

## Влияние органических и неорганических источников углерода на процесс биоокисления сульфидного концентрата

<sup>1,2</sup>Нечаева А.В., <sup>1,3</sup>Елкина Ю.А., <sup>1</sup>Меламуд В.С., <sup>1,3,\*</sup>Булаев А.Г.

<sup>1</sup>Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва

<sup>2</sup>Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Биологический факультет, Москва; \*bulaev.inmi@yandex.ru

Биогидрометаллургические технологии применяются для переработки сульфидных руд и концентратов по всему миру уже несколько десятилетий. Основной областью применения биогидрометаллургии является переработка упорных золотосодержащих концентратов. Эта технология основана на процессе деструкции сульфидных золотовмещающих минералов аэробными экстремально ацидофильными микроорганизмами, окисляющими двухвалентное железо и серу для получения энергии. Она позволяет перерабатывать сульфидные концентраты, не создавая высокой нагрузки на окружающую среду, значительно повышая степень извлечения золота цианированием из упорных сульфидных концентратов [1]. Несмотря на то, что основы этой биотехнологии были разработаны еще в 70-х годах 20 века, до сих пор проводятся исследования с целью изучения влияния различных факторов на эффективность процесса. Важным фактором может являться доступность органического и неорганического источника углерода в среде, так как среди микроорганизмов, окисляющих сульфидные минералы, встречаются как автотрофы и гетеротрофы, так и миксотрофы [2].

Целью данной работы являлось определение влияния дополнительного источника углерода (СО<sub>2</sub> и мелассы) на биоокисление золотосодержащего пирит-арсенопиритного флотоконцентрата при различных температурах.

Состав концентрата представлен в Таблице 1. Основными сульфидными минералами концентрата являлись пирит (56%) и арсенопирит (14%). Процесс биоокисления концентрата проводили в периодическом режиме в лабораторных реакторах объемом 2.5 л при следующих параметрах: аэрация – 5 л/мин, скорости вращения турбинной мешалки – 500 об/мин. Температура в первой серии экспериментов составила 39-40°C, а во втором – 49-50°C. Плотность пульпы (Т : Ж) составляла 1 : 5 (200 г концентрата на 1000 мл жидкой среды). Продолжительность эксперимента составила 40 сут.

В качестве инокулята использовали микробную культуру, сформировавшуюся в процессе биоокисления того же сульфидного концентрата при 40°C в проточном режиме, в которой преобладали ацидофильные бактерии *Leptospitillum ferriphilum*, *Sulfobacillus* spp., а также археи *Ferroplasma acidiphilum* и *Acidiplasma* sp.

Табл. 1 – Химический состав концентрата

Компонент	Содержание, %
Fe <sub>Σ</sub>	31,8
Fe <sub>s</sub>	29,1
S <sub>Σ</sub>	34,7
S <sub>s</sub>	34,4

S <sub>сульфатная</sub>	0,2
S <sup>0</sup>	0,1
As <sub>Σ</sub>	6,9
As <sub>S</sub>	6,5
Au, г/т	45,5

Инокулят вносили в реакторы в таком объеме, чтобы начальная численность клеток микроорганизмов в жидкой фазе составляла  $1 \times 10^8$  кл/мл. В пульпу первого реактора осуществляли подачу CO<sub>2</sub> (примерно 0,01 л/мин). В пульпу второго вносили 0,02% мелассы (в начале эксперимента, на 10, 20 и 30 сутки). В контрольный реактор не вносили каких-либо дополнительных источников углерода. При проведении процессов биоокисления определяли параметры жидкой фазы пульпы биоокисления, которые позволяют оценить активность биоокисления (рН, Eh, концентрацию ионов Fe<sup>3+</sup> и Fe<sup>2+</sup>, а также мышьяка. При необходимости рН пульпы регулировали путем добавления серной кислоты или карбоната кальция. Численность клеток микроорганизмов определяли прямым подсчетом с помощью фазово-контрастного микроскопа Carl Zeis Jena ( $\times 1600$ ). После окончания эксперимента твердые остатки биоокисления отделяли от жидкой фазы пульпы и подвергали их химическому анализу для определения степени окисления сульфидных минералов.

При 40°C оба источника углерода в значительной степени повлияли на биоокисление концентрата, что подтверждалось как параметрами жидкой фазы пульпы, так и анализом твердых остатков биоокисления (Таблицы 2 и 3). Значение рН жидкой фазы пульпы в реакторах 1 и 2 быстро снижалось, тогда как в контрольном реакторе рН снижался намного медленнее. Во всех реакторах потребовалось внесение CaCO<sub>3</sub> для поддержания рН. В первом реакторе расход CaCO<sub>3</sub> составил 314 кг/т концентрата, во втором – 292 кг/т, тогда как в контрольном реакторе – 71 кг/т.

При 50°C подача CO<sub>2</sub> повлияла на биоокисление в большей степени, чем добавление мелассы (Таблицы 2 и 3). Во всех реакторах, так же как и при 40°C, потребовалось внесение CaCO<sub>3</sub> для поддержания рН. В первом реакторе расход CaCO<sub>3</sub> составил 456 кг/т концентрата, во втором – 137 кг/т, тогда как в контрольном реакторе – 102 кг/т.

Табл. 2 – Параметры жидкой фазы пульпы в конце эксперимента (на 40 сутки)

Температура	Источник углерода	рН	Eh	Fe <sup>3+</sup> , г/л	Fe <sup>2+</sup> , г/л	As, г/л	Численность микроорганизмов, $\times 10^7$ кл/мл
40°C	CO <sub>2</sub>	1,4	730	41,4	1,4	10,9	60
	Меласса	1,37	736	37,8	1,4	10,9	110
	Контроль	1,26	730	19,6	0,14	10,3	33
50°C	CO <sub>2</sub>	1,72	753	56	1,75	12	24
	Меласса	1,55	667	8,12	1,68	3	22
	Контроль	1,36	662	5,74	2,31	2,1	12

Табл. 3 – Окисление сульфидных минералов и сульфидной серы после 40 суток биоокисления

Температура	Окисление, %
-------------	--------------

	Источник углерода	Ss	Пирит	Арсенопирит
40°C	CO <sub>2</sub>	81	77	98
	Меласса	78	73	98
	Контроль	37	27	93
50°C	CO <sub>2</sub>	94	93	99
	Меласса	42	20	93
	Контроль	45	20	92

При 40°C более эффективному биоокислению соответствовала более высокая численность микроорганизмов в жидкой фазе пульпы. Таким образом, очевидно, что внесение дополнительного источника углерода, необходимого для конструктивного метаболизма хемолитотрофов, позволило увеличить активность биоокисления концентрата, так как повысило численность микроорганизмов в популяции. Однако стоит отметить, что при 50°C численность микроорганизмов в популяции различалась в меньшей степени, чем при 40°C. Анализ состава микробных популяций с помощью высокопроизводительного секвенирования фрагментов генов 16S рРНК показал, что при 50°C подача CO<sub>2</sub> в пульпу реактора привела к увеличению в популяции доли бактерий р. *Sulfobacillus*. Таким образом, вероятно, что на скорость биоокисления сульфидных минералов влияли также изменение количественных соотношений между микроорганизмами в популяции, а не только изменение их общей численности.

#### Литература

1. Johnson D.B. Biomining — biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste material // Current Opinion in Biotechnology. 2014. V. 30. P. 24–31.