

УДК 622.83:621.271

**СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
ПУТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ КОМПОНЕНТОВ**

А. Г. Михайлов, М. Ю. Харитонов, И. И. Вашлаев, М. Л. Свиридова

*Институт химии и химической технологии СО РАН, E-mail: mag@icct.ru,
ул. Академгородок, 50, стр. 24, 660036, г. Красноярск, Россия*

Проведена экспериментальная оценка предварительного обогащения в слое сорбционного коллектора при фильтрации водных растворов солей малой концентрации извлекаемых компонентов. Сорбционные коллекторы, представленные прослоями бурого угля, торфа, мрамора и вермикулита, размещены в составе испарительного барьера в приповерхностной зоне аэрации массива. Исследованы накопительные свойства геохимических сорбционных барьеров. В качестве мигрирующего раствора использованы водные растворы солей нитратов кобальта и никеля. Установлена возможность формирования зон обогащения при восходящей капиллярной фильтрации растворов через сорбционные барьеры в зоне аэрации массива.

Геохимический сорбционный барьер, водный раствор, фильтрация, концентрирование, зона аэрации

Фильтрационное движение растворов в массивах как природных, так и техногенных происходит постоянно. В участках массива, свойства которых обеспечивают задерживание соединений полезных компонентов, происходит их накопление. Концентрация полезных компонентов на таких участках с течением времени будет расти, и после превышения минимально промышленных значений этот участок становится пригодным для освоения. При управляемости фильтрационного накопления полезных компонентов этот процесс может стать стадией предварительного обогащения в технологии освоения месторождения. Кроме того, стадия предварительного обогащения может выполнять функцию изоляции вредных отходов добычи и переработки полезных ископаемых.

В массивах складирования отходов переработки, как правило, не учитываются закономерности движения растворов и не выполняются мероприятия по установлению направленности движения. В случае управляемости этим процессом при использовании закономерностей формирования зон повышенной концентрации на участках массивов можно проводить предварительное обогащение компонентов с последующим эффективным их извлечением. Вовлечение техногенных отходов в повторное эффективное освоение не только послужит резервом добычи минерального сырья, но и снизит опасность загрязнения окружающей среды.

Содержание растворенных солей в подземных водах чаще всего невысокое и при направлении движения от источников приводит к рассеиванию. Попадая в области массива, способствующие накапливанию, формируются фильтрационные зоны повышенных концентраций [1]. Природные зоны аккумуляции полезных компонентов в массиве называют геохимическими барьерами. Их свойство состоит в резком уменьшении интенсивности миграции химических элементов и, как результат, их накоплении [2]. Принципиальная возможность формирова-

ния зон концентраций тех или иных элементов в массиве существуют всегда, но точно прогнозировать место, сроки формирования и уровень концентрации весьма сложно. Если на пути движения вод создавать искусственные геохимические барьеры, то можно целенаправленно управлять процессами миграции и накапливать нужные вещества в нужном месте. Приближением к управляемости таким процессом может служить эксперимент. Достаточно распространенным приемом является геохимический барьер для локализации загрязнений. Противофильтрационные свойства барьеров позволяют предупреждать проникновение загрязняющих веществ в подземные воды путем перевода их в малоподвижные формы [3–6]. Также целью создания искусственных барьеров является аккумуляция веществ на определенных ограниченных в пространстве участках для их дальнейшего извлечения.

В работе [7] показано, что путем создания искусственного геохимического карбонатного барьера на пути движения медьсодержащих растворов возможно существенно снизить затраты на обогащение при отработке штабелей и хвостохранилищ, отвалов забалансовых руд, техногенных месторождений. Концентрирование веществ на сорбционном барьере предполагается использовать как подготовительную операцию перед процессом обогащения, которая позволит увеличить концентрацию ценных компонентов до проведения процесса основного обогащения, а также снизить затраты на обогащение за счет переработки более богатых продуктов, а не всего объема хвостов (добытой горной массы), содержащей полезное ископаемое. Эта стадия обогащения, частично или полностью перенесенная в недра, может стать эффективным направлением развития технологии разработки месторождений [8].

В качестве примера рассмотрим технологию освоения малых по запасам и расположенных близко к поверхности месторождений, разработанную в [9]. При отработке таких месторождений в качестве операции обогащения используется концентрирование золота на поверхностном геохимическом барьере. Однако широкое применение геохимических барьеров сдерживается отсутствием решения ряда задач. В связи с этим была поставлена цель изучить закономерности формирования зон повышенной концентрации в поверхностной зоне аэрации. Полученные результаты позволят обоснованно выбрать дальнейшее направление технологических исследований.

В данной статье представлены результаты моделирования по предварительному обогащению в массиве с созданием зоны повышенной концентрации кобальта и никеля в искусственном сорбционном барьере и выявлены закономерности концентрирования веществ.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В колонну высотой 24 см, заполненную кварцевым песком ($-0.5+0.2$ мм), снизу (сосуд Мариотта) подавался раствор (рис. 1). В качестве раствора использованы неконцентрированные водные растворы нитрата никеля (II) и нитрата кобальта (II) с исходными концентрациями: 82 г/л нитрата кобальта и 80 г/л нитрата никеля. Уровень подачи раствора соответствовал дну колонны, раствор поднимался по капиллярам к поверхности только за счет сил поверхностного натяжения. В приповерхностной зоне экспериментальной установки раствор испарялся, освобождая объем в капиллярах для поступления следующих порций раствора. В средней части зоны аэрации в колонне укладывался горизонтально геохимический барьер из природного материала, обладающего сорбционными свойствами, — мрамор, торф, бурый уголь, вермикулит. Толщина сорбционного слоя 5 см, что составляет $\sim 20\%$ высоты зоны аэрации. Размер капилляров сорбционного слоя сопоставим с таковым капилляров песка. При фильтрации снизу вверх раствор проходит через слой природного материала, меняя концентрацию элементов до и после барьера. Таким образом было заложено 8 колонн с разными сорбционными барьерами.

Выбор направления движения растворов снизу вверх связан с необходимостью формировать повышенные зоны концентрации вблизи с поверхностью или на ней. Раствор с основания будет подниматься по капиллярам к дневной поверхности за счет капиллярных сил без привлечения дополнительных ресурсов, что в целом снизит затраты на обогащение. Использование в эксперименте в качестве сорбентов природных веществ обусловлено их широким распространением и относительно низкой стоимостью. При этом при использовании отходов производства кроме низкой стоимости решается экологическая задача утилизации отходов.

В ходе эксперимента фиксировались следующие кинетические параметры: объем израсходованного раствора, температура окружающего воздуха, влажность воздуха, атмосферное давление. После поступления в колонну заданного количества раствора подачу останавливали, материал высушивали естественным образом и подвергали вещественному и структурному анализу с целью оценки распределения осадков соли в объеме пористого тела.

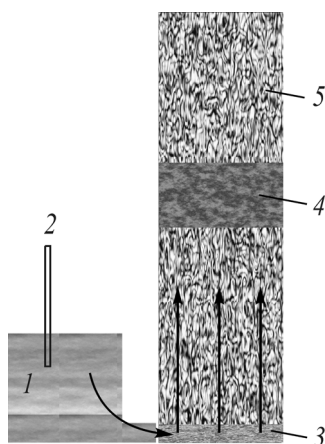


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — емкость с исходным раствором; 2 — регулятор уровня раствора; 3 — гравитационный слой; 4 — сорбционный прослой; 5 — песок

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характер распределения нитрата Со и нитрата Ni во всех экспериментах идентичен, поэтому приведены закономерности распределения нитрата Со.

В условиях восходящего подъема раствора с фильтрацией через слой мраморного песка распределение содержания нитрата Со по высоте зоны аэрации близко к линейному и характеризуется равномерно убывающим по направлению к поверхности (рис. 2а, кривая 1). Геохимический барьер в виде прослоя мрамора практически не обладает сорбционными свойствами и не оказывает влияния на характер распределения нитрата Со по высоте зоны аэрации.

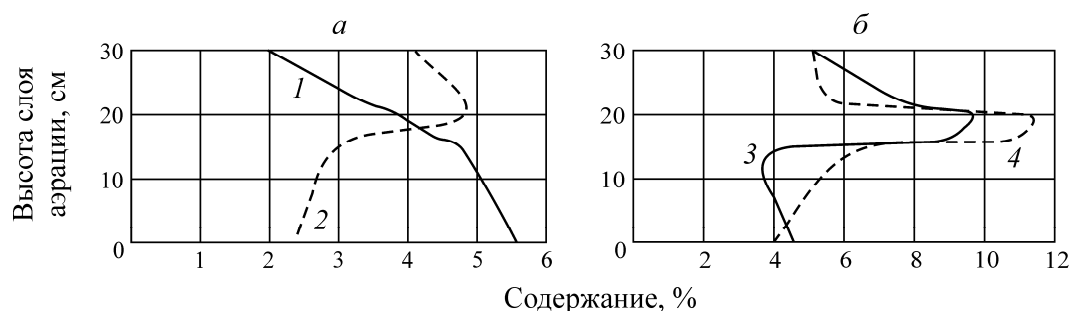


Рис. 2. Распределение содержания $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ в зоне аэрации в колонне с прослоем: 1 — мрамора; 2 — угля (а); 3 — торфа; 4 — вермикулита (б)

Для варианта восходящего подъема раствора по зоне аэрации с геохимическим барьером из бурого угля Березовского месторождения распределение содержания нитрата Со и нитрата Ni характеризуется наращиванием концентрации в колонне до прослоя и повышением концентрации нитрата к верхней границе слоя угля (рис. 2а, кривая 2). В зоне выше прослоя происходит линейное снижение содержания нитрата вплоть до поверхности. На поверхности колонны за весь срок проведения эксперимента отмечено невысокое содержание нитрата Со. Слой угля способствует частичному восстановлению содержания Со благодаря переносу его по ходу движения раствора с нижних слоев к верхним.

При восходящем движении раствора нитрата Со через геохимический барьер торфа (торф Сейбинского месторождения) отмечено повышение его содержания более чем в 2 раза (рис. 2б, кривая 3). Практически весь слой материала торфа имеет повышенное содержание нитрата Со. Предположительно, гуминовые кислоты осуществляют хемосорбционное концентрирование и способствуют иммобилизации нитрата Со в виде комплексных соединений.

Близкие по характеру распределения содержания нитрата Со получены в эксперименте с геохимическим барьером, представленным прослоем вспученного вермикулита (месторождение “Северный участок” в Нижнем Приангарье) (рис. 2б, кривая 4). Отмечено трехкратное повышение содержания нитрата Со в сорбционном слое. Благодаря нейтральным свойствам вермикулита, развитая микро-, мезо- и макропористость материала прослоя обуславливает накопление нитрата Со в слое.

Скорости движения растворов по зоне аэрации тесно связаны с показателем атмосферной влажности (коэффициент парной корреляции $r \approx 0.8-0.9$). Отмечен тренд снижения скорости во времени после первого месяца в условиях продолжительного эксперимента. Изменение скорости капиллярного подъема раствора в эксперименте с прослоем угля приведен на рис. 3. По другим геохимическим барьерам зависимости скорости фильтрации от времени аналогичные и здесь не приводятся.

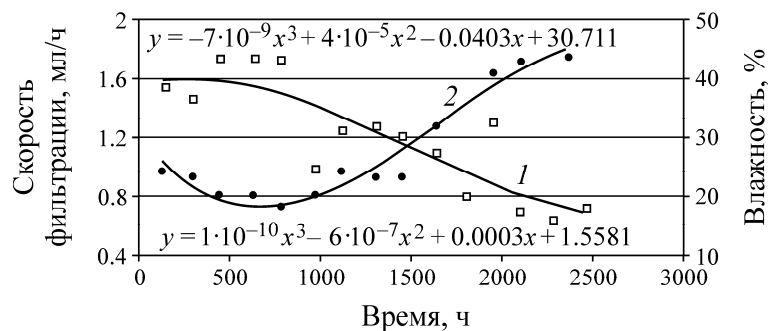


Рис. 3. Изменение скорости фильтрации раствора $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ с геохимическим барьером из угля на фоне изменения влажности атмосферы в течение времени эксперимента: 1 — скорость фильтрации; 2 — влажность

Многофакторная модель скорости фильтрации имеет следующий вид:

прослой вермикулита ($R = 0.84$):

$$v = 0.976 - 0.023w + 0.054t - 0.0001 \ln T;$$

прослой угля ($R = 0.86$):

$$v = -5.7326 - 0.0004 T + 0.0099 P;$$

прослой торфа ($R = 0.83$):

$$v = 1.422 - 0.017w + 0.01t - 0.0001 T.$$

где w — влажность, %; T — продолжительность процесса, ч; t — температура воздуха, °С; P — атмосферное давление, мм рт.ст.

ВЫВОДЫ

В ходе экспериментальных исследований фильтрации растворов через сорбционный коллектор в составе испарительного барьера в зоне аэрации массива установлено, что при восходящем капиллярном подъеме растворов происходит перераспределение компонентов с 1.5–3-кратным накоплением нитрата кобальта в слое со свойствами нейтрального сорбента. Уровень накопления (концентрация) в сорбционном барьере не зависит от места расположения сорбционного слоя в зоне аэрации массива. Эксперименты с прослоями из торфа, угля показали возможность аккумулировать нитрат кобальта (нитрат никеля) из раствора, создавая, предположительно, частично комплексное соединение (до 10–12 %).

Сорбционный барьер из слоя мрамора со свойствами проницаемости, равной проницаемости слоя массива, в условиях эксперимента практически не формирует зону обогащения. Закономерности распределения в этом случае аналогичны общим закономерностям, присущим испарительному барьеру зоны аэрации. Сорбция нитратов кобальта и никеля в сорбционных барьерах угля и вспученного вермикулита не одинакова. Тем не менее их содержание в сорбционных прослоях превышает в 2–3 раза содержание нитратов в зоне аэрации без сорбционных прослоев.

Технологическая возможность сорбционных прослоев в составе испарительных барьеров зоны аэрации доказывает необходимость их использования в качестве предварительной стадии обогащения. Создание искусственных барьеров (сорбционный, испарительный) на пути движения растворов позволит обогащать материал сорбционного барьера полезным компонентом с последующим его извлечением в обогатительном переделе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А. Г., Харитонов М. Ю., Вашлаев И. И., Свиридова М. Л. Исследование подвижности водорастворимых форм цветных и благородных металлов в массиве лежалых хвостов обогащения // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 188–195.
2. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. — М.: Географиздат, 1961. — 340 с.
3. Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафтов: учеб. пособие. — М.: Астрей-2000, 1999. — 786 с.
4. Бочкарев Г. Р., Пушкарева Г. И., Ростовцев В. И. Интенсификация процессов рудоподготовки и сорбционного извлечения металлов из техногенного сырья // ФТПРПИ. — 2007.— № 3. — С. 53–61.
5. Изотов А. А., Ковердяев О. Н., Вершинина О. О. Способы снижения воздействия дренажных вод на окружающую среду в горнодобывающих районах // Горн. журн. — 2006. — № 10. — С. 103–106.
6. Каймин Е. П., Захарова Е. В., Константинова Л. И., Зубков А. А., Данилов В. В. Использование кремневой кислоты для создания противофильтрационной завесы в песчаном горизонте // Геоэкология. — 2007. — № 2. — С. 137–142.
7. Жижаяев А. М., Брагин В. И., Михайлов А. Г. Осаждение меди с использованием природных карбонатов кальция // Обогащение руд. — 2001. — № 5. — С. 13–17.
8. Трубецкой К. Н., Пешков А. А., Мацко Н. А. и др. Перспективные технологии искусственного продолжения формирования месторождений полезных ископаемых // Развитие новых научных направлений и технологий освоения недр Земли: материалы юбилейной сессии ОГГГН РАН. — М., 2000. — С. 59–71.
9. Михайлов А. Г. Геотехнологическая подготовка россыпных техногенных месторождений // Экология и природопользование. — Днепропетровск. — 2013. — Вып. 16. — С. 46–54.

Поступила в редакцию 15/III 2016