

**Татьяна Сергеевна Хайнасова**

Выпускница Камчатского государственного технического университета (специальность «Биология»). С 2006 г. работает в Научно-исследовательском геотехнологическом центре ДВО РАН, здесь же окончила аспирантуру. В настоящее время – младший научный сотрудник, под руководством д.г.-м.н. Ю.П.Трухина занимается изучением бактериально-химических процессов выщелачивания ценных компонентов из сульфидной руды. По теме исследования опубликовано 16 работ (3 статьи – в рецензируемых журналах). Принимала участие в работе Молодежной школы-конференции «Актуальные аспекты современной микробиологии» Института микробиологии им. С.Н.Виноградского РАН (2008–2010 гг.).



**Ольга Олеговна Левенец**

Работает в НИГТЦ ДВО РАН с октября 2006 г. после окончания Камчатского государственного технического университета по специальности «Биология». Здесь же окончила аспирантуру. В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника лаборатории геохимии и геотехнологии, где под руководством заведующей лабораторией, директора НИГТЦ ДВО РАН д.г.-м.н. Ю.П.Трухина проводит исследования бактериально-химических процессов выщелачивания сульфидных руд. Автор 15 печатных работ, две из них опубликованы в рецензируемых журналах. Участник ежегодной Молодежной школы-конференции «Актуальные аспекты современной микробиологии», проводимой в Институте микробиологии им. С.Н.Виноградского РАН (2008–2010 гг.).



## Разработка технологии бактериально-химического выщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды

*Исследована окислительная активность автохтонной ассоциации мезофильных ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *A. thiooxidans* в отношении ионов закисного железа, элементарной серы и сульфидной руды. Установлено, что закисное железо и сульфидная руда являются предпочтительными источниками энергии для исследованных микроорганизмов, при этом *A. ferrooxidans* играет доминирующую роль в окислительных бактериально-химических процессах. Разработана технологическая схема переработки сульфидной кобальт-медно-никелевой руды в трехстадийном режиме биовыщелачивания.*

*Ключевые слова: биовыщелачивание, ассоциация хемолитотрофных микроорганизмов, трехвалентное железо.*

**The development of bacterial-chemical leaching of sulphide cobalt-copper-nickel ore.** Y.P.TRUKHIN, T.S.KHAINASOVA, O.O.LEVENETS (Research Geotechnological Centre, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky).

*The oxidative activity of autochthonous indigenous mesophilic acidophilic chemolithotrophic microorganisms' consortium of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* in the case of  $Fe^{2+}$ ,  $S^0$  and sulphide ore had been researched. It was revealed that  $Fe^{2+}$  and sulphide ore are preferable sources of energy for the studied microorganisms, in this case *A. ferrooxidans* play dominant role in oxidizing bacterial-chemical processes. The technological scheme of sulphide cobalt-copper-nickel ore processing by three-stage bioleaching had been developed.*

*Key words: bioleaching, consortium of chemolithotrophic microorganisms, ferric iron.*

В основе бактериально-химического выщелачивания лежат окислительно-восстановительные реакции, протекающие с участием ацидофильных хемолитотрофных (железо-, серо- и сульфидоокисляющих) микроорганизмов. В результате такие ценные компоненты сульфидной руды, как никель, кобальт и медь, переходят из нерастворимой сульфидной формы в растворимую сульфатную. Одним из главных преимуществ данной технологии над традиционными пиро- и гидрометаллургическими методами переработки сульфидных руд является менее пагубное воздействие на окружающую среду, что обусловлено отсутствием выбросов в атмосферу токсичной пыли и сернистого газа, замкнутостью циклов.

Исследование окислительной активности автохтонной ассоциации микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *A. thiooxidans* (ОБВ), выделенной из окисленной руды кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч (западная Камчатка), осуществляли в лабораторных условиях в периодическом режиме в колбах Эрленмейера объемом 250 мл на качалке при перемешивании со скоростью ~140 об/мин в мезофильных условиях ( $30 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Процесс включал окисление ионов двухвалентного железа при использовании среды Сильвермана и Лундгрена 9К, элементарной серы при использовании модифицированного варианта среды Ваксмана с заменой сульфатных форм соединений на хлоридные [1] и сульфидной руды кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч (при плотности пульпы 4,76% твердого) с использованием раствора солей среды 9К без железа.

Окисление ионов закисного железа осуществляли с использованием растворов с различными начальными концентрациями  $Fe^{2+}$  (4,5; 9; 18 г/л). В окислении железа принимала участие только бактерия *A. ferrooxidans*, обнаружившая высокую железоокисляющую активность. Продолжительность процесса составляла 30; 39; 57–58 ч для концентраций  $Fe^{2+}$  4,5; 9; 18 г/л, соответственно.

ТРУХИН Юрий Петрович – доктор геолого-минералогических наук, директор, ХАЙНАСОВА Татьяна Сергеевна – младший научный сотрудник, ЛЕВЕНЕЦ Ольга Олеговна – младший научный сотрудник (Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский). E-mail: nigtc@ksnet.ru

При разрушении сульфидных минералов образуется элементарная сера, которая в биовыщелачивающих процессах удаляется биотическим путем. К росту на сере в качестве единственного источника энергии из исследуемой микробной ассоциации оказалась способна только *A. ferrooxidans*, за 13 сут показавшая довольно слабую сероокисляющую активность при начальной концентрации  $S^0$  10 г/л – 451 и 655 мг/л сульфат-иона для трех- и шестисуточной культуры, соответственно.

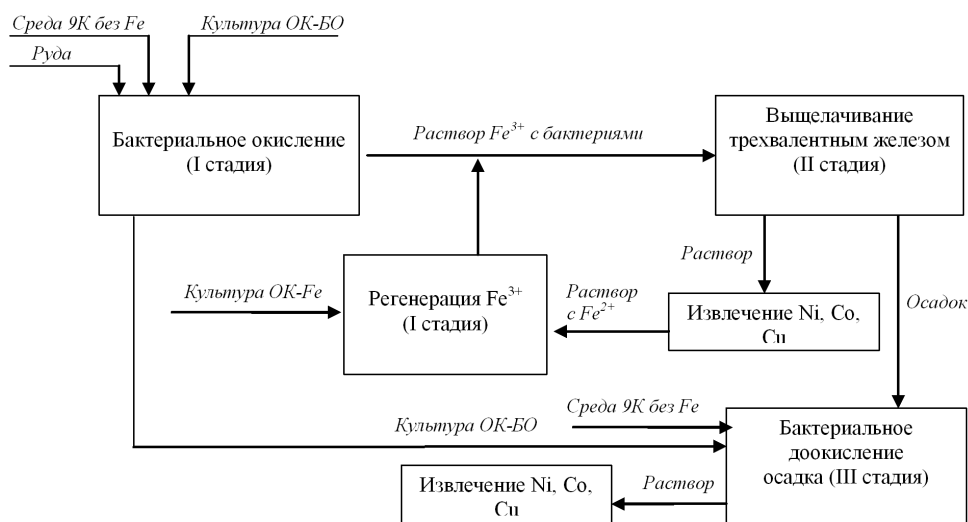
Исследование сульфидоокисляющей активности ассоциации *A. ferrooxidans* и *A. thiooxidans* проводили с использованием сульфидной руды кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч при плотности пульпы 4,76% твердого в течение 15 сут. Окислительную активность оценивали по интенсивности изменения основных параметров процесса: pH, Eh, количеству микробных клеток в 1 мл, концентрации ионов  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe_{\text{общ}}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ . Высокая численность микроорганизмов ( $10^8$ – $10^9$  кл/мл), значительное подкисление пульпы (pH на вторые сутки – от 3,01 до 2,51, к концу процесса – до 1,98) и переход ионов железа в трехвалентную форму указывали на высокую сульфидоокисляющую активность ассоциации. При этом окислительный процесс происходил при низких значениях окислительно-восстановительного потенциала (не превышающего 514 мВ). За 15 сут бактериального окисления руды концентрация металлов в растворе составила (мг/л): никель – 1887, медь – 21,21, кобальт – 42,05, трехвалентное железо – 870. Процесс извлечения металлов путем биологического окисления руды явился селективным для никеля и кобальта:  $Ni^{2+}$  56,15%;  $Cu^{2+}$  4,80;  $Co^{2+}$  54,13;  $Fe^{3+}$  3,78%.

Сульфидная руда представляет собой сложный полиминеральный комплекс, устойчивость слагающих ее минералов к выщелачиванию неодинакова и находится в прямой зависимости от электродного потенциала каждого из них. Эффективным окислителем сульфидных минералов является трехвалентное (серноокисное) железо, поэтому двухстадийная технология выщелачивания привлекает особое внимание биоготехнологов. Первая стадия заключается в выщелачивании металлов из сульфидного сырья посредством трехвалентного железа, образующегося на второй стадии. Вторая стадия заключается в регенерации бактериями трехвалентного железа, которое восстанавливается до двухвалентного при его взаимодействии с сульфидными минералами на первой стадии. Такая технология разработана для медного, медно-цинкового, золото-мышьякового, пирротинового концентратов [2–5]. При этом вторая стадия осуществляется в мезофильных условиях (при  $28 \pm 1^\circ C$ ), благоприятных для таких железоокисляющих бактерий, как *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans*. Первая стадия осуществляется при  $50$ – $80^\circ C$ , когда бактерии в рабочем растворе погибают.

Нами разработана трехстадийная технология бактериально-химического окисления сульфидной кобальт-медно-никелевой руды (см. рисунок), включающая: получение рабочего раствора трехвалентного железа при помощи аборигенной железоокисляющей микробной ассоциации (первая стадия); выщелачивание руды раствором  $Fe^{3+}$  (вторая стадия); бактериальное доокисление (биоокисление) осадка руды, выщелоченной трехвалентным железом (третья стадия). Все стадии осуществляются в мезофильных условиях (при  $28 \pm 1^\circ C$ ), что позволяет использовать окислительную активность бактерий на протяжении всего процесса и снижает затраты на подогрев пульпы.

Источником железа служит сульфидная кобальт-медно-никелевая руда, богатая железосодержащими минералами (главным образом пирротин). Бактериальное окисление при помощи аборигенной ассоциации ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов позволяет в течение 12–14 сут получить раствор, содержащий до 15 г/л железа.

На первой стадии следует использовать барботируемые стеклянные емкости, на 80% объема заполненные культурой железоокисляющих микроорганизмов (в нашем случае – *Acidithiobacillus ferrooxidans*) и раствором  $Fe^{2+}$  в соотношении 1 : 10 с добавлением питательных солей в пропорциях среды 9К без железа [1]. После окисления бактериями  $Fe^{2+}$  в растворе до  $Fe^{3+}$  (процесс занимает 3–4 сут) раствор направляется на вторую стадию – выщелачивание руды, осуществляемое в реакторах с механическим перемешиванием (120–150 об/мин),



Технологическая схема переработки сульфидной кобальт-медно-никелевой руды путем трехстадийного биовыщелачивания

при плотности пульпы  $t : ж 1 : 20-1 : 10$  (раствор трехвалентного железа при обработке руды следует 3–4 раза менять). Затем раствор с восстановленным в результате окислительно-восстановительных реакций двухвалентным железом направляется на первую стадию, где железоокисляющими бактериями регенерируется  $Fe^{3+}$ . Осадок после второй стадии направляется на третью – бактериальное доокисление. Третья стадия также осуществляется в реакторах с механическим перемешиванием (120–150 об/мин) при плотности пульпы  $t : ж 1 : 20-1 : 10$ ; состав жидкой фазы пульпы – культура ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов (в нашем случае – ассоциация *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfobacillus* sp.) и питательная среда 9К без железа в соотношении 1 : 4.

В процессе бактериально-химического выщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды извлечение металлов составило (г/л / %): Ni – 1,28 / 19,0 (вторая стадия), 2,47 / 73,3 (всего); Co – 0,022 / 0,054 (вторая стадия), 0,054 / 67,5 (всего); Cu – 0,036 / 4,3 (вторая стадия), 0,065 / 15,6 (всего). Таким образом, переработка сульфидной кобальт-медно-никелевой руды в трехстадийном режиме биовыщелачивания имеет явные преимущества перед традиционными технологиями. При заданном объеме производства металлического никеля 10000 т в год с учетом его содержания в перерабатываемой руде (7%) и извлечения путем биовыщелачивания в трехстадийном режиме (73,3%) необходимый объем перерабатываемой руды составит 195 000 т в год.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каравайко Г.И., Росси Дж., Агате А., Грудев С., Авакян З.А. Биоготехнология металлов: практическое руководство. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1989. 375 с.
2. Славкина О.В., Фомченко Н.В., Бирюков В.В., Архипов М.Ю. Исследование технологии бактериального выщелачивания медно-цинкового рудного концентрата. 3. Экспериментальная проверка двухстадийной рециркуляционной технологии выщелачивания медно-цинкового концентрата // Биотехнология. 2005. № 3. С. 48–54.
3. Суханова М.А., Пивоварова Т.А., Меламуд В.И. Способ переработки сульфидных руд и пирротинового концентрата. Пат. RU 2367691 С1. Способ переработки сульфидных руд и пирротинового концентрата. Опубл. 20.09.2009. Бюл. № 26. 8 с.
4. Фомченко Н.В., Муравьев М.И., Кондратьева Т.Ф., Бирюков В.В. Роль первой стадии в двухстадийном процессе бактериально-химического окисления золотомышьяковых концентратов с использованием умеренно термофильных микроорганизмов // Биотехнология. 2009. № 2. С. 60–68.
5. Palencia I., Romero R., Mazuelos A., Carranza F. Treatment of secondary copper sulphides (chalcocite and covellite) by the BRISA process // Hydrometallurgy. 2002. Vol. 66. P. 85–93.