

УДК 579.66

*Т.С. Хайнасова, О.О. Левенец, Т.И. Кузякина,  
Е.С.В. Мурадов, А.А. Балыков*

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ  
ТЕХНОЛОГИИ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО  
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ СУЛЬФИДНЫХ  
РУД НА КАМЧАТКЕ**

---

**К**амчатский регион располагает достаточно высоким минерально-сырьевым потенциалом, способным стать базой для развития горнодобывающей промышленности на полуострове [1]. Применение инновационных, малоотходных биоготехнологических методов представляется наиболее рациональным путем развития горнодобывающей промышленности Камчатского края.

Использование биоготехнологических методов в переработке рудных концентратов, горных пород с низким содержанием ценных элементов, а также отвальных хвостов является признанным способом в гидрометаллургии, с помощью которого извлекается, в основном, медь, никель, кобальт, цинк, золото. Данный подход обеспечивает более полное и комплексное извлечение целевых компонентов по сравнению с традиционными методами.

Биоготехнология металлов подразумевает использование хемолитотрофных микроорганизмов, источниками энергии для которых служат неорганические соединения, для окисления сульфидных минералов в растворах и перевода целевых компонентов (металлов) в растворенное состояние. Выщелачивание биологическим путем сводится к поддержанию извлекаемого из руды железа в окисленном состоянии ( $Fe^{3+}$  - главный окислитель) и низких значений рН, при которых металлы активно переходят в растворимую форму [2]. Развитие и оптимизация данной технологии является одной из первоочередных задач современных отечественных и иностранных исследований.

Полезные компоненты извлекаются также биологическим путем с использованием разнообразных подходов, включающих: куч-

ное, чановое и подземное выщелачивания. Актуальной задачей в области рационального и экологически безопасного природопользования является внедрение технологии чанового выщелачивания для переработки камчатских сульфидных руд. Применение подземного и кучного выщелачивания не представляется возможным в связи с опасностью проникновения промышленных растворов в подземную и речную гидросеть, что является угрозой для уникальной природы Камчатки.

Проводятся исследования в области чанового выщелачивания сульфидных полиметаллических руд Камчатской никеленосной провинции. Отечественными и зарубежными микробиологами выявлено множество потенциально полезных бактерий и архей, способствующих окислению сульфидных минералов. Считается, что основной вклад в процессы биовыщелачивания приносят представители родов *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*, *Sulfobacillus*, *Ferroplasma*. Большинство исследований в области понимания механизмов и кинетики микробного взаимодействия с сульфидными рудами связаны, в основном, с данными микроорганизмами [3], [4]. Однако характеристика большинства наиболее активных штаммов остается неполной.

С целью развития и оптимизации технологии биовыщелачивания сульфидных руд определенного типа (в данном случае – медно-никелевых) требуется выделение биологически активных штаммов хемолитотрофных микроорганизмов. Проводятся работы по выделению чистых линий микроорганизмов, перспективных для использования в бактериально-химической переработке сульфидной медно-никелевой руды. В частности, выделение чистых линий автохтонных микроорганизмов будет способствовать формированию более полной картины микробного разнообразия камчатских медно-никелевых месторождений.

Несмотря на долговременное применение хемолитотрофных микроорганизмов в промышленном масштабе, актуальным остается вопрос интенсификации и оптимизации бактериально-химических процессов с биологической и технической точек зрения. Одним из подходов в решении данных задач является применение автохтонных ассоциаций хемолитотрофных микроорганизмов, обладающих высокой биологической активностью. В свою очередь, для продуктивного использования микробиологической составляющей в биогидрометаллургии существует необходимость

выделения железо- и серо-/сульфидокисляющих хемолитотрофных автохтонных сообществ непосредственно из минерального компонента, который впоследствии подвергнется переработке. Такие автохтонные микробные сообщества будут обладать высокой окисляющей активностью, генетически закрепленной толерантностью к высоким концентрациям тяжелых металлов, низкому уровню кислотности среды, специфическому минеральному составу руды.

Исходя из этих соображений, ведутся работы по выделению автохтонных ассоциаций ацидофильных мезофильных микроорганизмов из руд сульфидных месторождений Камчатки. Изучение процесса биовыщелачивания медно-никелевой руды автохтонными ассоциациями микроорганизмов будет способствовать лучшему пониманию механизмов и кинетики микробного взаимодействия с сульфидными рудами данного типа.

Проведены предварительные испытания по бактериально-химическому выщелачиванию сульфидной медно-никелевой руды с использованием микробных ассоциаций, неадаптированных к процессу, с целью предварительной оценки их выщелачивающей способности и выявления наиболее эффективных сообществ.

В исследовании по выщелачивающей активности использовались три микробных сообщества, выделенных из различных рудных образцов. Эксперимент проводили в течение 333 часов. Биологическую активность каждого из них оценивали по способности окислять двухвалентное железо до трехвалентного (т.к. в бактериально-химических процессах трехвалентное железо является главным окисляющим агентом) и конечному процентному выходу целевых металлов (никеля, меди, кобальта). В случае наиболее продуктивного по окислению двухвалентного железа сообщества при биовыщелачивании процентный выход целевых металлов составил: Ni = 15,60%, Cu = 5,55%, Co = 9,89%. Полученные результаты послужили основой для дальнейших исследований.

Сообщества, ранее используемые при определении окисляющей активности, подвергали последовательной адаптации к повышающейся плотности пульпы (т:ж = 1:50, 1:20, 1:10). В ходе экспериментов определяли длительность лаг-фазы в развитии автохтонных сообществ. Завершение адаптации к определенной плотности пульпы и перевод части адаптированной культуры в пульпу с большей плотностью осуществляли в момент стабилизации пара-

метров: рН, окислительно-восстано-вительного потенциала жидкой фазы пульпы, количества клеток в растворе, переход всего двухвалентного железа в трехвалентную форму. В среднем, адаптационный период занимал 9–14 суток. При этом максимальный процентный выход металлов составил: Ni = 61,26%, Cu = 10,80%, Co = 40,67%.

Проводятся исследования по бактериально-химическому выщелачиванию сульфидной медно-никелевой руды при различных режимах и с использованием адаптированных сообществ с целью выявления особенностей процесса и определения оптимальной технологической схемы в переработке медно-никелевого минерального сырья.

При рН выше 2,2 железо переходит в нерастворимые гидратные формы, что усложняет выход металлов в раствор [1]. Начиная с 12–15 суток эксперимента по биовыщелачиванию руды нашими сообществами рН раствора снижалось и стабилизировалось на уровне 1,6–1,7 вследствие микробного окисления выделяющейся из руды элементарной серы до серной кислоты. Сероокисляющая способность микроорганизмов, входящих в состав наших сообществ, представляет дополнительное преимущество технологии биовыщелачивания, т.к. при ее использовании не требуется значительных количеств серной кислоты для поддержания низких значений рН раствора.

На данный момент приоритетными задачами в работе по развитию бактериально-химических технологий переработки сульфидных руд на Камчатке являются: создание коллекции автохтонных хемолитотрофных микроорганизмов, выделенных из различных типов руд сульфидных месторождений Камчатской никеленосной провинции, выявление микробных культур с наибольшей окисляющей активностью, определение роли отдельных видов микроорганизмов в выщелачивании полиминеральных комплексов, создание оптимальной технологической схемы переработки сульфидной медно-никелевой руды с использованием технологии биовыщелачивания.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алискеров А.А., Яроцкий Г.П. Введение в проблему горнопромышленного освоения Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского Гос. пед. ун-та, 2003. 265 с.

2. *Каравайко Г.И., Кузнецов С.И., Голомзик А.И.* Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. М.: Наука, 1972. 248 с.
3. *Bosecker K.* Bioleaching: metal solubilization by microorganisms // FEMS Microbiol. Rev. 1997. V. 20. P. 591-604.
4. *Rawlings D.E.* Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates // Microbial Cell Factories. 2005. V. 4. № 13. DOI: 10.1186/1475-2859-4-13. **ТАБ**

### ***Коротко об авторах***

*Хайнасова Т.С.* - аспирант,  
*Левенец О.О.* - аспирант,  
*Кузякина Т.И.* - доктор биологических наук, профессор,  
*Мурадов С.В.* - кандидат биологических наук, доцент,  
*Бальков А.А.* - аспирант.  
Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский.  
E-mail: [nigtc@kscnet.ru](mailto:nigtc@kscnet.ru)

