УДК 622.7 : 550.4

Методический подход к оценке интенсивности химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений

С.П. Месяц, С.П. Остапенко
Горный институт КНЦ РАН

Аннотация. Разработан методический подход к оценке интенсивности химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений компьютерным моделированием. Исследованы гидрофизические и теплофизические свойства техногенного сырья Кольского горнопромышленного комплекса. Выполнено обоснование целесообразности создания биогеобарьера для снижения химического выветривания складированного сырья.

Abstract. A methodological approach has been developed in order to make assessment of chemical weathering intensity of stockpiled mineral raw materials with computer modeling. The hydrophysical and thermal physical properties of minerals from stockpiles of the Kola mining industrial complex have been investigated. The feasibility of biogeobarrier for chemical weathering reduction for mineral raw materials of stockpiles from mining has been validated.

Ключевые слова: техногенное месторождение, минеральное сырье, химическое выветривание, равновесный состав, биогеобарьер, основная гидрофизическая характеристика, теплоемкость, теплопроводность, компьютерное физико-химическое моделирование
Key words: reuse of mining wastes, mineral raw materials, chemical weathering, equilibrium composition, biogeobarrier, basic hydrophysical characteristic, thermal capacity, thermal conductivity, computer physical-chemical modeling

1. Введение

В результате некомплексной переработки многокомпонентных руд отходы обогащения складируются в хвостохранилища, представляющие собой техногенные месторождения. На территории Кольского горнопромышленного комплекса к настоящему времени накоплено более 1 млрд тонн техногенного минерального сырья, значительные объемы которого теряются в результате ветровой и водной эрозии.

Для сохранения техногенных месторождений в Горном институте КНЦ РАН разработана технология создания биогеобарьера без нанесения плодородного слоя посевом многолетних трав под полимерным покрытием (рис. 1). В результате создания биогеобарьера прекращаются ветровая и водная эрозии, тем самым обеспечивается сохранение минерального сырья и улучшение экологического состояния территории (*Месяц, Волкова*, 2009).

А

Б

Рис. 1. Техногенное месторождение ОАО "Ковдорский ГОК":
А – пыление хвостохранилища до создания биогеобарьера; Б – откосы ограждающей дамбы после создания биогеобарьера

Кроме ветровой и водной эрозии, причиной потерь складированного минерального сырья является химическое выветривание под воздействием воды и атмосферных газов, приводящее к изменению вещественного состава сырья.

2. Методы исследований

Для исследования интенсивности химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений использован метод компьютерного физико-химического моделирования равновесного состава минеральных и водной фаз по термодинамическим потенциалам минералов, атмосферных газов, компонентов водного раствора путем минимизации свободной энергии Гиббса (*Шоба, Карпов*, 2004). Структура проведенных исследований представлена в виде блок-схемы на рис. 2.

Рис. 2. Методический подход к оценке интенсивности химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений

Достоверность прогноза обеспечена использованием экспериментально определенных влажности и температуры минерального сырья техногенных месторождений. Предлагаемый методический подход к прогнозированию химического выветривания учитывает взаимосвязь между параметрами (термодинамическими, гидро- и теплофизическими) минерального сырья техногенных месторождений и действующими факторами химического выветривания, в конкретных условиях складирования сырья.

3. Объекты исследований

Объекты исследований – складированные отходы обогащения многокомпонентных руд ОАО "Апатит", ОАО "Ковдорский ГОК", ООО "Ловозерский ГОК", являющиеся техногенными месторождениями (табл. 1).

Хвостохранилище второй обогатительной фабрики ОАО "Апатит" является тестовым объектом; данные многолетнего мониторинга биогеобарьера хвостохранилища ОАО "Апатит" использованы при разработке методического подхода к прогнозированию химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений.

Таблица 1. Характеристика техногенных месторождений

Техногенное месторождение	Масса складированного техногенного минерального сырья, млн т	Основные минеральные компоненты	Промышленно-перспективные минералы
Действующее хвостохранилище ОАО "Апатит"	866	нефелин, полевой шпат, пироксен, сфен, апатит	апатит, нефелин, сфен, полевой шпат
Действующее хвостохранилище ОАО "Ковдорский ГОК"	221	форстерит, магнетит, кальцит, флогопит, апатит	апатит, форстерит, кальцит, магнетит
Отработанное хвостохранилище ЗАО "Ловозерский ГОК"	6.7	нефелин, пироксен, эгирин, полевой шпат, апатит, эвдиалит	эвдиалит, апатит, нефелин

4. Параметризация расчетных моделей

Для выделения однородных зон увлажнения минерального сырья техногенных месторождений изучены его гидрофизические параметры. Экспериментальным путем получены необходимые для моделирования движения влаги параметры уравнения "основной гидрофизической характеристики" (ОГХ) и функции влагопроводности минерального сырья в поверхностном слое техногенных месторождений на глубину до 1.5 м (табл. 2).

Таблица 2. Гидрофизические параметры минерального сырья техногенных месторождений в поверхностном слое (рассчитаны по экспериментальным данным)

Техногенное месторождение	Параметры уравнения ОГХ		Параметры уравнения функции влагопроводности	
	Обратное капиллярно-сорбционное давление входа воздуха в заполненные водой капилляры, 1/мбар	Тангенс угла наклона касательной к кривой ОГХ (крутизна)	Влагопроводность при насыщении капилляров водой, $*10^6$ м/сек	Безразмерный параметр, характеризующий извилистость и связность пор
ОАО "Апатит"	0.08	2.2	2.5	2.96
ОАО "Ковдорский ГОК"	0.04	2.0	6.53	0.51
ЗАО "Ловозерский ГОК"	0.04	2.2	2.25	3.16

Параметры уравнения ОГХ и значения параметров функции влагопроводности в поверхностном слое хвостохранилищ ОАО "Апатит", ЗАО "Ловозерский ГОК" близки (табл. 2), что связано с близостью гранулометрического состава складированного минерального сырья. Отличие значений параметров уравнения функции влагопроводности минерального сырья в поверхностном слое хвостохранилища ОАО "Ковдорский ГОК" объясняется присутствием слоистых алюмосиликатов, меняющих структуру порового пространства. Для параметризации расчетной модели химического выветривания экспериментальным и расчетным методами определены теплофизические параметры минерального сырья в поверхностном слое техногенных месторождений (табл. 3). Полученные величины согласуются с литературными данными о значениях коэффициентов теплопроводности и теплоемкости горных пород (*Петрофизика*, 1992).

Таблица 3. Теплофизические параметры минерального сырья техногенных месторождений в поверхностном слое в сухом состоянии

Техногенные месторождения	Теплофизические параметры	
	Коэффициент теплопроводности λ_T, Вт/(м*К)	Теплоемкость C_V*10^6, Дж/(м^3*К)
ОАО "Апатит"	0.13	1.5
ОАО "Ковдорский ГОК"	0.20	1.1
ЗАО "Ловозерский ГОК"	0.16	2.2

Низкая теплопроводность воздуха, заполняющего межчастичные пустоты, и мелкодисперсный гранулометрический состав минерального сырья приводят к быстрому затуханию теплового потока от поглощенной солнечной радиации в поверхностном слое техногенного месторождения.

Зависимость коэффициента теплопроводности от влажности исследована на примере техногенного минерального сырья ОАО "Апатит" (рис. 3).

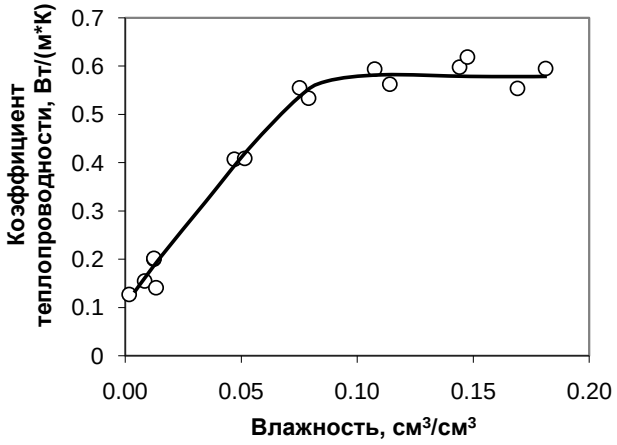

Рис. 3. Зависимость величины коэффициента теплопроводности минерального сырья ОАО "Апатит" от влажности

По мере увеличения объемного содержания влаги коэффициент теплопроводности возрастает за счет увеличения числа и площади контактов частиц при гидратации их поверхности. Одновременно с этим, вклад в увеличение коэффициента теплопроводности вносит паропеpенос в незаполненных влагой капиллярах. Теплопроводность достигает максимальных значений при объемном содержании влаги 10 %, которое использовано в качестве экспериментальной оценки влажности разрыва капилляров.

Влияние биогеобарьера на температурный режим минерального сырья в поверхностном слое изучено в полевых условиях в ходе суточного мониторинга температуры на глубину до 1.5 м на действующих хвостохранилищах ОАО "Апатит" и ОАО "Ковдорский ГОК". Для этого были разработаны прецизионные (точность измерения температуры 0.05 °С) температурные датчики. Установлено, что наличие биогеобарьера обусловливает уменьшение среднесуточной температуры на глубине до 0.5 м (результаты обработки данных мониторинга температуры в поверхностном слое хвостохранилища ОАО "Апатит" приведены в табл. 4).

Таблица 4. Усредненные суточные значения температуры в поверхностном слое минерального сырья хвостохранилища ОАО "Апатит" при наличии биогеобарьера и без него

Глубина слоя, м	Температура, °С	
	Без биогеобарьера	При наличии биогеобарьера
0.00	24.6	22.5
0.25	16.9	13.5
0.50	12.4	10.0
1.00	8.4	8.1
1.50	5.9	5.3

На глубине от 1.0 м до 1.5 м температура минерального сырья техногенного месторождения ОАО "Апатит" при наличии биогеобарьера и без него практически одинаковы, что позволяет использовать для расчетов химического выветривания на глубинах больших 1.5 м данные о зональных температурах грунтов. По данным наблюдений, характер влияния биогеобарьера на температурный режим в поверхностном слое одинаков для хвостохранилищ ОАО "Апатит" и ОАО "Ковдорский ГОК".

5. Исследование интенсивности химического выветривания техногенного минерального сырья в поверхностном слое

Физико-химическое компьютерное моделирование выветривания минерального сырья техногенного месторождения ОАО "Апатит" выполнено на основе программы "Селектор" (Институт геохимии СО РАН). Степень химического выветривания техногенного минерального сырья определялась как доля массы реагирующей твердой фазы, при которой достигалось значение pH = 7 в равновесном с ней водном растворе. Химический состав минерального сырья моделировался 14-ти элементной системой H – C – N – O – F – Na – Mg – Al – Si – P – K – Ca – Fe – Sr, учитывающей в сумме оксидов элементов ~90 % массы сырья (для хвостохранилища ОАО "Апатит"). Водородный показатель равновесных водных растворов при наличии биогеобарьера и без него по данным полевых наблюдений и лабораторных исследований водных вытяжек близок к нейтральному значению ≈7.

При наличии биогеобарьера минеральный субстрат взаимодействует с водным раствором, прошедшим через биогеобарьер, поэтому модель дополнялась расчетными термодинамическими данными об органических веществах биогеобарьера – органоминеральных соединений гуминовых и фульвокислот.

Для расчетов степени химического выветривания минерального сырья техногенного месторождения разработана и верифицирована послойно-динамическая модель, составленная из последовательно примыкающих друг к другу слоев минерального сырья и водных растворов, находящихся в состоянии химического равновесия с каждым слоем.

При просачивании дождевых вод в поверхностном слое техногенного месторождения происходит изменение pH водного раствора до некоторой равновесной величины, обусловленной растворением твердой фазы, степенью ее химического выветривания, образующимися продуктами выветривания. Поскольку изученные силикатно-карбонатные минеральные системы представлены солями слабых кремниевой и карбоновой кислот и сильных оснований щелочных и щелочноземельных металлов, отклонение равновесной величины pH от нейтрального pH = 7 использовано в качестве интегральной оценки изменения вещественного состава техногенного минерального сырья при выветривании (рис. 4).

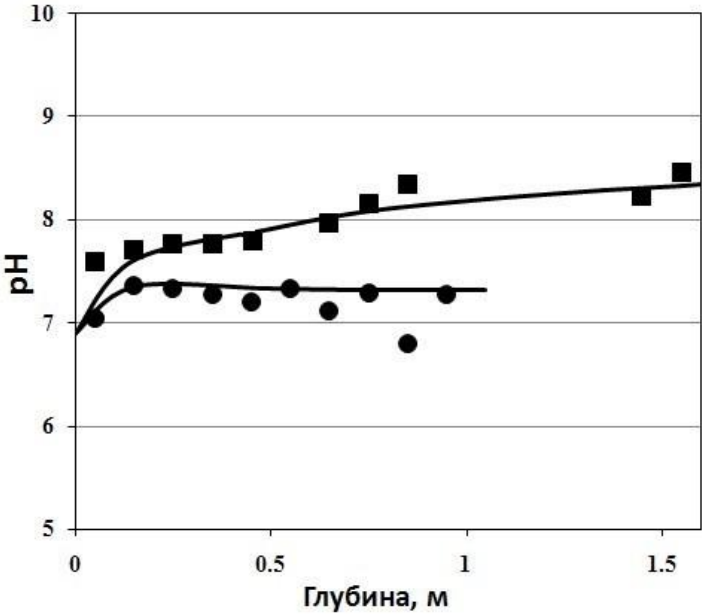

Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) значения pH равновесного раствора в поверхностном слое действующего хвостохранилища ОАО "Апатит".
Обозначения: ■ – без биогеобарьера, ● – при наличии биогеобарьера

Приведенные на рис. 4 зависимости расчетных и экспериментальных значений pH равновесных водных растворов без биогеобарьера и при наличии биогеобарьера, полученные в конкретных условиях протекания химических реакций по глубине до 1.5 м, находятся в хорошем соответствии, что свидетельствует о непротиворечивости результатов, полученных с использованием методического подхода, и экспериментальных данных.

6. Зонирование техногенного месторождения по влагосодержанию

Выполнена оценка распределения влаги в объеме хвостохранилища, являющегося гидротехническим сооружением.

Расчетами установлены положение кривой депрессии, пространственное распределение влагосодержания в поперечном разрезе на примере хвостохранилища ОАО "Апатит". В качестве граничных условий использованы данные мониторинга влажности в поверхностном слое хвостохранилища. Рассмотрены два варианта: действующее хвостохранилище с биогеобарьером на откосах ограждающей дамбы и выведенное из эксплуатации (отработанное) хвостохранилище при наличии биогеобарьера на всей площади хвостохранилища. Выделены три зоны разреза хвостохранилища, различающиеся содержанием воды и доступностью для атмосферных газов – основных факторов химического выветривания (рис. 5).

Зона просачивания характеризуется вертикальным перемещением влаги дождевых осадков, объемное содержание влаги в этой зоне техногенного месторождения составляет менее 10 %. Зона капиллярного подъема отличается перемещением влаги против силы гравитации, объемное содержание влаги в ней составляет 10÷46 %. В совокупности зона просачивания и зона капиллярного подъема составляют зону аэрации. Зона полного влагонасыщения расположена непосредственно под зоной аэрации. В пределах этой зоны влага перемещается под действием силы гравитации в сторону разгрузки. Объемное содержание влаги достигает предельного значения 46 %, что соответствует полному вытеснению газов и заполнению влагой межчастичного пространства складированного сырья.

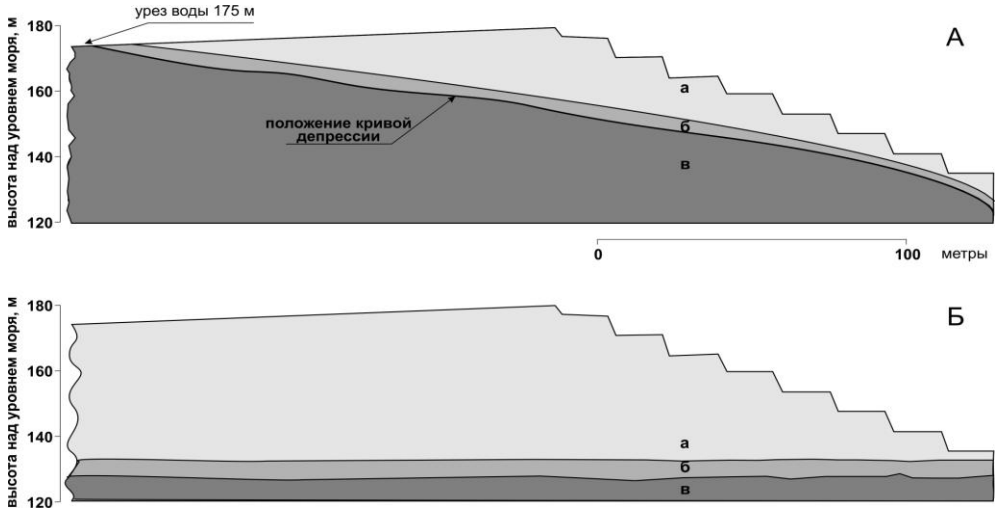

Рис. 5. Схематический поперечный разрез ограждающей дамбы хвостохранилища АНОФ-2 ОАО "Апатит" при наличии биогеобарьера: А – действующее; Б – отработанное хвостохранилища; а – зона просачивания; б – зона капиллярного поднятия; в – зона полного влагонасыщения

7. Результаты оценки интенсивности химического выветривания техногенного минерального сырья в разных условиях увлажнения

Как показали расчеты, наиболее интенсивно выветривание техногенного минерального сырья со степенью химического выветривания ~10^{-5} происходит в зоне капиллярного поднятия при взаимодействии минерального сырья с водой и атмосферными газами. В зоне полного влагонасыщения степень химического выветривания минерального сырья, составляющая ~10^{-7}, на два порядка ниже, чем в зоне капиллярного поднятия, что объясняется анаэробными условиями.

Степень химического выветривания минерального сырья в зоне просачивания техногенного месторождения при наличии биогеобарьера составляет ~10^{-9}, что на четыре порядка меньше, чем без биогеобарьера (~10^{-5}) (рис. 6).

Создание биогеобарьера прекращает химическое выветривание складированного техногенного минерального сырья в зоне аэрации. В варианте действующих хвостохранилищ биогеобарьер, созданный на откосах ограждающей дамбы, согласно проведенным расчетам прекращает процессы выветривания в значительной ее части (рис. 6А). Создание биогеобарьера на всей поверхности отработанного хвостохранилища прекращает химическое выветривание выше уровня грунтовых вод, обеспечивая сохранение складированного минерального сырья и неизменность его механических и фильтрационных свойств (рис. 6Б).

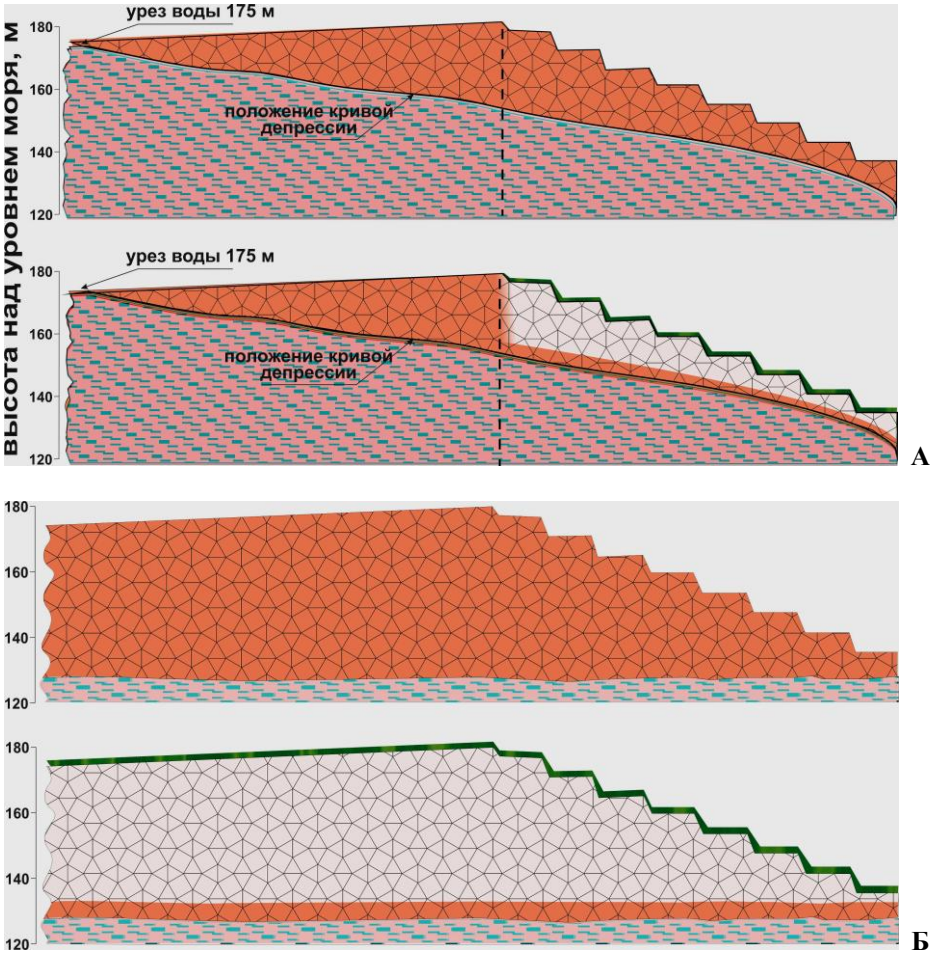

Рис. 6. Прогнозная оценка интенсивности химического выветривания складированного минерального сырья действующего хвостохранилища ОАО "Апатит" (А) и отработанного хвостохранилища (Б) без биогеобарьера и при наличии биогеобарьера

Степень химического выветривания: 10^{-5} 10^{-7} 10^{-9}

Биогеобарьер:

Выделенные зоны хвостохранилища: – зона аэрации; – зона полного влагонасыщения

8. Заключение

Разработан методический подход к прогнозированию химического выветривания минерального сырья техногенных месторождений, учитывающий взаимосвязь между параметрами минерального сырья техногенных месторождений и действующими факторами химического выветривания, обусловленную вещественным и дисперсным составами и условиями складирования сырья.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о целесообразности создания биогеобарьера для предотвращения потерь минерального сырья техногенных месторождений в результате как ветровой и водной эрозии, так и химического выветривания. Создание биогеобарьера обеспечивает сохранение минерального сырья техногенных месторождений на длительную перспективу.

Литература

Месяц С.П., Волкова Е.Ю. Технология консервации промышленных отходов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, с. 106-116, 2009.

Петрофизика: Справочник. В 3-х книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые. *Под ред. Н.Б. Дортман. М., Недра*, с. 240-244, 1992.

Шоба В.Н., Карпов И.К. Физико-химическое моделирование в почвоведении. *Новосибирск, Изд-во Института почвоведения и агрохимии СО РАН*, 187 с., 2004.