

ИЗУЧЕНИЕ РОЛИ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПРОЦЕССАХ ДЕСТРУКЦИИ ПРИРОДНЫХ ФОСФОРИТОВ ДЖЕРОЙ-САРДАРЬИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Н. А. ТРИФОНОВА, научный сотрудник, канд. геол.-минерал. наук, М. В. ЧУБИК, доцент, канд. мед. наук
(Томский политехнический университет)

Развитие агропромышленного комплекса невозможно без применения технологий, улучшающих качество почв. Одним из широко известных приемов является внесение удобрений, содержащих биогенные элементы, необходимые для активного развития растений. Фосфор является вторым по значению после азота элементом в питании растений.

Основным источником получения фосфорных удобрений служат фосфоритовые и апатитовые руды. Богатые руды, содержащие более 20 % фосфора, постоянно истощаются, поэтому требуется расширить рудную базу за счет переработки разнообразных по минеральному составу и физико-химическим свойствам руд. Наиболее энергоемким в общей технологической схеме переработки фосфоритовых руд является процесс отделения фосфоритов от пустой породы, на который затрачивается от 54 до 78 % энергии.

Поэтому актуальным является освоение новых высокоэффективных и экологически безопасных методов переработки фосфоритовых руд, в том числе нетрадиционных, в частности, включение в технологический цикл микробиологического звена.

В настоящей статье представлены результаты изучения роли микроорганизмов в процессах деструкции фосфоритов Джерой-Сардарьинского месторождения.

Основная цель исследований заключалась в выявлении изменений, происходящих в фосфоритовых рудах под воздействием бактериального фактора. При этом были поставлены следующие задачи:

исследовать физико-химические параметры фосфоритовых руд;

изучить общий групповой и количественный состав микрофлоры фосфоритовых пород;

выделить штаммы бактерий, способствующих разрушению фосфоритовых руд;

экспериментально определить геохимическую активность бактерий в процессах растворения фосфоритовых руд Джерой-Сардарьинского месторождения.

Физико-химические свойства и минералогические особенности джерой-сардарьинских фосфоритов и жидкой фазы изучали по известным методам [1–4], включая рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы. Микробиологические исследования руд осуществляли методами, общепринятыми в микробиологии [5, 6]. Выделение бактериальных штаммов, использованных в дальнейшем в экспериментах по изучению микробного воздействия на фосфориты, а

также постановку экспериментов проводили по известным схемам [7].

Характер изменений, происходящих с фосфоритовой рудой в результате бактериального воздействия, определяли методом термического напыления в вакууме слоя серебра толщиной 20–30 нм с последующим исследованием в растровой приставке ASID-4D (JEOL, Япония) к электронному микроскопу JEM-100 CXII (JEOL, Япония) при ускоряющем напряжении 20 кВ [8].

Основным фосфорсодержащим минералом в руде является франколит. В меньшем количестве содержатся фторкарбонатапатит и фторкарбонатгидроксипатит. Из сопутствующих минералов присутствуют гипс, урановые гидрослюды, глауконит, гидрослюды, гидроксиды железа.

Химический состав руд следующий, %: 13,46 P_2O_5 ; 50,8 CaO; 3,03 Fe_2O_3 ; 0,11 — органическое вещество. Потери при прокаливании — 17,8 %; pH водной вытяжки — 7,3; естественная влажность — 7,5 %.

Результаты микробиологических исследований, направленных на определение бактерий, участвующих в геохимическом цикле углерода, азота, железа, серы, показали, что джерой-сардарьинские фосфориты являются средой обитания микроорганизмов различных физиологических групп.

В микробном ценозе фосфоритовой руды (см. таблицу) численно преобладают бактерии, участвующие в минерализации органического вещества. В значимых количествах присутствуют железобактерии, нитрифицирующие и тионовые.

Своеобразие физико-химических свойств джерой-сардарьинских фосфоритов является причиной нарушения технологического процесса при обогащении руд на Джерой-Сардарьинском ГОКе: в связи с высокой карбонизацией фосфоритов снижается эффективность кислотной обработки; уменьшается производительность процесса за счет пенообразования; возрастает расход кислоты и, как следствие, усиливается неблагоприятное воздействие на окружающую среду.

С целью определения перспективности использования микроорганизмов при обогащении фосфоритовых руд Джерой-Сардарьинского месторождения был проведен ряд экспериментов. В качестве катализаторов-деструкторов использовали накопительные культуры следующих бактерий: автохтонных; органотрофных — кислотослизеобразователей, выделенных путем заражения среды Новогрудского с $Ca_3(PO_4)_2$ [9] навеской джерой-сардарьинского фосфорита (Т:Ж = 1:10);

**Состав микрофлоры фосфоритовой руды
Джерой-Сардаринского месторождения**

Бактерии	Численность, тыс. кл/г
Бактерии, использующие энергию деструкции органического вещества (ОВ):	
усваивающие ОВ окружающей среды (автохтонные)	648
способные использовать атмосферный азот и его следовые количества в окружающей среде	194
усваивающие азотсодержащие ОВ (белки, аминокислоты и др.)	140
использующие безазотистые ОВ (углеводы, спирты)	210
Бактерии, использующие энергию трансформации неорганических соединений:	
железобактерии ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$)	34
нитрифицирующие бактерии ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$)	4,5
тионовые бактерии ($\text{H}_2\text{S}^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$)	0,01–0,1

тионовых (*Thiobacillus thioparus*), выращиваемых при инокуляции стерильной среды Бейеринка с тиосульфатом [7] аликвотой фосфорита (Т:Ж = 1:10).

Навески фосфоритовой руды, используемой в экспериментах, стерилизовали во флаконах добавлением 72 %-ного спирта с последующей сушкой при температуре 60 °С.

Размер зерен руды составлял $-3+1,5$ мм. Выщелачивающие растворы в опытах соответствовали ионно-солевому составу питательных сред, используемых для выявления вышеназванных микроорганизмов.

Соотношение Т:Ж в опытах составляло 1:3, т. е. к 1,6 г стерильной руды асептически добавляли 4 мл питательной среды без фосфатов и 1 мл накопительной куль-

туры бактерий (плотностью 1×10^6 кл/мл). Исключая из состава питательных сред растворимый фосфор, авторы преследовали цель установить способность микроорганизмов извлекать его из испытуемых фосфоритов.

В серии с автохтонными бактериями навески руды не подвергали стерилизации, а заливали стерильной бесфосфорной средой, содержащей минеральные компоненты [10]. В контрольных вариантах в стерильную руду (1,6 г) заливали 5 мл стерильной дистиллированной воды. Число дублирующих опытов в каждой серии равнялось трем.

Опыты проводили стационарно, без принудительной аэрации. По мере испарения раствора его асептически доводили свежей стерильной питательной средой (без фосфора) до исходного объема.

Наблюдения проводили на 7, 14, 30 и 60 сут. Растворы отделяли от руды и определяли в них количество растворенного фосфора, а также численность бактерий.

Результаты бактериального выщелачивания фосфоритов показывают (рис. 1, а), что бактерии способны переходу в раствор фосфора. Наиболее активно (по количеству растворенного фосфора) процесс идет в присутствии органотрофных бактерий, растворяющих $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Менее активны аборигенные бактерии, скорость растворения фосфора в присутствии которых также максимальна на 14-е сут, как и у органотрофных фосфатразрушающих бактерий.

Иная динамика бактериального растворения фосфора наблюдается в присутствии тионовых бактерий. В течение первых 7 сут фосфор в растворе не зафиксирован. Затем на 14 сут процесс ускоряется, и концентрация фосфора в растворе достигает таковой в растворе с автохтонной микрофлорой. В период от 14 до 30 сут наблюдается стабилизация процесса растворения фосфора, а к 60 сут скорость выщелачивания фосфора также снижается, как и в экспериментах с другими микроорганизмами. Причем, численность бактерий увеличивается до 1×10^8 кл/мл.

Результаты химического анализа выщелачивающих растворов свидетельствуют, что во всех сериях эксперимента наблюдается переход в выщелачивающий раствор кремния. Характер его бактериального выщелачивания иной (рис. 1, б). В первые 7 сут наиболее активны тионовые бактерии, но на 14 сут они снижают свою активность, тогда как другие — органотрофные и бактерии аборигенного микробиоценоза, наоборот, активизируются.

В период от 30 до 60 сут активность органотрофных и, особенно, тионовых бактерий значительно возрастает, в то время как активность аборигенной микрофлоры остается по-прежнему низкой. Наблюдаемое снижение активности бактерий в выщелачивании фосфора обусловлено, по-видимому, несколькими факторами. Поскольку эксперименты проводили в стационарных условиях, в растворах формировалась неблагоприятная среда, обусловленная выработкой бактериями кислоты и слизи. Добавление свежих растворов снижало в некоторой степени влияние данного фактора. Тем не менее рост численности бактерий может указывать на то, что, получив достаточное количество фосфора для жизни, бактерии ограничиваются

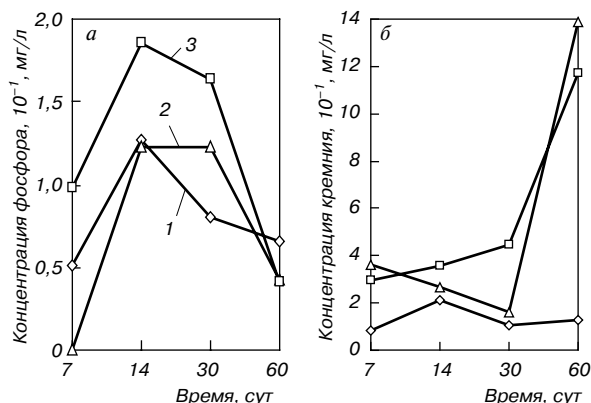


Рис. 1. Изменение концентрации фосфора (а) и кремния (б) при бактериальном выщелачивании:

1 — автохтонный микробиоценоз; 2 — *Thiobacillus thioparus*; 3 — бактерии, растворяющие $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

функцией, связанной с ростом и развитием. А продукты их жизнедеятельности (кислоты, слизи) на данном отрезке времени способствуют активизации процесса выщелачивания кремния.

В растворах контрольных опытов концентрация фосфора была ниже в 2,5–3,7 раза, а кремния — в 2,6–14,7 раза. Следует отметить, что в ходе эксперимента по бактериальному выщелачиванию происходило также выщелачивание кальция, содержание которого (по CaO) в фосфоритовой руде снизилось с 50,8 до 42 %.

В контрольных опытах кремний не фиксируется. Что касается фосфора, то его содержание находится в пределах от 0 до 0,02 мг/мл.

Менее активно (в количестве растворенного фосфора и кремния) идет процесс с участием бактерий микробного ценоза руды. Причиной этого может быть конкуренция между разными бактериями за трофические и энергетические субстраты. Факты микробного воздействия на фосфоритовую руду, полученные при химическом анализе выщелачивающих растворов, дополняются результатами рентгенофазового анализа образцов руды до и после микробного воздействия (рис. 2). Наблюдается рост пиков (в 1,2–1,5 раза) основных порообразующих минералов: франколита, фторапатита. Сглаживание рефлексов глауконита, гидрослюда, кварца, карбонатов свидетельствует о своеобразной их очистке и обогащении полезным компонентом — фосфором.

О деструктивном воздействии микроорганизмов на руду можно судить также по изменениям поверхности ее частиц, наблюдаемым методом электронной микроскопии (рис. 3). Частицы руды в исходном образце под электронным микроскопом (см. рис. 3, а) имеют почти гладкую поверхность с незначительными очагами неровностей. Частицы после воздействия бактерий, растворяющих $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (рис. 3, б), приобретают неправильную форму, их поверхность становится «морщинистой», на ней образуются более светлые мелкие выступы. При воздействии тионовых бактерий *Thiobacillus thioparus* (рис. 3, в) частицы также утрачивают правильную форму, поверхность становится «пузырчатой» и практически полностью покрывается мелкими светлыми выростами.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

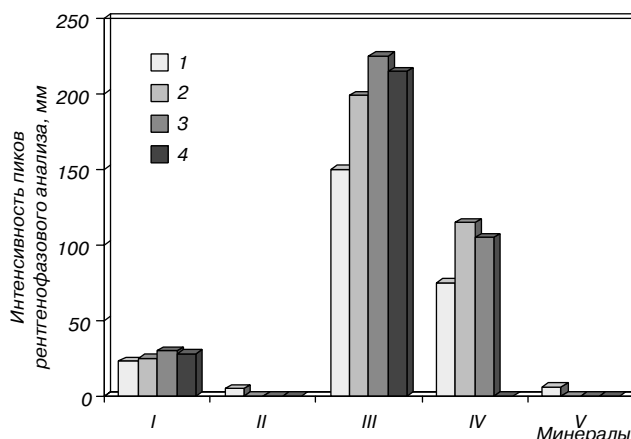


Рис. 2. Изменение интенсивности основных рефлексов минералов в результате микробного воздействия:

1 — без воздействия; 2 — микробный ценоз руды; 3 — тионовые бактерии *Thiobacillus thioparus*; 4 — бактерии, растворяющие $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; I — фторкарбонатгидроксиапатит; II — глауконит; III — франколит; IV — фторапатит; V — гидрослюды

фосфориты Джерой-Сардарьинского месторождения являются средой обитания различных микроорганизмов, использующих содержащуюся в руде влагу, а также минеральные и биогенные компоненты; деструктивное воздействие бактерий заключается в выщелачивании кремний- и кальцийсодержащих минералов, в результате чего руда обогащается фосфором;

наиболее активными в данном процессе являются тионовые бактерии *Thiobacillus thioparus* и неидентифицированные органотрофные кислотообразующие споровые бактерии, растворяющие $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$;

по мнению авторов, эти группы бактерий целесообразно использовать при разработке высокоэффективных и экологически безопасных методов обогащения фосфоритовых руд, характеризующихся низким содержанием фосфора.

Список литературы

- Дорохова Е. Н., Прохорова Г. В. Аналитическая химия. Физико-химические методы анализа. — М.: Высшая школа, 1991.

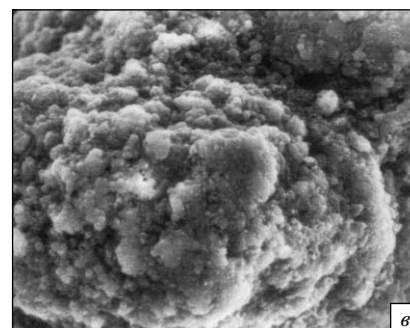
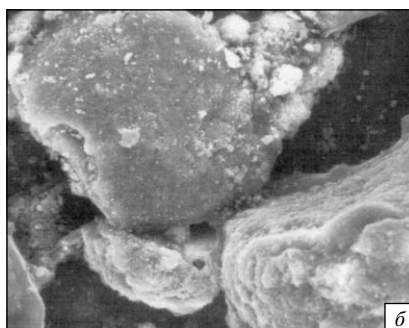
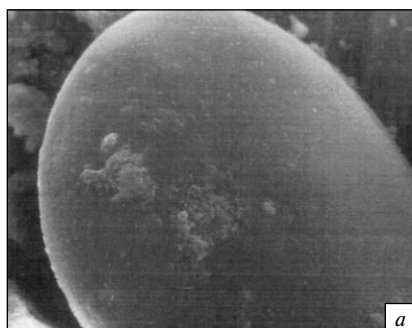



Рис. 3. Частицы фосфоритов под электронным микроскопом:

а — исходная руда (без микробного воздействия); б, в — после воздействия бактерий, растворяющих $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, и тионовых бактерий *Thiobacillus thioparus* соответственно

2. Короновский Н. В., Якушова А. Ф. Основы геологии. — М.: Высшая школа, 1991.
3. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев — М., 1982.
4. Вакалова Т. В., Хабас Т. А., Верещагин В. И. Рентгенофазовый анализ силикатных материалов. Методические указания по курсу «Физическая химия силикатов и тугоплавких соединений». — Томск: «Элика», 1997.
5. Методы общей бактериологии / Под ред. Ф. Герфардта и др. — Т. 1. — М.: Мир, 1983.
6. Романенко В. И., Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов — Л.: Наука, 1974.
7. Каравайко Г. И., Кузнецов С. И., Голомзик А. И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд — М.: Наука, 1972.
8. Карупу В. Я. Электронная микроскопия. — К.: Высшая школа, 1984.
9. Александров В. Г. Силикатные бактерии — М.: Сельхозгиз, 1953.

10. Белканова Н. П., Каравайко Г. И., Авакян З. А. // Микробиология. — Т. 54. — Вып. 1. — 1985. 

E-mail: m_shamis@mail.ru

STUDY OF THE ROLE OF MICROORGANISMS IN THE PROCESSES OF DESTRUCTION OF NATURAL PHOSPHORUS AT DZEROTY-SARDAR'YNSKOE DEPOSIT

Trifonova N. A., Chubik M. V.

It is shown that leaching of silicon- and calcium-containing minerals and, respectively, ore concentration with phosphorus occurs as a result of bacteria effect on phosphorites at Dzeroy-Sardar'yinskoe deposit. This effect can be used as the method of ore preparation for subsequent concentration.

Key words: phosphorites, bacterial processing, leaching, preliminary concentration.

УДК 622.778.913.1

© Коллектив авторов, 2008

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СУХОГО ОБОГАЩЕНИЯ ГЕМАТИТ-МАРТИТОВЫХ РУД ШАХТНОЙ ДОБЫЧИ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ИЗБИРАТЕЛЬНЫМ ДРОБЛЕНИЕМ



С. А. ЗАБОЛОТНИЙ,
директор



Ю. В. ВЕЛИЧКО,
зам. директора
по научно-исследовательской работе



А. А. ШИРЯЕВ,
заведующий
лабораторией,
канд. техн. наук



Ю. Л. ГРИЦАЙ,
ведущий научный
сотрудник, канд.
геол.-минерал. наук



В. В. БОТВИННИКОВ,
главный технический
инспектор
(Криворожская
горно-техническая
инспекция)



В. В. ВОРОБЬЕВ,
зам. директора
по научной работе
(НПО «Центр»,
Беларусь)

ООО «НПП «Укрэкология»

Технология сухой магнитной сепарации (СМС) некондиционных гематит-мартитовых руд была впервые разработана специалистами ООО «НПП «Укрэкология» в 2002 г. и получила широкое распространение на шахтах и карьерах повторной отработки шахтных полей Криворожского железорудного бассейна. В настоящее время в эксплуатации находятся пять технологических комплексов, перерабатывающих некондиционное сырье, содержащее от 42,6 до 45 % железа, которое ранее складировали в отвалах или использовали для засыпки воронок сдвигания и рекультивации.

Годовая производительность этих установок по исходному сырью составляет 1,41 млн т. Выпуск товарной продукции в виде аглоруды (содержание железа около 54 %) достигает 0,394 млн т в год.

Большинство технологических комплексов находится в южной части Криворожского месторождения богатых окисленных железных руд. Они перерабатывают кусковую часть разновидностей, содержащих 59,8–63,3 % железа и имеющих крепость по шкале проф. М. М. Протодяконова 3–8. Соотношение минерально-структурных разновидностей в таких рудах