

БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ СПОСОБ ПЕРЕРАБОТКИ СУЛЬФИДНОЙ КОБАЛЬТ-МЕДНО-НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ

*Исследованы основные параметры бактериально-химического выщелачивания никеля, меди и кобальта из сульфидной руды месторождения Шануч (Камчатский край) с использованием ассоциации мезофильных бактерий. Определены объем микробной культуры (соотношение инокулята к питательной среде), плотность пульпы (Т:Ж), температура, при которых достигнуты максимальные степени извлечения металлов (79,5 % Ni, 51,5 % Cu, 79,4 % Co). **Ключевые слова:** бактериально-химическое выщелачивание, хемолитотрофные микроорганизмы, сульфидная руда, никель, медь, кобальт.*

Khaynasova T.S., Levenets O.O. (RGC FEB RAS)

BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING AS ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MODE OF SULPHIDE COBALT-COPPER-NICKEL ORE PROCESSING

*The main parameters of nickel, copper and cobalt bacterial-chemical leaching of Shanuch sulphide ore deposit (Kamchatka region) with use of mesophilic bacterial association were studied. Microbial culture volume (ratio of inoculum to nutrient medium 1:4), pulp density (solid to liquid ratio 1:5), temperature (45 °C) were determined at which the maximum extents of metals extraction had been reached (79,5 % Ni, 51,5 % Cu, 79,4 % Co). **Key words:** bacterial-chemical leaching, chemolithotrophic microorganisms, sulphide ore, nickel, copper, cobalt.*

С истощением мировых запасов сульфидных руд и переходом на комплексное и ресурсосберегающее природопользование применение инновационных, экологически безопасных и малоотходных технологий представляется наиболее рациональным путем в извлечении ценных компонентов. Биовыщелачивание — признанный метод переработки минерального сырья, сочетающий в себе ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами (пирометаллургия, автоклавное выщелачивание) переработки руд и концентратов. Эти преимущества выражаются, главным образом, в простоте организации и способности к самоподдержанию процессов. Основные исследования в области бактериально-химических технологий связаны, как правило, с изучением извлечения меди и золота. В связи с увеличившейся потребностью в нержавеющей стали на мировом рынке металлов возрос спрос на никель [11]. Поэтому в последние годы многие ученые больше внимания уделяют исследованию биовыщелачивания никеля и сопутствующих ему ценных компонентов из сульфидных и латеритных руд [7, 12].

Несмотря на возросший интерес к латеритным рудам, сульфидные руды являются более важным объектом для интенсивной и комплексной переработки минерального сырья, поскольку помимо никеля содержат кобальт, медь, золото, металлы платиновой группы. Обычно сульфидные медно-никелевые руды подверга-

ются флотации для получения концентратов, которые затем направляются на высокотемпературную переработку. Однако на смену традиционному подходу к извлечению ценных компонентов в качестве альтернативы могут прийти технологии биовыщелачивания [11]. В некоторых случаях их экономичность стоит под вопросом. Для обеспечения рентабельности процессов необходимо использовать соответствующую методологию их оптимизации. Основные пути повышения продуктивности выщелачивания заключаются в применении высокоактивных культур микроорганизмов, выборе оптимальных условий и схем переработки минерального сырья.

При оптимизации бактериально-химического выщелачивания, в частности в агитационных условиях (чановым способом), важными факторами являются количество микробной культуры, плотность пульпы, температура, оказывающие влияние на эффективность процесса. Несмотря на актуальность исследований по оптимизации параметров, информации, посвященной определению оптимальных концентраций и объемов микробного компонента для бактериально-химического выщелачивания никеля, меди и кобальта из сульфидной руды в агитационных условиях, практически не встречается [8]. В производственных масштабах может возникнуть проблема получения больших объемов биомассы клеток. Возможные манипуляции, связанные с их накоплением (осаждение), трудоемки, затратны по времени и расходу реактивов, а также могут оказывать влияние на рост и окислительную активность используемой микробной культуры, что существенно снижает оперативность проведения окислительных процессов.

В ходе исследования биовыщелачивания отработанных катализаторов (spent catalyst) умеренными термофилами было установлено [10], что извлечение никеля практически одинаково при плотностях пульпы 5 и 10 %, при этом потребление кислоты пульпой заметно выше во втором случае. Опыты по биовыщелачиванию низкосортной медной руды при разных плотностях пульпы (5, 10, 15, 20, 30 % (масса/объем)) показали [9], что повышение плотности до 20 % не оказывает отрицательного влияния на рост микроорганизмов, что подтверждается максимальным значением соотношения Fe^{3+}/Fe^{2+} при данной плотности пульпы. Дальнейшее сгущение пульпы ведет как к снижению соотношения Fe^{3+}/Fe^{2+} , так и к замедлению роста бактерий вследствие ухудшения диффузии кислорода в среде.

Выщелачивание никельсодержащих сульфидов исследовалось в широком температурном диапазоне. Так, приводятся [11] следующие данные по извлечению никеля из сульфидов при разных температурах с помощью хемолитотрофных микроорганизмов: 40 % при 30 °C (17 % в абиотическом контроле), 45 % при 45 °C (30 % в абиотическом контроле), 90 % при 60 °C (75 % в абиотическом контроле).

На основании вышесказанного была сформулирована цель настоящей работы — определение оптимальных условий бактериально-химического выщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды.

Образец руды. Для исследования использована кобальт-медно-никелевая руда месторождения Шануч (Камчатский край), содержащая 60 % рудных (сульфидных) и 40 % нерудных минералов. Степень измельчения исходной пробы составляла 100 мкм (~100 %). Основной минеральный сульфидный состав руды указанного месторождения таков (в %): пирротин — 85–90, пентландит — 5–6, халькопирит — 2–5, виоларит — 0,2–0,5. Содержание в пробе (в %) никеля $3,57 \pm 0,36$, меди — $0,55 \pm 0,08$, кобальта — $0,093 \pm 0,015$, оксида железа — $29,4 \pm 1,8$.

Микробная культура. Инокулятом служила автохтонная бактериальная культура, выделенная авторами из окисленной руды месторождения. Первичное накопление микроорганизмов проводили в колбах Эрленмейера объемом 800 мл в стационарных условиях при температуре 30 °С с использованием образца руды и питательной среды Сильвермана и Люндгрена (9К) без сульфата железа в соотношении 1:10 [1]. Дальнейшее культивирование и сохранение микроорганизмов осуществляли в стационарных (колбы) и агитационных (лабораторный реактор) условиях при сохранении температурного режима и состава минеральных солей. В результате молекулярно-биологических исследований (ПЦР-Realtime) обнаружено присутствие в составе микроорганизмов представителей родов *Acidithiobacillus* (*A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*) и *Sulfobacillus* (*S. thermosulfidooxidans*).

Экспериментальные условия. Бактериально-химическое выщелачивание руды проводили в периодическом режиме в серии лабораторных реакторов (чановым способом), собранной сотрудником лаборатории геохимии и геотехнологии НИГТЦ ДВО РАН А.А. Балыковым. Оптимальное соотношение объема посевной культуры микроорганизмов и объема питательной среды для биовыщелачивания ценных компонентов определяли при следующих условиях. Рабочий объем пульпы составлял 1887 мл. В состав жидкой фазы пульпы (1800 мл) входили микробная культура и раствор питательных солей среды 9К без сульфата железа в различных соотношениях (1:1, 1:2, 1:4, 1:10). Отношение твердой фазы пульпы к жидкой (Т:Ж) во всех вариантах составляло 1:5. Начальное значение pH питательной среды — 1,62. В течение процесса раствор не подкисляли. Температурный режим поддерживали на уровне 30 °С. Агитацию содержимого реактора осуществляли с помощью механической мешалки при скорости ее вращения ~100 об/мин. Продолжительность эксперимента — 27 сут.

Определение оптимальной плотности пульпы проводили при соотношении микробной культуры к свежей

питательной среде 1:4. Параметры пульпы приведены в табл. 1. Остальные параметры процессов (температура, скорость перемешивания, отсутствие подкисления) оставались без изменения. Продолжительность эксперимента — 28 сут.

Оптимальную температуру для биовыщелачивания определяли при плотности пульпы Т:Ж = 1:5, соотношении микробной культуры к свежей питательной среде 1:4 и трех температурах: комнатной, 30 и 45 °С. Продолжительность эксперимента — 23 дня.

Аналитические исследования. В ходе процесса после остановки перемешивания и осаждения руды в течение 5–10 мин измеряли основные параметры пульпы: pH, Eh, концентрацию бактериальных клеток в 1 мл раствора, концентрации железа, никеля, меди и кобальта. Контроль pH и Eh пульпы осуществляли с помощью портативного устройства — PH-099 Waterproof pH/ORP/Temperature meter («Kelilong Electron Co., Ltd», Китай). Клеточную численность устанавливали прямым подсчетом с помощью микроскопа Микромед 3 вар. 3–20 с фазово-контрастной насадкой («Микромед», Россия — Китай). Концентрации $Fe^{2+}/Fe^{3+}/Fe_{общ}$ измеряли путем титрования с трилоном Б по стандартной методике [3]. Перед химическим анализом на остальные металлы (Ni, Cu, Co) пробы пульпы предварительно центрифугировали при 4000 об/мин в течение 5–15 мин. Отобранный объем жидкой фазы пульпы компенсировали добавлением равного объема раствора минеральных солей 9К без сульфата железа (pH = 1,62), испарение — дистиллированной водой. Кеки после выщелачивания дважды промывали дистиллированной водой в объеме, равном объему жидкой части пульпы, высушивали, истирали и отправляли на химический анализ. Определение концентрации металлов (Ni, Cu, Co) в жидкой и в твердой фазах осуществлялось сотрудниками химико-технологической лаборатории НИГТЦ ДВО РАН на атомно-абсорбционном спектрофотометре 6300 Shimadzu («Shimadzu corporation», Япония) в пламени ацетилен—воздух.

Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных объемах посевной культуры микроорганизмов. Параметры биовыщелачивания никеля из пентландита рассматривались Р. Погаку и Б. Кодали [8], в частности указывались концентрации микроорганизмов (1–10 %). Авторы отмечают, что использование данных концентраций биомассы в начале процесса не оказывает существенного влияния на степень извлечения металла, максимальное значение которого достигало только 55 %. В настоящей работе объектом исследования являлась полисульфидная руда, поэтому полученные данные актуальны и

носят практический характер. В ходе исследования мы оценивали влияние на процесс соотношения объема инокулята с концентрацией $1,08 \cdot 10^9$ кл/мл к объему питательной среды, а оптимальное значение исследуемого параметра устанавливали также по наи-

Таблица 1

Параметры пульпы в процессе биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных плотностях пульпы

Плотность пульпы (Т:Ж)	Объем инокулята, мл	Объем питательной среды 9К без Fe, мл	Масса руды, г	Объем пульпы, мл (при плотности руды 3,15 г/см³)
1:5	350	1400	350	$1750 + 350/3,15 \approx 1861$
1:3	330	1320	550	$1650 + 550/3,15 \approx 1825$
1:2	320	1280	800	$1600 + 800/3,15 \approx 1854$

высшей степени извлечения металлов.

Активизация окисления руды на начальных этапах сопровождалась расходом протонов водорода из питательной среды для бактерий (химическое выщелачивание) и, как следствие, повышением значений pH (в среднем до 3,34). Далее на протяжении всего процесса отмечали образование серной кислоты уже биологическим путем, т.е. в результате окисления бактериями серосодержащего субстрата. В целом можно было заключить, что использование различных объемов культуры существенно не влияло на изменение концентрации протонов водорода в растворе. Несмотря на небольшое

снижение pH для случая с соотношением бактериальной культуры к питательной среде 1:4, его значение стабилизировалось и во всех процессах к концу биовыщелачивания было на одном уровне — 1,85.

Аналогичная ситуация наблюдалась в отношении клеточной численности: влияния первоначальной концентрации клеток на дальнейшее развитие микробной культуры не выявлено. Развитие планктонных форм бактерий по стандартной кривой не происходило. Можно было наблюдать колебания численности клеток во всех вариантах эксперимента, тем самым обнаруживая некоторую стадийность в их развитии. Численность биомассы достигала достаточно высоких значений (в среднем до $2,3 \cdot 10^9$ кл/мл).

Как уже отмечалось, в основной состав исследуемой руды входили такие сульфидные минералы, как пирротин, пентландит и халькопирит, образующие устойчивую минеральную ассоциацию [4], для которой характерно высокое содержание пирротина. В связи с этим особый интерес представлял процесс извлечения железа как показатель хода и интенсивности разложения пирротинсодержащей составляющей. При соотношении инокулята к питательной среде 1:4 отмечался более стабильный и плавный окислительный процесс биовыщелачивания. В сравнении с остальными вариантами соотношения инокулята к питательной среде (1:1, 1:2, 1:10) переход ионов железа в трехвалентную форму, связанный с увеличением железоокисляющей активности микроорганизмов, в данном случае происходил быстрее: соответствует временному периоду с 8-е по 12-е сут. В остальных случаях — ближе к 15-м сут и позже. Максимальные концентрации трехвалентного железа (15,15 г/л) — основного окисляющего химического агента — достигались при соотношении 1:1. Однако необходимо отметить, что различие в концентрации железа во всех вариантах обусловлены не столько интенсивностью

Таблица 2

Скорость выщелачивания (мг/л·сут) и извлечение (%) металлов в процессе биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных соотношениях объема посевной культуры микроорганизмов (инокулята) к объему питательной среды (1:1, 1:2, 1:4, 1:10)

Показатель	Металл											
	Ni				Cu				Co			
	1:1	1:2	1:4	1:10	1:1	1:2	1:4	1:10	1:1	1:2	1:4	1:10
Скорость выщелачивания за период, сут:												
0–3	157	170	159	119	53	61	61	108	3	3	3	3
4–6	178	230	213	209	11	3	6	9	4	6	5	5
7–8	120	155	220	195	11	11	4	6	3	5	3	4
9–12	140	128	200	178	–1	0,25	4	–3	5	4	7	5
13–15	107	303	313	177	3	12	6	0,66	2	3	7	5
16–18	243	40	123	177	8	–6	0,33	0,33	7	6	6	4
19–21	23	–23	57	37	–9	2	–3	–2	4	4	2	0,6
22–24	297	233	240	120	7	3	6	0,33	2	4	4	6
25–27	53	167	20	123	1	–5	0	–7	4	2	2	1
Среднее	146	156	172	148	9	9	9	13	4	4	4	4
Извлечение	61,4	63,6	70,1	59,7	25,9	23,5	25,7	33,7	61,2	62,5	72,4	58,6

окислительных процессов, сколько отличием в количестве металла, изначально попавшего с инокулятом. Динамика изменения железа в растворе определяла изменение окислительно-восстановительного потенциала пульпы. Максимальные значения (555 мВ) и самый быстрый рост параметра наблюдались в варианте эксперимента с соотношением 1:4.

Результаты экспериментальных исследований показали, что бактериально-химическое выщелачивание повышает степень извлечения металлов и позволяет получать богатые, сложные по составу полиметаллические растворы с концентрацией никеля до 5,77 г/л, меди 0,39 г/л, кобальта 0,15 г/л. Было обнаружено, что извлечение меди после 3 сут прекращалось, в то время как никеля и кобальта еще продолжалось. Таким образом, это подтверждает ранее выявленные факты снижения или отсутствия прироста концентрации меди в раствор после 3 сут [5], а также селективность растворения никеля и кобальта.

После биовыщелачивания были получены кеки с еще достаточно высоким содержанием металлов по отношению к их содержанию в исходной руде. Особенно это касается меди (до ~70 %). Это обусловлено не только недостаточностью выщелачивания, но и тем фактом, что металлы, выпадая из раствора в осадок, формировали фазу вторичных продуктов окисления на поверхности руды. Следовательно, при подборе технологических схем переработки подобного сырья необходимо учитывать явление переосаждения металлов.

С точки зрения расхода микробной культуры показано, что добавление больших объемов инокулята нецелесообразно (табл. 2). В условиях периодического режима в лабораторных реакторах соотношение посевной культуры к раствору питательных солей 1:4 являлось оптимальным для выщелачивания никеля и кобальта, степень извлечения которых соответственно составляла 70,13 и 72,43 %.

Максимальное значение извлечения меди было отмечено при соотношении посевной культуры к питательной среде 1:10. Ранее наблюдали, что медь, входящая в состав халькопирита, в периодическом режиме при средних температурах (~30 °С) не выщелачивается в абиотическом процессе [5]. Однако, как показано в настоящей работе, биовыщелачивание металла более интенсивно происходило в условиях эксперимента с самой низкой концентрацией биомассы в начале процесса, т.е. высокая численность клеток тоже подавляла растворение меди.

При рассмотрении объема посевной культуры как фактора, влияющего на биовыщелачивание, установлено, что степень извлечения металлов при экспериментально оптимальном соотношении культуры к среде в среднем увеличивалась на 8,60 % для никеля, на 8,66 % для меди и на 11,66 % для кобальта. При этом оптимальное значение данного параметра повышало продуктивность биовыщелачивания никеля на 9,38–14,9 %, меди — на 23,24–30,28 % и кобальта — на 13,70–19,01 %.

Анализ данных по скоростям выщелачивания металлов (табл. 2) подтвердил факт стадийности (дискретности) интенсивности их выщелачивания, отмеченный ранее в исследованиях в периодическом режиме в колбах [5]. В последнем случае не было обеспечено активного массообмена твердой и жидкой фаз пульпы, поэтому явление стадийности могло сформироваться в отсутствии достаточной ее гомогенизации. Тем не менее, обнаружение этого эффекта в реакторных условиях подтвердило исключительно электрохимическую природу стадийности растворения слагающих руду минералов. Полученная информация может быть использована для прогноза и реализации смен выщелачивающего раствора в сложных технологических схемах биовыщелачивания руды.

Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных плотностях пульпы. Скорость выщелачивания зависит от общей площади поверхности минерального субстрата, доступной для растворения. Увеличение общей минеральной поверхности может быть обеспечено повышением плотности пульпы. Исследования по определению оптимальной плотности пульпы показали следующие результаты. Во всех трех экспериментах происходило выщелачивание значительного количества железа, но лишь при Т:Ж = 1:5 все оно в конечном счете переходило в трехвалентную форму благодаря окислительной деятельности бактерий. Активное развитие бактериальной биомассы в пульпе наблюдалось только при Т:Ж = 1:5. С 10-х сут происходил экспоненциальный рост бактерий, сопровождающийся окислением двух-

Таблица 3
Скорость выщелачивания (мг/л·сут) и извлечение (%) металлов в процессе биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных плотностях пульпы (1:5, 1:3, 1:2)

Показатель	Металл								
	Ni			Cu			Co		
	1:5	1:3	1:2	1:5	1:3	1:2	1:5	1:3	1:2
Скорость выщелачивания за период, сут:									
0–3	167	293	227	22,3	74,3	63,0	3,8	7,0	6,5
4–8	58	24	26	14,0	–1,2	–30,6	2,2	1,5	1,4
9–14	78	102	8,3	11,3	51,8	55,3	1,1	1,4	–0,7
15–21	187	39	26	4,3	–6,0	–20,7	5,5	1,5	0,3
22–28	144	77	–16	1,6	20,7	32,9	4,9	1,0	0,2
Среднее	127	107	54,3	10,7	27,9	20,0	3,5	2,5	1,5
Извлечение	67,8	31,4	12,1	28,3	41,2	2,9	59,2	22,3	9,0

валентного железа и серы с образованием трехвалентного железа и серной кислоты. Интенсификация окислительных процессов в пульпе с помощью микроорганизмов отражалась в снижении pH (до 2,33 при Т:Ж = 1:5 против 2,78 и 3,21 при Т:Ж 1:3 и 1:2) и повышении Eh раствора (до 554 мВ при Т:Ж = 1:5 против 321 и 269 мВ при Т:Ж 1:3 и 1:2).

При Т:Ж = 1:5 в первые 3 сут выщелачивание никеля и кобальта происходило химическим путем за счет серной кислоты, присутствующей изначально в питательной среде для бактерий. Затем скорость выщелачивания снижалась, что согласовывалось с lag-фазой развития бактерий в пульпе, после чего возрастала до максимальных значений во время экспоненциального роста биомассы. Таким образом, второй этап выщелачивания никеля и кобальта происходил биологическим путем.

При Т:Ж 1:2 доминировало химическое выщелачивание с максимумом извлечения никеля и кобальта в первые 3 сут. В дальнейшем не только резко снижалась скорость извлечения, но и наблюдалось переосаждение нерастворимых форм металлов (табл. 3).

В результате исследования установлено, что в данных условиях биовыщелачивания оптимальной является плотность пульпы Т:Ж 1:5. Наиболее интенсивно выщелачивание с помощью микроорганизмов происходило с 15-х по 21-е сут. В целом, при Т:Ж 1:5 и 1:2 извлечение меди значительно ниже, чем извлечение никеля и кобальта, что согласуется с результатами предыдущих исследований и соответствует теории электрохимического растворения полиминеральных руд. Однако при Т:Ж 1:3 извлечение меди выше не только, чем при Т:Ж 1:5 и 1:2, но и чем извлечение никеля и кобальта при данной плотности пульпы (табл. 3).

Таким образом, установлено, что с повышением плотности пульпы растет доля химического выщелачивания. В мезофильных условиях оптимальной плотностью пульпы для выщелачивания никеля и кобальта является Т:Ж 1:5, для выщелачивания меди — Т:Ж 1:3. В настоящей работе показано, что дальнейшее повышение плотности пульпы выше 10 % в зна-

чительной степени влияет на извлечение металлов из сульфидных руд, что согласуется с литературными данными [10].

Для достижения комплексного извлечения целевых металлов выщелачивание следует начинать при плотности пульпы Т:Ж 1:3, при которой лучше извлекается медь, а затем разбавлять пульпу до Т:Ж 1:5 для эффективного извлечения никеля и кобальта.

Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных температурах. У некоторых сульфидных минералов (например, халькопирита) скорость разложения значительно возрастает с повышением температуры. При повышенных температурах можно улучшить извлечение металлов с помощью удаления пассивирующей серы или других продуктов окисления, которые значительно замедляют процесс выщелачивания.

В настоящей работе только при температуре 30 °С наблюдались обычные для процесса биовыщелачивания снижение рН и повышение Eh в начале эксперимента. Конечные значения данных параметров практически были одинаковы во всех трех экспериментах с той лишь разницей, что при 45 °С закисление пульпы и повышение Eh происходило медленнее.

Бактерии сохранялись в пульпе даже при 45 °С, хотя и в гораздо меньшем количестве, чем в мезофильных условиях. При комнатной температуре и при 30 °С биомасса развивалась практически одинаково, без выраженной лаг-фазы, что связано с адаптацией микроорганизмов к условиям выщелачивания во время проведения предыдущего эксперимента. Активный прирост бактерий наблюдался в первые 9 сут.

При комнатной температуре и 30 °С из руды извлекалось железо (10–12 г/л), его полное окисление бактериями происходило в период с 8-х по 16-е сут. При 45 °С концентрация железа в пульпе была низкой на протяжении всего эксперимента (2–3 г/л), при этом тоже происходило его полное окисление, но только к 20-м сут.

Максимальное извлечение металлов наблюдали при 45 °С (табл. 4). Особенно сильно повышение температуры влияло на извлечение меди, так как халькопирит в мезофильных условиях плохо поддается выщелачиванию. При этом динамика извлечения каждого из метал-

лов существенно не изменялась в зависимости от температуры. Максимальные скорости извлечения никеля и кобальта были зафиксированы после 14 сут, в то время как медь переходила в раствор главным образом в первые 3–8 сут.

В настоящей работе удалось достичь более высоких показателей извлечения никеля по сравнению с данными Э. Уотлинг [11]. Проведенные исследования позволили найти решение проблемы селективности извлечения металлов, заключающейся в том, что из сульфидных кобальт-медно-никелевых руд выщелачиваются преимущественно никель и кобальт; при этом концентрация меди в получаемом растворе ниже в несколько раз [2]. Выщелачивание данной руды целесообразно проводить при 45 °С. Также можно выщелачивать медь при 45 °С на начальном этапе, после чего направлять кек на довыщелачивание и извлечение никеля и кобальта в мезофильных условиях.

Таким образом, оптимальным для растворения никеля (до 70 %) и кобальта (до 72 %) является соотношение объема посевной культуры микроорганизмов к объему раствора питательных солей 1:4, для выщелачивания меди (до 34 %) — 1:10. При этом удалось повысить продуктивность биовыщелачивания никеля, меди и кобальта соответственно на 15, 30 и 19 %. Оптимальной плотностью пульпы для выщелачивания никеля (до 70 %) и кобальта (до 70 %) является Т:Ж 1:5, а для выщелачивания меди (41 %) — 1:3. Установлено, что с повышением плотности пульпы растет доля химического выщелачивания. Максимальная степень извлечения металлов достигнута при 45 °С (79,5 % Ni, 51,5 % Cu, 79,4 % Co).

Полученные результаты показали, что обеспечить комплексность и повысить степень извлечения металлов из сульфидной кобальт-медно-никелевой руды можно путем разделения процесса выщелачивания на две стадии:

1) выщелачивание главным образом меди при соотношении объема посевной культуры микроорганизмов к объему раствора питательных солей 1:10, плотности пульпы Т:Ж 1:3 и температуре 45 °С;

2) выщелачивание никеля и кобальта при соотношении объема посевной культуры микроорганизмов к

объему раствора питательных солей 1:4, плотности пульпы Т:Ж 1:5 и температуре 20–45 °С.

Таблица 4

Скорость выщелачивания (мг/л·сут) и извлечение (%) металлов в процессе биовыщелачивания сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных температурах

Показатель	Металл								
	Ni			Cu			Co		
	$t_{\text{комн}}$	30 °С	45 °С	$t_{\text{комн}}$	30 °С	45 °С	$t_{\text{комн}}$	30 °С	45 °С
Скорость выщелачивания за период, сут:									
0–3	80	43	240	–6,5	–2,6	100,7	1,2	0,5	4,5
4–8	74	46	234	29,3	12,3	24,4	1,0	1,5	5,5
9–14	98	190	43	–1,2	6,7	3,2	3,0	4,8	1,9
15–21	133	230	337	3,6	6,3	3,3	4,8	6,9	9,8
22–23	155	120	195	6,5	2,5	22,5	1,0	–1,5	4
Среднее	108	126	210	6,3	5,0	30,8	2,2	2,4	5,1
Извлечение	41,1	54,9	79,5	16,9	15,1	51,5	40,1	52,7	79,4

ЛИТЕРАТУРА

1. Биоготехнология металлов: практ. руководство / Г.И. Каравайко, Дж. Росси, А. Агате и др. — М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1989.
2. Левенец О.О. Исследование бактериального окисления сульфидной кобальт-медно-никелевой руды / Актуальные аспекты современной микробиологии: Материалы VII молодежной школы-конф. с междунар. участием. — М.: МАКС Пресс, 2011. — С. 121–123.
3. Методы анализа природных вод / А.А. Резников, Е.П. Муликовская, И.Ю. Соколов — М.: Недра, 1970.

4. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. — 2009. — № 5. — С. 75–81.

5. Трухин Ю.П., Хайнасова Т.С. Исследование кинетики и механизма биовыщелачивания сульфидной Co-Cu-Ni руды в периодическом режиме // Горный информ.-аналит. бюл. — 2011. — № 10. — С. 111–117.

6. Cameron R.A., Lastra R., Mortazavi S. et al. Elevated-pH bioleaching of low-grade ultramafic nickel sulphide ore in stirred-tank reactors at 5 to 45 °C // Hydrometallurgy. — 2009. — V. 99. — P. 77–83.

7. Cwailina B., Fischer H., Ledakowicz S. Bacterial leaching of nickel and cobalt from pentlandite // Physicochemical problems of mineral processing. — 2000. — N 34. — P. 17–24.

8. Pogaku R., Kodali B. Optimization of bacterial oxidation process parameters for selective leaching of nickel by *Thiobacillus ferrooxidans* // International journal of chemical reactor engineering. — 2006. — V. 4. — N 1. — P. 1307.

9. Pradhan D., Pal S., Sukla L.B. et al. Bioleaching of low-grade copper ore using indigenous microorganisms // Indian Journal of Chemical Technology. — 2008. — V. 15. — P. 588–592.

10. Srichandan H., Gahan C.S., Kim D.-J., Lee S.-W. Bioleaching of spent catalyst using moderate thermophiles with different pulp densities and varying size fractions without Fe supplemented growth medium // International journal of chemical and biological engineering. — 2012. — V. 6. — P. 22–28.

11. Watling H.R. The bioleaching of nickel-copper-cobalt sulfide ore // Hydrometallurgy. — 2008. — V. 106. — P. 32–37.

12. Yang C., Qin W., Lai S. et al. Bioleaching of a low grade nickel-copper-cobalt sulfide ore // Hydrometallurgy. — 2011. — V. 106. — N 1/2. — P. 32–37.

© Хайнасова Т.С., Левенец О.О., 2015

Хайнасова Татьяна Сергеевна // khainasova@yandex.ru
Левенец Ольга Олеговна // leveolga@yandex.ru

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 546.65; 549.752/.753; 553.07

Лопатко С.В. (ООО «Коралайна Инжиниринг»),
Макеев А.Б. (ИГЕМ РАН)

ФАКТОР «ФУКУСИМЫ» НА РЫНКЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Приведены свойства 17 металлов, пригодных в качестве поглотителей тепловых нейтронов. Лучшими из них являются средние и тяжелые лантаноиды Dy, Er, Sm и Gd. Рассчитаны индексы возобновления полной активности и стоимость единицы в сопоставлении с 1 кг диспрозия. Показана роль аварии АЭС «Фукусима» на рост потребления четырех редкоземельных металлов в атомном машиностроении. Обоснована необходимость использования технологических подходов и рыночных механизмов к обеспечению редкоземельным сырьем отечественной промышленности и отказ от освоения карбонатитового месторождения Томтор в Якутии. **Ключевые слова:** поглотители тепловых нейтронов, Фукусима, редкоземельные металлы, апатит, эвдиалит, Ловозеро, Томтор.*

Lopatko S.V. (Coralina Engineering), Makeev A.B. (IGEM RAS)
THE INFLUENCE OF «FUKUSHIMA» FACTOR ON THE REE MARKET

*We demonstrate the properties of 17 metals suitable for use as absorbers of thermal neutrons; the best of them are medium and heavy lanthanides Sm, Gd, Dy and Er. There has been calculated the Indices of their full activity recovery and unit costs in comparison with 1 kg of dysprosium. We show the role of the “Fukushima” accident on the growth of four rare earth metals’ consumption in atomic mechanical engineering. We prove the necessity of using technological approaches and market mechanisms to supply the domestic industry with rare earth raw materials and the abandoning of development of Tomtor carbonatite deposit in Yakutia. **Key words:** thermal neutron absorbers, Fukushima, rare earth metals, apatite, eudialyte, Lovozero, Tomtor.*

Крупные аварии в атомной энергетике, несомненно, оказывали влияние на рынок редкоземельных элементов, стимулировали рост цен и потребности в данном

виде сырья. Авария на АЭС в США была первой, которая вызвала многократный рост научных исследований по редкоземельной тематике.

Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. привела к переоценке не только перспектив развития атомной энергетики в мире, но и потребовала увеличения производства первичной редкоземельной продукции в СССР.

В ходе работ по оценке последствий Чернобыльской АЭС в 1987 г. впервые была направлена служебная записка с обоснованием увеличения объема производства и расширения сфер применения редкоземельной продукции в отраслях ВПК и народном хозяйстве. В 1988 г. была сформирована отраслевая программа увеличения производства редкоземельных элементов на 30 тыс. т в год к 1995 г. в рамках предприятий главка Минсредмаша на базе трех сырьевых источников — хибинского апатита, костного детрита и попутного извлечения при добыче урана месторождений Средней Азии и Казахстана. Производство иттрия и дефицитных лантаноидов средней и тяжелой групп из руд редкометалльного месторождения Кутесай в Киргизии планировалось поддерживать на стабильном уровне до 2005 г. Нужно отметить, что производство редкоземельной продукции в Минсредмаше осуществляли предприятия шести главных управлений. Изначально существовал и поощрялся различный подход, как к выбору сырьевых источников, так и к технологиям реализации отдельных этапов редкоземельного производства.

В рамках отраслевой программы были переданы технологические регламенты и оборудование с Прикаспийского горно-химического комбината на два других предприятия, перерабатывающих костный детрит месторождения Меловое, — это гидрометаллургические заводы в городах Лермонтов и Днепродзержинск. В 1992 г. они должны были выйти на производство 450 и 1400 т первичного концентрата оксидов РЗЭ соответственно. Добыча и переработка костного детрита месторождения Меловое в Казахстане была прекращена в 1997 г., а складские запасы урановых руд полностью переработаны к 2002 г. Спектр получаемого концентрата