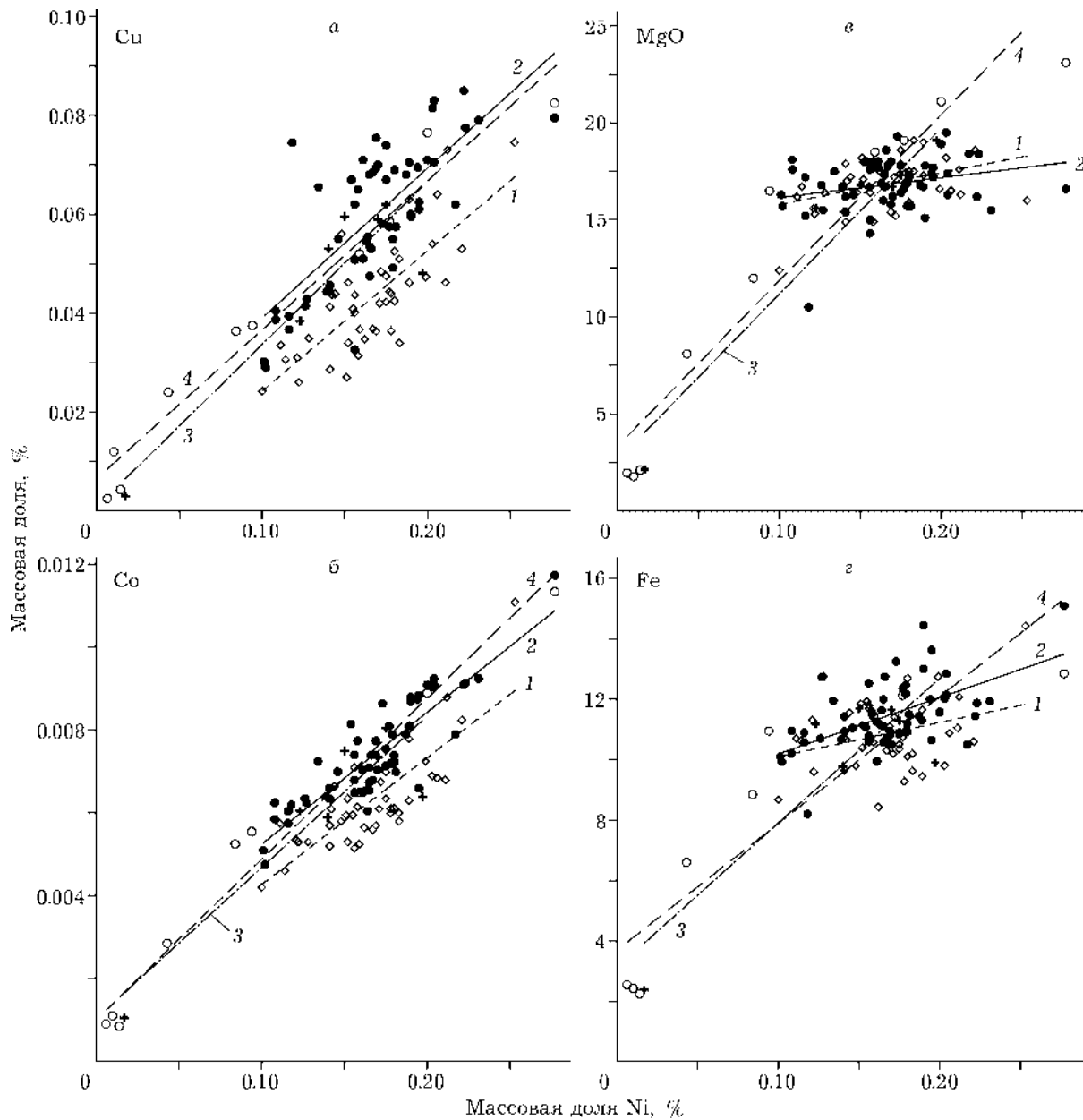


Рис. 3. Соотношения содержаний рудогенных элементов в пробах глиноподобных (1), несвязных (2), несвязных с включениями глиноподобных прослоек (3) лежалых хвостов и природных грунтов вблизи хвостохранилища (4): а - никеля и меди, б - никеля и кобальта, в - никеля и оксида магния, г - никеля и железа.

что именно несвязные хвосты с включениями глиноподобных прослоек были основным источником пыли. В отличие от глиноподобных лежалых хвостов они содержат мало тонкодисперсных частиц, образующих водно-коллоидные связи, но в то же время более богаты пылеватыми фракциями, чем несвязные хвосты (см. рис. 2).

Таким образом, пылящие хвостохранилища выступают серьезным источником загрязнения окружающей среды тяжелыми

металлами. Выпадение пыли в количестве 4–8 г/(м<sup>2</sup>·сут) эквивалентно поступлению в почву 6–12 мг/(м<sup>2</sup>·сут) никеля. Если считать, что бесснежный период в условиях Кольского Заполярья длится не менее 100 суток, а ясные дни составляют примерно треть года, можно считать, что в течение года на каждый квадратный метр почвы может выпасть 200–400 мг этого металла. Если бы никель полностью находился в водорастворимой форме, то на каждый литр выпадающих

ТАБЛИЦА 4

Состав растворов и твердой органической фазы после взаимодействия с сульфидсодержащими продуктами

Номер опыта	Продукт	Содержание в р-ре, мг/л, и массовая доля в тв. фазе, %				Степень извлечения, %			
		Ni	Cu	Fe	Co	Ni	Cu	Fe	Co
1	Раствор	92	025	354	Н.о.	5.52	0.15	4.85	–
	Твердая фаза	0.081	0.016	2.28	Н.о.	0.28	0.558	2.20	–
	<i>Сумма</i>					5.80	0.71	7.05	–
2	Раствор	5.22	0.239	4.20	0.071	0.031	0.144	0.058	0.005
	Твердая фаза	0.154	0.037	2.74	Н.о.	0.86	0.517	3.51	–
	<i>Сумма</i>					0.89	0.66	3.57	–
3	Раствор	0.12	0.395	0.174	0.067	0.53	3.29	0.006	2.98
	Твердая фаза	0.013	0.023	2.28	Н.о.	5.74	19.03	6.69	–
	<i>Сумма</i>					6.27	22.32	6.70	–
4	Раствор	192	117	258	118	11.96	0.73	3.67	0.70

*Примечание.* Опыты № 1–3 проводились в аппарате Сокслета: 1 – сплошная сульфидная руда, фракция <0.071 мм, 2 – то же, фракция 0.1–0.071 мм, 3 – хвосты обогащения медно-никелевых руд, 4 – опыт в термостате, сплошная сульфидная руда, фракция меньше <0.071 мм.

осадков приходилось бы 0.4–0.8 мг никеля, что в 40–80 раз выше ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Представляло интерес определить, насколько быстро и полно поступающий с пылью никель способен перейти в водорастворимую форму. В табл. 4 приведены результаты анализа растворов и твердой органической фазы после обработки сплошной сульфидной руды и хвостов обогащения медно-никелевых руд в аппарате Сокслета, а также раствора после обработки руды водной вытяжкой в термостате. Во всех опытах конечные значения pH раствора оставались в кислой области. Наибольшие значения pH (до 5.3) характерны для опытов с хвостами, наименьшие (<3.8) – для опытов со сплошной сульфидной рудой (фракция меньше 0.071 мм). Как и следовало ожидать, на степень извлечения металлов в раствор заметное влияние оказывает дисперсность материала (оп. № 1 и 2), а также содержание сульфидов в исходном продукте (оп. № 2 и 3). Однако даже при низком содержании сульфидов в исходной твердой фазе концентрация тяжелых металлов в растворе многократно превосходит ПДК для рыбохозяйственных водоемов: кобальта в 7 раз, никеля – в 12, меди в 395 раз. В отличие от случая растворения сульфидов по электрохимическому механизму органогенное разложение сульфидов

не приводит к осаждению гидроксидов железа (микроскопическим анализом их признаки не обнаружены). Основная масса тяжелых металлов в растворе присутствует в составе органоминеральных комплексов и не осаждается традиционными реагентами. Заметное количество тяжелых металлов накапливается в твердом органическом остатке и органической взвеси.

Еще более интенсивное извлечение тяжелых металлов в раствор происходит при обработке сульфидов водной вытяжкой в термостате. Хотя температура в этом эксперименте была на 35–40 °С ниже, чем в предыдущих опытах, а скорость химических реакций снижается с падением температуры на 10 °С в 2–4 раза, извлечение никеля в раствор увеличилось более чем в 2 раза, меди – осталось на прежнем уровне. В то же время извлечение железа снизилось почти вдвое. Надо полагать, что кислая среда и температура были оптимальными для развития микроорганизмов, активизирующих окислительные процессы [8].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты моделирования подтверждают, что попадание сульфидсодержащих отвалных продуктов в почву



приводит к достаточно интенсивному переводу тяжелых металлов в водорастворимую форму. Образующиеся при этом органоминеральные комплексы устойчивы и не поддаются очистке традиционными реагентами.

При взаимодействии органического вещества с сульфидами реализуются как химические обменные реакции, так и биохимические процессы. Для оценки роли каждого из них требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 03-05-96174, гранты № 03-05-96174 и “Ведущие научные школы” НШ-1616.2003.3) и в рамках программы Отделения химии и наук о материалах РАН “Научные основы ресурсо- и энергосбережения в процессах переработки минерального техногенного и возобновляемого сырья”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 N. F. Gray, *Environ. Geology*, 30 (1997) 62.
- 2 F. M. Doyle, *Inst. Min. Metall.*, (1990) 301.
- 3 В. Т. Калинин, В. Н. Макаров, И. П. Кременецкая, *Химия в интересах устойчивого развития*, 5 (1997) 169.
- 4 Ж. Педро, Экспериментальные исследования геохимического выветривания кристаллических пород, Мир, Москва, 1971, 252 с.
- 5 В. С. Савенко, Природные и антропогенные источники загрязнения атмосферы, Итоги науки. Сер. Охрана природы и воспроизводство природных ресурсов, ВИНТИ, Москва, 1991, т. 31, 212 с.
- 6 Т. И. Приймак, А. П. Зосин, Ю. В. Федоренко и др., Экологические аспекты процессов геохимической трансформации хвостов обогащения апатито-нефелиновых руд Хибинского месторождения, изд. КНЦ РАН, Апатиты, 1998, 51 с.
- 7 Д. В. Макаров, В. Н. Макаров, Т. Н. Васильева, Е. Р. Фарвазова, *Инж. экология*, 1 (2004) 18.
- 8 I. F. Walder and P. P. Schuster, Acid Rock Drainage, in: *Environmental Geochemistry of Ore Deposits and Mining Activities*, SARB Consulting Inc., Albuquerque, New Mexico, 1997, pp. 4.1–4.26.