

УДК 550.72

**О.О. Левенец**

### **О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ РУД**

*В статье приведен краткий обзор моделей бактериально-химических процессов переработки руд. Показана сложность разработки универсальной модели биовыщелачивания.*

*Ключевые слова: физико-химическая модель, бактериально-химическая переработка руды, биовыщелачивание.*

---

**Б**иовыщелачивание представляет собой сложный, многоступенчатый процесс, на который влияет множество физических, химических, биологических и других факторов [1–3]. Это затрудняет разработку универсальной физико-химической модели бактериально-химической переработки руд.

Bircumshaw с коллегами [4] при разработке своей модели для биовыщелачивания пирита в проточном (непрерывном) режиме брали за основу прямой механизм выщелачивания, который подразумевает протекание процесса в две стадии: образование двухвалентного железа при химическом выщелачивании пирита и последующее бактериальное окисление  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ . В устойчивом состоянии скорость химического выщелачивания и бактериального окисления связаны между собой соотношением концентраций  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$  в растворе. Авторы учитывали следующие параметры: размер частиц пирита, сокращение размера частиц, время нахождения пульпы в каскаде реакторов, распределение фракций твердого субстрата в пульпе, баланс вещества для бактериальной культуры и компонентов жидкой фазы.

Liу с коллегами [5] разработали полуэмпирическую модель биовыщелачивания и роста бактерий *Acidithiobacillus* spp. на основе особенностей транспорта вещества. Согласно данной модели, для описания сложного процесса биовыщелачивания требуется всего три параметра, полученные из экспериментальных данных, без учета источника и концентрации микроорганизмов, концентрации, состава и физических характери-

стик (размер частиц, форма, пористость и др.) твердого субстрата, концентрации выщелачиваемых и побочных продуктов, а также условий выщелачивания (рН, температура, перемешивание и др.). Формулировке модели предшествовало сравнение моделей, предложенных ранее разными авторами, описывающих прямое выщелачивание с помощью *Acidithiobacillus ferrooxidans*, прямое выщелачивание с помощью *A. thiooxidans*, прямое и непрямое выщелачивание с помощью *A. ferrooxidans*, комбинированное выщелачивание с помощью *A. ferrooxidans*.

Полуэмпирическая модель может быть успешно использована для прогнозирования роста хемолитотрофных бактерий и кинетики биовыщелачивания, протекающего посредством как прямого, так и непрямого и комбинированного механизмов. Она имеет следующий вид:

$$X_L = \frac{K_L A_L \exp(B_L t)}{1 + A_L \exp(B_L t)}, \quad M = \frac{K_M A_M \exp(B_M t)}{1 + A_M \exp(B_M t)} - \frac{K_M A_M}{1 + A_M},$$

где  $X_L$  – концентрация свободных бактерий в жидкой фазе (клеток/м<sup>3</sup>),  $K_L$  – константа, максимальная концентрация свободных бактерий (клеток/м<sup>3</sup>),  $A_L$  – константа для расчета  $X_L$  (безразмерная),  $B_L$  – константа для расчета  $X_L$  (в сутки),  $t$  – время (сутки),  $M$  – концентрация выщелоченного субстрата (=  $W_0 - W$ ) (кг/м<sup>3</sup>),  $K_M$  – константа для расчета  $M$  (кг/м<sup>3</sup>),  $A_M$  – константа для расчета  $M$  (безразмерная),  $B_M$  – константа для расчета  $M$  (в сутки).

Далее этой же группой исследователей был проведен анализ чувствительности данной модели на основе метода Морриса [6]. Результаты их работы показали, что параметры  $K_L$ ,  $B_L$  и  $C_L$  (константа для расчета  $X_L$ ) тесно связаны с максимальной концентрацией клеток, скоростью их роста в экспоненциальной фазе и остаточной наработкой в lag-фазе, соответственно. Было проанализировано влияние на эти три параметра четырех наиболее важных факторов культивирования бактерий: концентраций элементарной серы  $S^0$ ,  $CaCl_2$ ,  $MnSO_4$  и начального рН. Установлено, что концентрация элементарной серы обнаруживает положительную корреляцию с параметрами  $K_L$  и  $C_L$  и отрицательную – с  $B_L$ .

Ahmadi с коллегами [7] разработали модель традиционного и электрохимического биовыщелачивания высокосортных полиминеральных сульфидных медных руд и флотоконцентратов в перемешивающих реакторах. Данная модель учитывает влияние минералогического состава выщелачиваемого субстрата, свойств выщелачивающего раствора, присутствия железо- и сероокисляющих микроорганизмов, пассивирования и электровосстановления халькопирита на степень извлечения меди, рН и Eh процесса.

Таким образом, даже краткий обзор нескольких моделей биовыщелачивания показывает невозможность получения универсальной модели. Технологические схемы бактериально-химической переработки руд зачастую включают несколько стадий [8–9]. В каждом конкретном случае необходимо учитывать разнообразные параметры физических, химических и биологических процессов, протекающих в пульпе [10–11].

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайнасова Т.С. Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды в лабораторных условиях с использованием посевной культуры // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2014. № 4. С. 101–107.
2. Левенец О.О. Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных плотностях пульпы // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2014. № 4. С. 96–100.
3. Левенец О.О., Трухин Ю.П. Влияние температурного режима на биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 9. С. 48–51.
4. Bircumshaw L., Changunda K., Hansford G., Rawatla R. Development of a mathematical model for continuous tank bioleaching // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2006. V. 106. P. 277–282.
5. Liu H.-L., Teng Ch.-H., Cheng Y.-Ch. A semiempirical model for bacterial growth and bioleaching of Acidithiobacillus spp. // Chemical Engineering Journal. 2004. V. 99. P. 77–87.
6. Liu H.-L., Yang F.-Ch., Huang Ch.-H., Fang H.-W., Cheng Y.-Ch. Sensitivity analysis of the semiempirical model for the growth of the indigenous Acidithiobacillus thiooxidans // Chemical Engineering Journal. 2007. V. 129. P. 105–112.
7. Ahmadi A., Ranjbar M., Schaffie M., Petersen J. Kinetic modeling of bioleaching of copper sulfide concentrates in conventional and electrochemically controlled systems // Hydrometallurgy. 2012. V. 127–128. P. 16–23.

8. Левенец О.О., Хайнасова Т.С., Балыков А.А., Трухин Ю.П. Высокотемпературное выщелачивание сульфидной руды месторождения Шануч растворами трехвалентного железа // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 11. Специальный выпуск 31 «Камчатка-3». М.: Горная книга, 2016. – С. 254–259.

9. Балыков А.А. Разработка технологической схемы бактериально-химического выщелачивания сульфидной руды на основе экспериментальных исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 11. Специальный выпуск 31 «Камчатка-3». М.: Горная книга, 2016. – С. 338–340.

10. Левенец О.О. Анализ физико-химической модели биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 11. Специальный выпуск 31 «Камчатка-3». М.: Горная книга, 2016. – С. 333–337.

11. Киореску А.В., Мусихин В.О., Хомченкова А.С. Исследование процессов проточного бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 11. Специальный выпуск 31 «Камчатка-3». М.: Горная книга, 2016. – С. 272–279. **ПЛАБ**

#### **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

---

*Левенец Ольга Олеговна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, [leveolga@yandex.ru](mailto:leveolga@yandex.ru), Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



---

UDC 550.72

#### **ABOUT THE MODELLING OF THE ORE BIOLEACHING PROCESSES**

*Levenets O.O.*, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, [leveolga@yandex.ru](mailto:leveolga@yandex.ru). Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

---

*This article is a brief review of models for bacterial-chemical processes of ore treatment. The complexity of universal bioleaching model development is shown.*

*Key words:* physical-chemical model, bacterial-chemical ore treatment, bioleaching.

## REFERENCES

1. Hainasova T.S. *Bakterial'no-himicheskoe vyschelachivanie sul'fidnoj kobal't-medno-nikelevoj rudy v laboratornyh uslovijah s ispol'zovaniem posevnoj kul'tury* (Bacterial-chemical leaching of sulphide cobalt-copper-Nickel ores in the laboratory using the seed culture) // Vestnik Dal'nevostochnogo otdelenija RAN, 2014, No 4, pp. 101–107.
2. Levenets O.O. *Bakterial'no-himicheskoe vyschelachivanie sul'fidnoj kobal't-medno-nikelevoj rudy pri raznyh plotnostjah pul'py* (Bacterial-chemical leaching of sulphide cobalt-copper-Nickel ore at various pulp densities) // Vestnik Dal'nevostochnogo otdelenija RAN, 2014, No 4, pp. 96–100.
3. Levenets O.O., Truhin Y.P. *Vlijanie temperaturnogo rezjima na biovyschelachivanie sul'fidnoj kobal't-medno-nikelevoj rudy* (Influence of temperature conditions on bioleaching of sulphide cobalt-copper-Nickel ores) // Gornyj informacionno-analiticheskij bulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal), 2014, No 9, pp. 48–51.
8. Levenets O.O., Khainasova T.S., Balykov A.A., Truhin Y.P. *Vysokotemperaturnoe vyschelachivanie sul'fidnoj rudy mestorozhdenia Shanuch rastvorami tryohvalentnogo zheleza* (High temperature leaching of sulfide ore deposits Sanus solutions of ferric iron) // Gornyj informacionno-analiticheskij bulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal), Specialnyj vypusk \_ «Kamchatka-3», Moscow: Gornaya kniga, 2016, No \_\_, pp. \_\_.
9. Balykov A.A. *Razrabotka tehnologicheskoj shemy bakterial'no-himicheskogo vyschelachivaniya sul'fidnoj rudy na osnove eksperimental'nyh issledovanij* (Development of flowchart of bacterial-chemical leaching of sulfide ores on the basis of experimental studies) // Gornyj informacionno-analiticheskij bulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal), Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», Moscow: Gornaya kniga, 2016, No 11, pp. 338–340.
10. Levenets O.O. *Analiz fiziko-himicheskoy modeli biovyschelachivaniya sul'fidnoj kobal't-medno-nikelevoj rudy* (Analysis of the physico-chemical model of the bioleaching of sulphide cobalt-copper-Nickel ores) // Gornyj informacionno-analiticheskij bulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal), Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», Moscow: Gornaya kniga, 2016, No 11, pp. 333–337.
11. Kioresku A.V., Musihin V.O., Homchenkova A.S. *Issledovanie processov protochnogo bakterial'no-himicheskogo vyschelachivaniya sul'fidnyh medno-nikelevyh rud mestorozhdenia Shanuch (Kamchatka)* (Study of the processes of the flow of bacterial-chemical leaching of sulfide copper-Nickel ore deposits chanoch (Kamchatka)) // Gornyj informacionno-analiticheskij bulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal), Specialnyj vypusk 31 «Kamchatka-3», Moscow: Gornaya kniga, 2016, No 11, pp. 272–279.