

**БИОГЕОТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ АО
«АЛМАЛЫКСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ» РЕСПУБЛИКИ
УЗБЕКИСТАН**

¹ *М.Г. Сагдиева, ² Д.Я. Мирталипов, ² З.Г. Сагдиева, ² З.В. Калинин*

¹ *ГП «Институт минеральных ресурсов» Госкомгеологии и минеральных ресурсов, Ташкент,
Республика Узбекистан*

² *Институт микробиологии Академии наук, Ташкент, Республика Узбекистан*

Одним из перспективных направлений является биогеотехнология – использование микроорганизмов для извлечения благородных и цветных металлов из различных видов нетрадиционного рудного сырья, переработка которых нерентабельна классическими металлургическими технологиями.

Научно-теоретические основы процесса взаимодействия микроорганизмов с минералами, а также имеющийся промышленный опыт применения биотехнологических методов позволили определить основные направления использования технологии бактериального выщелачивания. Это прежде всего бактериальное выщелачивание забалансовых медьсодержащих руд, вскрытие золота, тонковкрапленного в сульфидные минералы, особенно в арсенопирит, пирит и халькопирит, удаление мышьяка как вредной примеси из золотомышьяковых концентратов и продуктов, получаемых при обогащении руд цветных и редких металлов. Этим методом можно эффективно разделять такие коллективные концентраты цветных металлов, как медно-цинковые, медно-никелевые и т. п. Предварительная бактериальная обработка минеральных продуктов и концентратов перед обогащательными, металлургическими процессами значительно интенсифицирует их и увеличивает полноту извлечения металлов. В настоящее время исследованиями процесса бактериального окисления и выщелачивания занимается около 100 научных организаций и фирм в более чем 25 странах. Построены и действуют 20 промышленных установок кучного биовыщелачивания забалансовых руд в следующих странах: Чили, Китай, Австралия, США, Кипр, Мьянма и др., зарегистрировано большое количество действующих опытно-промышленных установок в целом ряде стран (1–4).

Проблема переработки техногенных медьсодержащих отходов, актуальна и для Республики Узбекистан. С 1948 года функционирует АО «Алмалыкский горно-металлургический комбинат» (АГМК, в результате чего на территории Алмалыкского региона на сегодняшний день накопилось 155 млн. тонн отвальных забалансовых и 1,350 млн. хвостов флотации, которые занимают огромную площадь и оказывают негативное действие на окружающую среду.

В настоящее время в Институте микробиологии АН РУз и ГП «Институт минеральных ресурсов» разработаны биогеотехнологии переработки техногенных отходов АГМК.

Биогеотехнологии переработки забалансовых руд АГМК

Объектом исследования явились следующие отвалы: отвал А-4 (окисленная руда), отвал А-7 (сульфидная руда) и отвал 9а (окисленная руда). Микробиологическое обследование объектов показало широкое распространение различных физиологических групп рудных микроорганизмов в различные времена года. Как свидетельствует из полученных нами данных, микрофлора обследованных объектов зависит от различных факторов, таких как влажность, температура, величина рН среды и минералогический состав руд. В рудах с кислой и слабокислой средой наблюдается развитие железо и сероокисляющих бактерий, что свидетельствует об активном окислении сульфидных минералов, в то время как в рудах с высоким значением рН обнаруживаются тионовые бактерии, окисляющие серу и различные восстановленные соединения серы. На основании проведенного скрининга выделенных геохимически активных микроорганизмов из различных руд Алмалыкского рудного поля были отобраны наиболее активные ацидофильные ассоциации (А-7-6, А-7-8, А-7-10, ОКМК-17, ОКМК-18, ОКМК-20) и Т.ф. – 4, которые были использованы для бактериального выщелачивания меди. Проведены лабораторные испытания кучного биовыщелачивания на массе руды 2 кг в перколяторах. Для окисленных руд влагоемкость составляет 0,17–0,2 л/кг, проницаемость – 9,8–11,2 мл/час/см², расход серной кислоты для закисления – 5,5–6,4 г/кг; для сульфидных руд – 0,19–0,22 л/кг, 9,6–11,7 мл/час/см² и 12,8–15,1 г/кг соответственно.

Определены оптимальные параметры технологии бактериального выщелачивания меди в перколяторах: использование руды с удалением мелкой фракции, добавление солей аммония (1,0 г/л) и фосфора (0,25 г/л), величина pH орошаемых растворов 2,2–2,0, скорость орошения 30 мл/час, проведение орошения 2 раза в неделю, пауза – 72 часа, посев культурой, выращенной на модифицированной среде 9К. Результаты проведенных лабораторных и укрупненно-лабораторных испытаний по выщелачиванию меди из окисленных руд отвала А-4 показывают, что в процессе закисления материала численность аборигенной микрофлоры достигает 10^{4-5} кл/г для железоокисляющих микроорганизмов, а извлечение меди при этом составляет около 50 %. Общее сквозное выщелачивание меди за 100 дней достигает 84,1 %. Краткая характеристика отвальных руд АГМК и извлечение меди при бактериальном выщелачивании представлены в таблице 1.

Таблица 1 Краткая характеристика отвалов по основным металлам и процент извлечения меди

Наименование отвала	Единица измерения	Количество	Содержание компонентов	Извлечение меди, %
Отвал № 4а (окисленная руда): медь золото серебро	т. т. т.т. кг т.	5898,1 20,7 2830,0 9,18	 0,35 % 0,48 г./т 1,5 г/т	84,1 За 100 дней
Отвал № 7а (сульфидная руда): медь золото серебро	т. т ³ т.т. кг т.	45141,9 103,24 20150,2 81,933	 0,23 % 0,44 г./т 1,8 г/т	79,1 За 100 дней
Отвал 9а (окисленная руда): медь золото серебро	т.т. т.т. кг т.	2742,6 23,89 3682,5 12,1	 0,87 % 1,34 г./т 4,4 г/т	89,6 За 100 дней

Для выщелачивания меди из окисленных руд рекомендуется проведение сернокислотного выщелачивания с интенсификацией аборигенной микрофлоры, которое достигается при постепенном закислении руды. Бактериальное выщелачивание меди из сульфидных руд в лабораторных и укрупненно-лабораторных экспериментах показывает, что в процессе закисления материала в продуктивные растворы выщелачивается только 33,5 % меди, а численность аборигенной микрофлоры достигает 10^{5-6} кл/г. При интродукции материала руды железоокисляющими микроорганизмами количество бактерий увеличивается до 10^{7-8} кл/г, а выщелачивание меди активизируется и достигает 79,6 % за 100 дней. В результате выполненных научно-исследовательских работ определена пригодность отвальных руд различного типа к переработке методом биовыщелачивания. На основе проведенных лабораторных и укрупненно-лабораторных испытаний разработан технологический регламент на проведение полупромышленных испытаний на массе руды 5000 тонн. Научно-исследовательские работы в этом направлении продолжаются.

Биогеотехнологии переработки хвостов флотации меднообогатительной фабрики АГМК

В двух хвостохранилищах АГМК находятся значительные запасы меди, цинка, молибдена, свинца, золота, серебра, кобальта кадмия, висмута, а также редких металлов и редкоземельных элементов. Ориентировочное количество цветных, благородных и редких металлов в хвостах флотации медно-обогатительной фабрики (МОФ) АГМК представлено в таблице 2.

Проведены лабораторные, укрупненно-лабораторные, полупромышленные и опытно-промышленные испытания биотехнологии кучного выщелачивания хвостов флотации МОФ. Данные по извлечению меди и золота проведенных исследований представлены в таблице 3.

Таблица 2 Содержание некоторых элементов в отвальных хвостах флотации МОФ и их количество в двух хвостохранилищах

Элементы	Содержание, %	Количество, тонна
Медь	0,122	1 220 000
Молибден	0,0021	21 000
Цинк	0,011	110 000
Свинец	0,08	800 000
Мышьяк	0,03	300 000
Сера	2,18	21 800 000
Фосфор	0,051	510 000
Кобальт	0,0007	7 000
Кадмий	0,008	80 000
Золото, г/т	0,312	312,0
Серебро, г/т	1,21	1 210,0
Висмут, г/т	3,2	1 020,0
Селен, г/т	1,4	1 400,0
Теллур, г/т	1,2	1 020,0
Рений, г/т	0,25	250,0

Таблица 3 Результаты проведенных испытаний биотехнологии кучного выщелачивания хвостов флотации МОФ АГМК

Тип испытаний	Масса материала	Сроки выщелачивания	Извлечение меди, %	Извлечение золота, %
Лабораторные	1–3 кг	30 дней	67,7–75,8	81,2–92,6
Укрупненно-лабораторные	10–100 кг	120 дней	53,5–88,0	84,6–91,1
Полупромышленные	50 тонн	12 месяцев	53,4–58,2	84,9–90,1
Опытно-промышленные	5441 тонна	28 месяцев	52,7–56,9	88,3–90,5

Проведены опытно-промышленные испытания по биотехнологии переработки хвостов флотации МОФ АГМК на опытном участке кучного бактериально-химического выщелачивания (5411 т.), построенного силами АГМК на основе технологического регламента, разработанного нами (5–7). На фото 1–4 представлены общий вид опытно-промышленного штабеля биовыщелачивания техногенных отходов, культиватор для выращивания микроорганизмов, поверхность опытно-промышленного штабеля и емкость для приема продуктивных растворов.



Фото 1. Опытно-промышленный штабель биовыщелачивания техногенных отходов



Фото 3. Поверхность опытно-промышленного штабеля техногенных отходов



Фото 2. Культиватор для выращивания микроорганизмов



Фото 4. Емкость для приема продуктивных растворов

В процессе биовыщелачивания хвостов флотации были отобраны продуктивные растворы и проведен ICP MS анализ в аналитической лаборатории Государственной пробирной палаты Республики Узбекистан (ГПП РУз). Концентрации меди и сопутствующих цветных и редких металлов, а также редкоземельных элементов представлены в таблице 4.

Таблица 4 Концентрация сопутствующих меди цветных и редких металлов в продуктивных растворах бактериального выщелачивания хвостов флотации МОФ АГМК

Наименование элементов	Концентрация, мкг/л	Наименование элементов	Концентрация, мкг/л
Цветные металлы			
Cu (медь)	355 000.0–837 000.0	Ni (никель)	12 337.1–15 375.9
Zn (цинк)	161 474.2–191 599.1	Mg (магний)	3 379 059–3 811 573
Al (алюминий)	2 017 200–2 486 304	Co (кобальт)	6 941.6–8 188.6
Sr (стронций)	24.8–158.8	Bi (висмут)	0.0–2.2
Ti (титан)	117.0–561.1	Mo (молибден)	15.0–151.4
Cd (кадмий)	439.1–575.1	W (вольфрам)	1.2–7.1
V (ванадий)	3 951.4–5 027.1		
Редкие металлы и редкоземельные элементы			
Li (литий)	4 507.0–5 578.0	Be (бериллий)	292.7–432.1
Rb (рубидий)	37.3–288.4	Cs (цезий)	1.1–7.3
Eu (европий)	187.8–227.8	Ta (тантал)	1.6–3.1
Tb (тербий)	145.1–174.7	Yb (иттербий)	348.5–431.6
Dy (диспрозий)	807.4–949.4	Zr (цирконий)	19.7–45.8
Hf (гафний)	5.7–10.4	Te (теллур)	0.0–128.8
Re (рений)	18.9–26.7	In (индий)	8.6–18.6
Sc (скандий)	818.1–1 152.7	La (лантан)	1 097.9–1 413.9
Ce (церий)	4 969.2 – 5 909.7	Pr (празеодим)	760.3–863.9
Nd (неодим)	3 505.4–4 138.3	Sm (самарий)	907.6–1, 099, 9
Ho (гольмий)	153.9–179.2	Er (эрбий)	400.0–438.5
Tm (тулий)	54.6–68.3	Lu (лютеций)	55.8–65.3
U (уран)	932.9–1 138.7	Y (иттрий)	3 760.1–4 480.9
Th (торий)	828.2–1 560.5	Gd (гадолиний)	1 001.8–1 259.1
Σ REE	25 627.2 – 28 193.1		
Другие элементы			
Ag (серебро)	1.0–9.3	Sb (сурьма)	20.6–86.3
B (бор)	0.0–353.4	Si (кремний)	129 055.3–169 455.9
Na (натрий)	2 719.2–15 122.6	Ca (кальций)	531 108.4–571 155.0
Ba (барий)	14.3–208.7	Cr (хром)	1 927.5–6 245.4
Mn (марганец)	599 085.5–711 023.9		

Так, по данным аналитической лаборатории ГПП РУз концентрация Al в растворе составляет более 2 г/л, Mg $\approx$ 3,5 г/л, Ca $\approx$ 0,5 г/л, Si $\approx$ 0,2 г/л, Mn $\approx$ 0,7 г/л, Zn $\approx$ 0,17 г/л. Обнаруживаются: порядка 5 мг/л Li, 8 мг/л Na, 1,0 мг/л Sc, 0,4 мг/л Ti, 4,5 мг/л V, и 3,0 мг Cr, 7 мг/л Co, 12 мг/л Ni, 4 мг/л Y, 0,5 мг/л Cd, 0,02 мг/л In, 0, 0,1 мг/л Te, 1,2 мг/л La, 5,5 мг/л Ce, 0,8 мг/л Pr, 3,8 мг/л Nd, 1,1 мг/л Sm, 0,2 мг/л Eu, 1,1 мг/л Gd, 0,16 мг/л Tb, 0,95 мг/л Dy, 0,16 мг/л Ho, 0,4 мг/л Er, 0,4 мг/л Yb, 0,06 мг/л Lu, 0,008 мг/л Hf, 1,2 мг Th, 1,0 мг/л U.

Предлагаемая биотехнология комплексной переработки хвостов флотации является экономически выгодной, она не требует дорогостоящего оборудования, все необходимые реагенты производятся в республике, по предварительным данным при получении 1 тонны меди методом кучного биовыщелачивания хвостов флотации МОФ АГМК чистая прибыль составляет 4392 доллара из расчета стоимости меди 6450 долларов США (данные на июль 2017 года).

ЛИТЕРАТУРА

1. M.E. Clark, J. Batty, C. van Buuren, D. Dew and M. Eamon Biotechnology In Minerals Processing: Technological Breakthroughs Creating Value // Proceedings of 16th International Biohydrometallurgy Symposium, Cape Town, South Africa, 25–29 September 2005, p. XVII-XXIV.
2. Rawlings D.E., Dew D., Plessis C. Biomineralization of metal-containing ores and concentrates // TRENDS in Biotechnology. – 2003. – Vol. 21, № 1. – P. 38–44.
3. Brierley J.A. Present and future commercial applications of biohydrometallurgy // Hydrometallurgy. 2001. V. 59. P. 233–239.
4. Brierley J.A. Biohydrometallurgy – This Microbiologist's Perspective / Adv. Mat. Res. 2007. Vols. 20-21. P. 3-10.
5. Сагдиева М.Г. Биогидрометаллургические методы извлечения цветных, благородных и редких металлов из различных видов нетрадиционного рудного сырья Республики Узбекистан. // Узбекский биологический журнал, № 1–2, 2006, с. 11–18.
6. Сагдиева М.Г. Микроорганизмы золоторудных месторождений Узбекистана и их использование в извлечении благородных металлов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук, Ташкент, 1997, 38 с.
7. Sagdiyeva M.G., Borminskiy S.I., Rakhmatullaeva Z.E., Tonkikh A.K., Sanakulov K.S., B. Scott. Biohydrometallurgical Processing of Flotation Tailings from Different Copper Mills // Proceedings of 17th International Biohydrometallurgical Symposium, 2007, Frankfurt on Maine, p. 299–303.