



Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н.М. Федоровского»
(ФГБУ «ВИМС»)

**ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ:**
МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ
РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ, ТЕХНИКИ И
ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

**СЕРИЯ:
ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ И
ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

МОСКВА, 2020 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ИМ. Н.М. ФЕДОРОВСКОГО»
(ФГБУ «ВИМС»)

**ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ:
МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ, ТЕХНИКИ
И ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Серия: Гидрометаллургическая и геотехнологическая
переработка минерального сырья

МОСКВА
РИС ВИМС
2020

Материал подготовили:

Курков А.В.

Ануфриева С.И.

Соколова В.Н.

Мамошин М.Ю.

Лихникевич Е.Г.

Пермякова Н.А.

Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Гидрометаллургическая и геотехнологическая переработка минерального сырья. М.: Изд-во ВИМС, 2020. — 30 с.

Развитие современных высокотехнологических направлений отечественной экономики требует проведения постоянного анализа мировых достижений в области технологий переработки минерального сырья с целью внедрения их в практику освоения объектов отечественной минерально-сырьевой базы. В сборнике приведены новые технологические решения (в том числе прорывные) в гидрометаллургии и геотехнологии (за период 2019–2020 гг.).

СОДЕРЖАНИЕ

1. ГЛИЦИНАТНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ	4
2. БЕСЦИАНИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД НА ОСНОВЕ РАСТВОРИТЕЛЕЙ: FLOTENTGOLDSC 570, JINCHAN ENVIRONMENTAL-FRIENDLY GOLD DRESSING AGENT (JGD)	7
3. ИОНИТЫ С ЭФФЕКТОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ	8
4. СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ	12
5. ИОННЫЕ ЖИДКОСТИ	15
6. РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ БИОТЕХНОЛОГИИ	16
7. ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛИТИЯ ИЗ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАССОЛОВ И НОВЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ	19
8. РАСШИРЕНИЕ СФЕРЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	20
9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАТНОГО ОСМОСА ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ	22
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	24

Основные направления развития прорывных гидрометаллургических процессов:

1. Выщелачивание драгоценных и цветных металлов из руд, концентратов и техногенного сырья растворами глицина в щелочной среде (глицинатное выщелачивание).

2. Бесцианидные технологии извлечения золота из упорных руд на основе растворителей: FlotentGold^{SC} 570, Jinchan Environmental-friendly Gold Dressing Agent (JGD).

3. Селективное извлечение металлов из различных растворов с использованием ионитов с механизмом молекулярного распознавания (ИМР).

4. Применение сверхкритических жидкостей (СКЖ) в гидрометаллургических процессах переработки природного и техногенного сырья.

5. Внедрение в практику гидрометаллургических производств высокоселективных выщелачивающих агентов нового типа — ионных жидкостей (ИЖ).

6. Новые разработки в области биотехнологий: сорбция металлов с использованием биосорбентов, использование бактерий для вскрытия инкапсулированного золота и обеспечения гидравлической проницаемости рудных тел.

7. Инновационные разработки в области извлечения лития из геотермальных рассолов и новых видов сырья.

8. Расширение сферы применения геотехнологических методов на добычу новых типов рудного сырья.

9. Использование технологии обратного осмоса (ОО) для глубокой очистки сточных вод гидрометаллургических предприятий.

Подробное описание прорывных гидрометаллургических технологий, разработанных в последние годы, и анализ перспектив их практического применения выполнены в монографии [1].

1. ГЛИЦИНАТНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ

Глицин (аминоуксусная кислота) — нетоксичное вещество, производимое в больших количествах для использования преимущественно в качестве кормовой добавки для скота. Глицин обладает уникальной способностью к комплексообразованию с ионами различных драгоценных, редких и цветных металлов, что в сочетании с нетоксичностью делает его наиболее перспективным выщелачивающим реагентом нового поколения. В последние годы работы по его внедрению в реальные технологические схемы гидрометаллургической переработки минерального сырья приобретают промышленные масштабы. Глицин способен эффективно выщелачивать медь, золото и другие важные элементы из различных видов сырья (рисунок 1).

25 Mn Марганец 54.9	26 Fe Железо 55.9	27 Co Кобальт 58.9	28 Ni Никель 58.7	29 Cu Медь 63.5	30 Zn Цинк 65.4	31 Ga Галлий 69.7	32 Ge Германий 72.6	33 As Мышьяк 74.9	34 Se Селен 79.0
	44 Ru Рутений 101.0	45 Rh Родий 102.9	46 Pd Палладий 106.4	47 Ag Серебро 107.9	48 Cd Кадмий 112.4	49 In Индий 114.8	50 Sn Олово 118.7	51 Sb Сурьма 121.8	52 Te Теллур 127.6
	76 Os Осмий 190.2	77 Ir Иридий 192.2	78 Pt Платина 195.1	79 Au Золото 197.0	80 Hg Ртуть 200.6	81 Tl Таллий 204.4	82 Pb Свинец 207.2	83 Bi Висмут 209.0	

ОТНОШЕНИЕ К ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ РАСТВОРАМИ ГЛИЦИНА

● - данные отсутствуют	● - выщелачиваются	● - нет данных, запланированы эксперименты
○ - не выщелачиваются	● - выщелачивание исследуется	● - амфотерные, образуют анионы

Рисунок 1 — Классификация основных металлов по применимости выщелачивания растворами глицина [2]

Основными преимуществами использования глицина в качестве альтернативы традиционным выщелачивающим реагентам являются его доступность, нетоксичность, дешевизна, а также тот факт, что он не реагирует с нерудными минералами (глины, карбонаты, оксиды и гидроксиды железа), что упрощает переработку полученных растворов за счет исключения операций очистки от элементов-примесей. Глицинатное выщелачивание металлов протекает в щелочной среде (pH 9–12,5) [1].

Основные исследования и разработки в области глицинатного выщелачивания выполняются в Австралии компанией Mining and Process Solutions (MPS, г. Перт, Австралия), государственно-частной организацией CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) и Университетом Curtin University (штат Западная Австралия). Компанией MPS запатентованы процессы глицинатного выщелачивания металлов GlyLeach и GlyCat [2].

Процесс GlyLeach — селективное выщелачивание драгоценных и цветных металлов растворами глицина при pH 9–12.

Глицинатное выщелачивание Au (процесс GlyLeach) полностью исключает использование NaCN. Процесс перспективен для отработки месторождений золотосодержащих руд методами кучного (КВ) и подземного выщелачивания (ПВ). В агитационном режиме процесс GlyLeach требует нагревания.

Глицинатное ПВ золота из руд песчаникового типа в палеоруслах успешно испытано в 2019 г. в Австралии компанией MPS. Использование процесса GlyLeach при pH 12,5 обеспечило извлечение ~85 % Au в раствор. Металл извлекается из продуктивных растворов (ПР) на активированный уголь [3].

Глицинатное ПВ Au перспективно к использованию в РФ на месторождениях типа Гагарское, Долгий Мыс, а также на погребенных россыпях как альтернатива цианидному, хлоридному и гипохлоритному

выщелачиванию. Метод может быть испытан для извлечения Au из золотосодержащего сырья, упорного к цианированию (руды с повышенным содержанием гидроксидных минералов железа, сульфидные руды).

Глицинатное выщелачивание Cu. Глицин является перспективным реагентом для выщелачивания Cu из халькопирита: тонкоизмельченный халькопирит полностью растворяется в щелочных растворах глицина в течение 24 ч при комнатной температуре. Сульфиды железа при этом не растворяются. Окислителем в процессе является атмосферный воздух. Процесс может быть реализован в вариантах агитационного выщелачивания, КВ или ПВ. Медь из растворов извлекается обычным экстракционно-электролизным методом.

Компании Thor Mining и Terramin Pty Ltd провели полупромышленные испытания глицинатного ПВ меди на месторождениях окисленных и сульфидных медных руд Karunda и Moonta (штат Южная Австралия). В ходе полупромышленных испытаний извлечение Cu из окисленной руды составило 78,48 % Cu за 24 ч, из сульфидной руды — 60 % Cu за 168 ч. Сооружение промышленного участка ПВ на месторождении Karunda запланировано на 2020 г. [4]. Программа работ финансируется федеральным правительством Австралии [5].

Глицинатное выщелачивание Ni и Co осуществляется при комнатной температуре. Процесс испытан компанией MPS на сульфидных рудах кратона Yilgarn (Австралия) и шлаках плавильных заводов штата Западная Австралия. В режиме агитационного выщелачивания извлечение металлов из сульфидных концентратов составляет $E_{Ni} = 90 \%$ и $E_{Co} = 83 \%$ за 20 сут. Преимуществом использования процесса GlyLeach для переработки никель-кобальтового сырья является низкое содержание элементов-примесей (Fe, Si, Mn, Al) в растворах, что исключает затратные операции по осаждению гидроксидов железа и других элементов-примесей [6]. Ni и Co из ПР выделяются путем ионообменной сорбции или прямым осаждением в виде смеси сульфидов. После выделения Ni и Co из ПР глицин может быть повторно использован для выщелачивания. Оптимальной формой промышленной реализации процесса является КВ [7].

Процесс GlyLeach для переработки сульфидных никелевых и медно-никелевых руд перспективен к использованию для следующих типов сырья:

- пентландитовых руд и концентратов, в том числе мышьяковистых;
- руд, плохо поддающихся флотационному обогащению;
- отвалов забалансовых медно-никелевых сульфидных руд;
- пирометаллургических полупродуктов и отходов (штейнов, шлаков);
- хвостов флотационного обогащения медно-никелевых сульфидных руд.

Процесс GlyCat — выщелачивание Au из медистых золотосодержащих руд. Выщелачивание производится растворами глицина (Gly) с добавкой небольшого количества NaCN (0,15–0,2 г/л NaCN, pH 9–12). Опытно-промышленные работы по испытанию процесса GlyCat проведены в 2017–2019 гг. на золотодобывающем предприятии Telfer компании Newcrest

(Австралия). В результате работ достигнута степень извлечения Au из коллективного медно-пиритного флотоконцентрата — 83–90 %. Процесс выполняется в агитационном режиме при pH 10,5 и плотности пульпы 40 % твердого. Продолжительность выщелачивания — 48 ч при 35 °C [8].

2. БЕСЦИАНИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД НА ОСНОВЕ РАСТВОРИТЕЛЕЙ: FLOTENTGOLDSC 570, JINCHAN ENVIRONMENTAL-FRIENDLY GOLD DRESSING AGENT (JGD)

В качестве заменителя цианистого натрия по извлечению золота из руд могут быть использованы нецианистые реагенты китайского производства. Реагенты обладают такими преимуществами, как низкая токсичность, относительная безопасность для окружающей среды, высокая рекуперация, хорошая стабильность, удобная эксплуатация, малый расход, удобное хранение и транспортировка.

В Китае запатентован новый реагент для выщелачивания золота и серебра без цианида *Flotent Gold^{SC} 570*, состоящий из Na₂O, N, H₂O, Ca, Fe, NH₄ и некоторых других веществ [9]. Рекомендуемая концентрация реагента составляет 3–11 %, оптимальное же значение определяется в зависимости от характеристик руды и содержания золота. Расход аналогичен расходу цианида. Реагент рекомендуется использовать при температуре выше 10 °C. *Flotent Gold^{SC} 570* способен полностью заменить собой цианид натрия, цианид калия и цианид кальция и уже широко применяется на рудниках по добыче золота и серебра при кучном выщелачивании и выщелачивании из отвалов [9].

В России в ООО «НВП Центр-ЭСТАгео» были проведены испытания *Flotent Gold^{SC} 570* по альтернативному выщелачиванию пробы окисленной золотосодержащей руды месторождения «Савкино». Результатами испытаний установлено, что извлечение золота при использовании криптоцианидного выщелачивающего реагента на 12,81 % выше, расход реагента *Flotent Gold^{SC} 570* на 20 % ниже, чем при использовании цианистого натрия [10].

Новым высокотехнологичным продуктом, созданным крупнейшей китайской компанией *Guangxi Senhe High Technology Co. Lmt*, является запатентованный реагент *Jinchan Environmental-friendly Gold Dressing Agent (JGD)* (Патентное свидетельство ZL201010553418.7) [11]. К основным химическим соединениям в продукте относятся SC(NH₂)₂, NaSiO₃, NaOH, (NaPO₃)₆ [12], а элементный состав включает, %: C — 22,04, Na — 38,3, N — 15,12, O — 22,92, Fe — 0,96, Cl — 0,36. Из представленного состава реагента можно предположить, что цианистые соединения образуются при его введении в пульпу уже непосредственно в процессе выщелачивания золота. Поэтому данный реагент может быть использован при извлечении золота в качестве заменителя цианида натрия без изменения технологического процесса и оборудования (аналогично обычному цианированию) [13].

На некоторых зарубежных крупных промышленных предприятиях по добыче золота, в том числе *China National Gold Mine Group, Shandong Gold*

Group, Zhaoyuan Gold Group, Zijin Mine Group, реагент был успешно опробован и внедрен в производственный процесс [14]. В России данный реагент был использован ООО «Золото Дельмачик» при отработке Дельмачикского золоторудного месторождения.

3. ИОНИТЫ С ЭФФЕКТОМ МОЛЕКУЛЯРНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

Иониты с эффектом молекулярного распознавания — сорбенты хелатного действия, имеющие в своей структуре сорбционно-активные полости, размеры и пространственная конфигурация которых идентичны (комплементарны) размерам и пространственной конфигурации иона целевого элемента. Захват и удержание ионов в этих полостях осуществляются за счет взаимодействия хелатообразующего соединения (лиганда), встроенного в структуру сорбента, с ионом целевого элемента по принципу «ключа и замка». Использование ИМР обеспечивает селективность по целевому элементу, недостижимую при использовании традиционных ионитов и экстрагентов.

Основные преимущества использования ИМР для извлечения металлов из растворов:

- весьма высокая селективность (гиперселективность) по отношению к целевым металлам (ионам);
- возможность достижения весьма высоких значений емкости насыщения по целевому элементу по сравнению с обычными сорбентами (например, по Au — до 70–120 кг/т ионита);
- практически абсолютная полнота протекания процесса сорбции целевого элемента — до достижения концентраций целевого металла, составляющих 0,001 мг/л и менее;
- простота аппаратно-технологической компоновки процесса, возможность создания компактных модульных установок;
- десорбция целевых металлов с насыщенных ИМР дает продукты высокой чистоты;
- исключение длительных и затратных операций очистки и концентрирования исходных растворов [15].

ИМР для применения в горнодобывающей промышленности выпускаются компаниями IBC Advanced Technologies, Inc и 6th Wave Innovation Corp (обе — США) [16]. Компания IBC Advanced Technologies выпускает линейку ИМР серии SuperLig для сорбции Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Re, U, Pd, Pt, Rh, Ir, Ru, Au, In, PЗЭ, V и других элементов [17]. Компания 6th Wave Innovation Corp (США) выпускает ИМР серии IXOS для сорбции Au из продуктивных растворов цианирования различных руд [18].

Промышленное использование ИМР осуществляется на многих зарубежных предприятиях:

- извлечение Pd из растворов хлорирования концентратов МПГ Рифа Меренского и Рифа UG2 на ИМР SuperLig 2 — компания Impala Platinum Ltd., ЮАР);

– селективное извлечение индивидуальных МПГ из отработанных катализаторов (Pt — на ИМП SuperLig 133 и SuperLig 59, Rh — на ИМП SuperLig 190, Ir — на ИМП SuperLig 192, Pd — на ИМП SuperLig 2) — предприятие SepraMet компании IBC Advanced Technologies, Inc (г. Хьюстон, США);

– сорбция Rh на ИМП SuperLig 190 (предприятие Tanaka Kikinzoku К.К. (Япония) и Sino Platinum (КНР));

– совместная сорбция Co и Ni с отдельной десорбцией (ИМП SuperLig 138), очистка растворов от микропримесей Cu, Fe и Ni (ИМП SuperLig 176 и другие) — предприятие по производству кобальта Kasese Cobalt Company Limited (Уганда);

– сорбция микропримесей Bi из растворов выщелачивания медных руд на ИМП SuperLig 83 (предприятия Asarco Grupo Mexico (г. Амарильо, штат Техас, США), LS Nikko (Южная Корея) и Port Kembla, компания Port Kembla Copper Pty Ltd., штат Новый Южный Уэльс, Австралия) для улучшения качества черновой меди;

– сорбция U из хлоридных растворов выщелачивания на ИМП SuperLig 268 и SuperLig 171 (предприятие Norwood компании UraniumSA Limited (Norwood, штат Южная Австралия) [1, 9].

В общей сложности в мире эксплуатируется свыше 40 установок по извлечению металлов и очистке растворов от примесей с использованием ИМП [20].

ИМП для сорбции Au. Применение ИМП обеспечивает количественное извлечение Au из растворов с получением весьма высоких содержаний Au в насыщенном сорбенте (до 100 г Au/кг ионита), недостижимых при применении традиционных технологий. Это открывает возможность получения конечного продукта (осадок, губка, сплав Доре) с содержанием 99,99 % Au непосредственно на мелких и отдаленных месторождениях без отправки на внешний аффинаж. Основным сорбентом данного типа является ИМП SuperLig 127 [21]. В отсутствие Au SuperLig 127 становится селективен к Ag. Сорбция железа и цветных металлов не происходит. Десорбция золота с насыщенного ионита производится деионизированной водой при 70 °С. Элюаты десорбции Au направляются сразу на получение катодного осадка.

Описание технологической схемы процесса сорбции Au и Ag из промышленных растворов цианидного выщелачивания с использованием ИМП SuperLig 127 приводится в [21]. Схема, представленная на рисунке 2, испытана в полупромышленном масштабе на одном из золотодобывающих предприятий США.

Разделение суммы РЗЭ на индивидуальные элементы с использованием ИМП. Компания IBC Advanced Technologies успешно испытала в опытно-промышленном масштабе технологию молекулярного распознавания для извлечения РЗЭ из руд месторождения РЗЭ тяжелой подгруппы Vokan Mountain (штат Аляска, США) с разделением их на индивидуальные элементы [22].

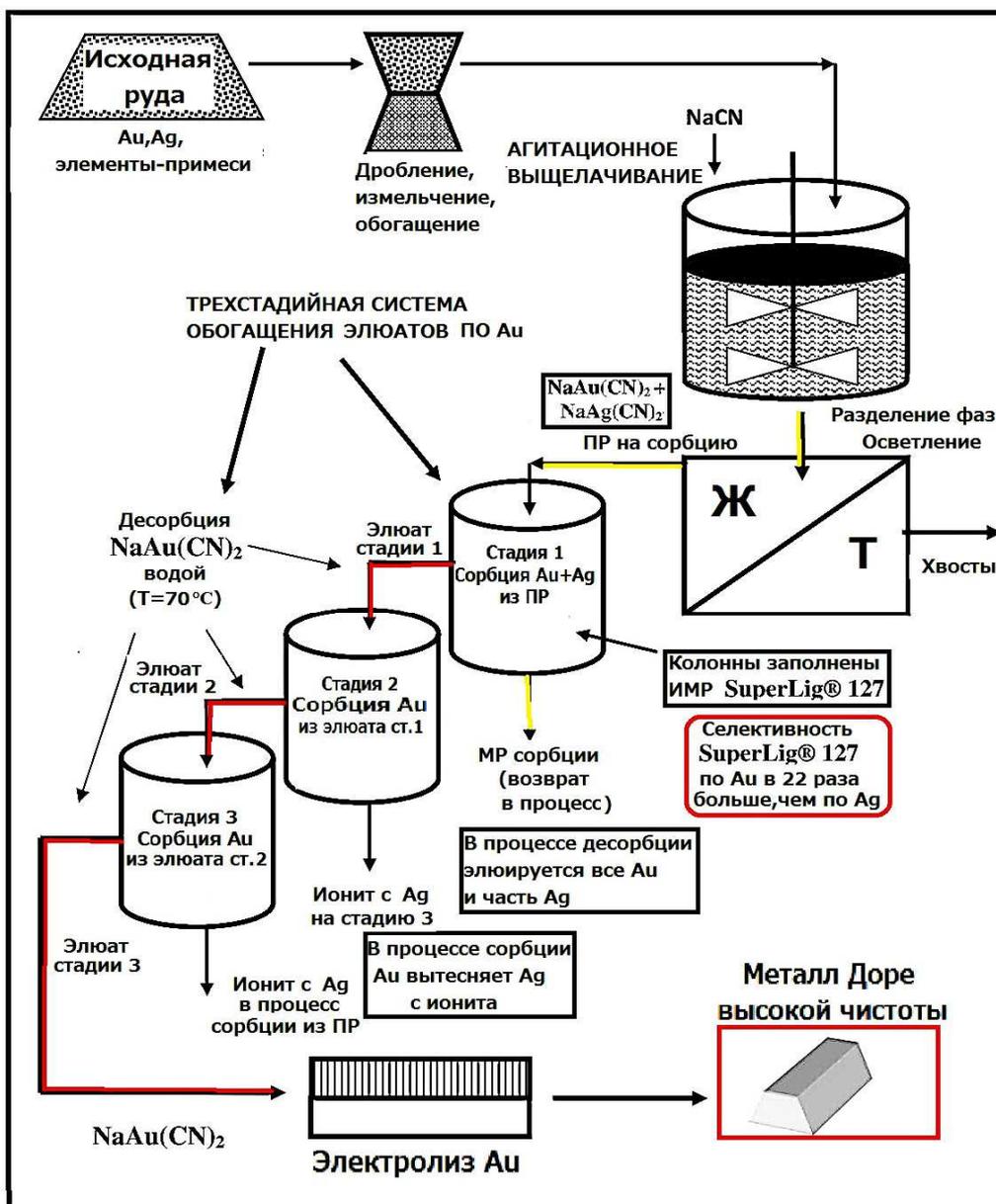


Рисунок 2 — Блок-схема процесса сорбции Au из продуктивных растворов цианидного выщелачивания с применением IMP SuperLig 127 [21]

Процесс выделения РЗЭ из ПР и получения индивидуальных элементов (рисунок 3) состоит из трех стадий: вначале производится отделение двух элементов (Sc и Ce), обладающих специфическими химическими свойствами; затем выполняется разделение остальных РЗЭ с получением суммарных элюатов десорбции легкой и тяжелой подгрупп; сорбция индивидуальных РЗЭ из данных элюатов с получением высокочистых солей (карбонатов индивидуальных РЗЭ). Применение технологии молекулярного распознавания позволяет осуществлять селективное выделение наиболее дефицитных РЗЭ (например, диспрозия), минуя стадию предварительного отделения дешевых РЗЭ (лантана и церия) [23]. Работы выполняются при поддержке министерства обороны США и губернатора штата Аляска [24].

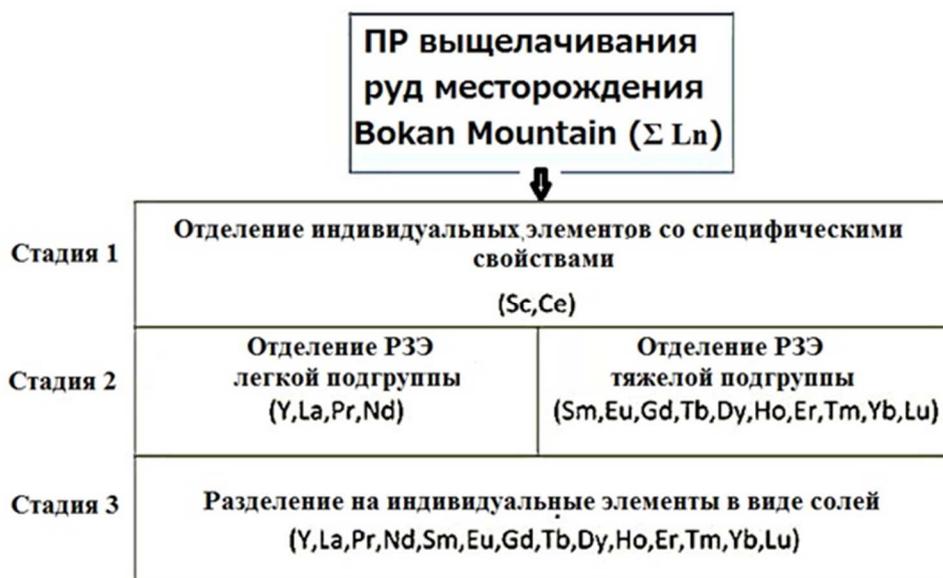


Рисунок 3 — Схема процесса разделения суммы РЗЭ на индивидуальные элементы на сооружаемом предприятии проекта Bokan Mountain [23]

Неорганические ИМР являются новым поколением ИМР (2018–2020 гг.), в котором используются особенности кристаллической структуры различных химических соединений. В отличие от обычных ИМР, неорганические сорбенты обладают высокой химической стойкостью и термоустойчивостью, что обуславливает возможность их использования в экстремальных условиях. Это — нерастворимые в воде соли переходных металлов, сложные оксиды переходных металлов и их твердые растворы. Селективность неорганических ИМР к ионам конкретных металлов определяется зарядом целевого иона и строением кристаллической решетки такого сорбента. Синтезированы неорганические ИМР для сорбции Li и Sc.

Неорганические иониты молекулярного распознавания для селективной сорбции лития из рассолов синтезированы, испытаны и запатентованы компанией Lilac Solutions Inc (США), сооружающей в настоящее время предприятие по сорбции Li из гидротермальных рассолов бассейна Salton Sea (штат Калифорния, США) [25]. Сорбент представляет собой композицию из микрочастиц неорганических сорбционно-активных соединений, инкорпорированных в пористую структуру полимерных гранул-носителей диаметром 2 мм, изготовленных на основе термо- и кислотоустойчивого поливинилидендифторида (PVDF). В качестве сорбционно-активного вещества используется композиция состава $Li_4Mn_5O_{12}$, покрытая тонким защитным слоем ZrO_2 . Диаметр сорбционных микрочастиц составляет 0,1–10 мкм (в среднем — 3 мкм), толщина слоя ZrO_2 — 4 нм. Инкорпорация микрочастиц в полимерную структуру гранул носителя обеспечивает высокую удельную поверхность сорбции, обеспечивая в то же время устойчивый поток рассола через колонну сорбции лития. Содержание сорбционно-активных неорганических веществ составляет 75–90 % от общей массы гранул. Схематическое строение ИМР для сорбции Li^+ проиллюстрировано на рисунке 4.

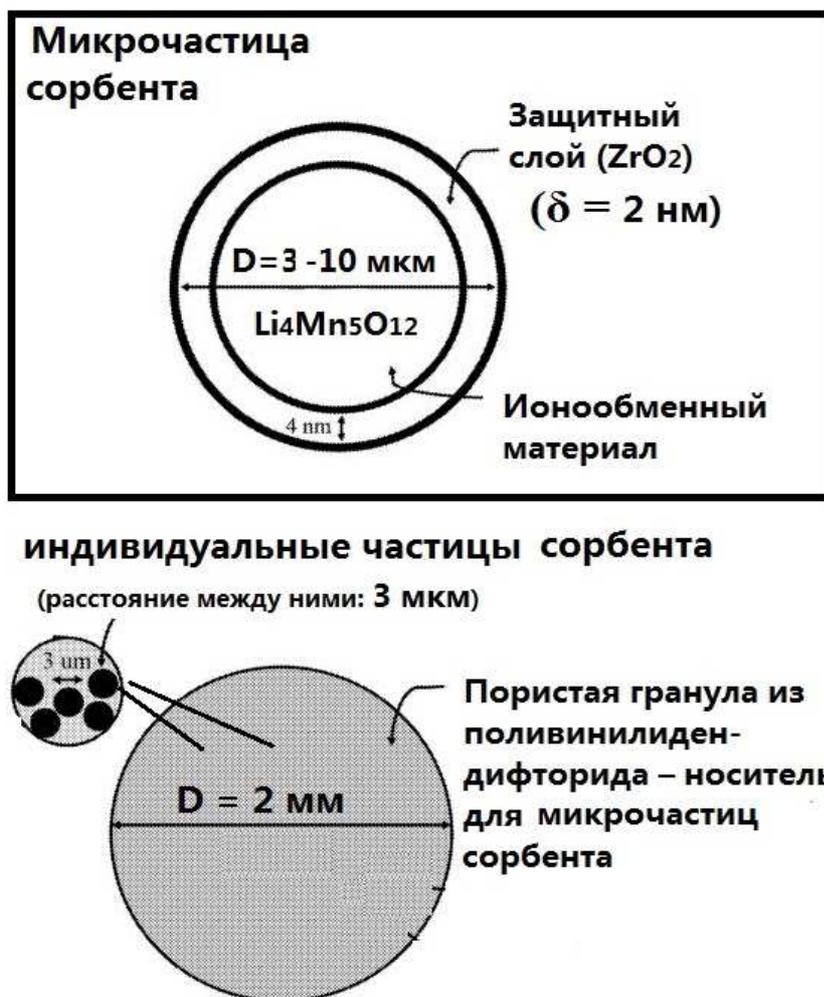


Рисунок 4 — Строение гранул ИМР для сорбции Li из геотермальных рассолов [25]

Значения достигнутой емкости насыщения ИМР по Li высоки: в результате десорбции насыщенного ИМР 1 М HCl при интенсивности пропускания десорбирующего раствора 0,5–1,0 V/V_{ИМР}/час концентрация LiCl в элюате составила 29,7 г/л. Десорбция выполняется при комнатной температуре [25].

Перспективные области применения. Извлечение лития из богатых литиеносных рассолов месторождений РФ (Удачинское (Республика Саха-Якутия), Ковыктинское и Знаменское (Иркутская обл.) и др.). Извлечение скандия и РЗЭ из различных растворов выщелачивания урановых руд, алюминиевых шламов и др.

4. СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

Сверхкритическая жидкость — состояние вещества, в котором одновременно проявляются свойства и жидкости, и газа. СКЖ одновременно обладает проникающей способностью газа и растворяющей способностью жидкости.

Как известно, каждое вещество может существовать в жидком, твердом и газообразном состоянии. Области нахождения вещества в каждом из этих состояний иллюстрируются фазовыми диаграммами (диаграммами состояния), составляемыми в координатах температура–давление (рисунок 5).

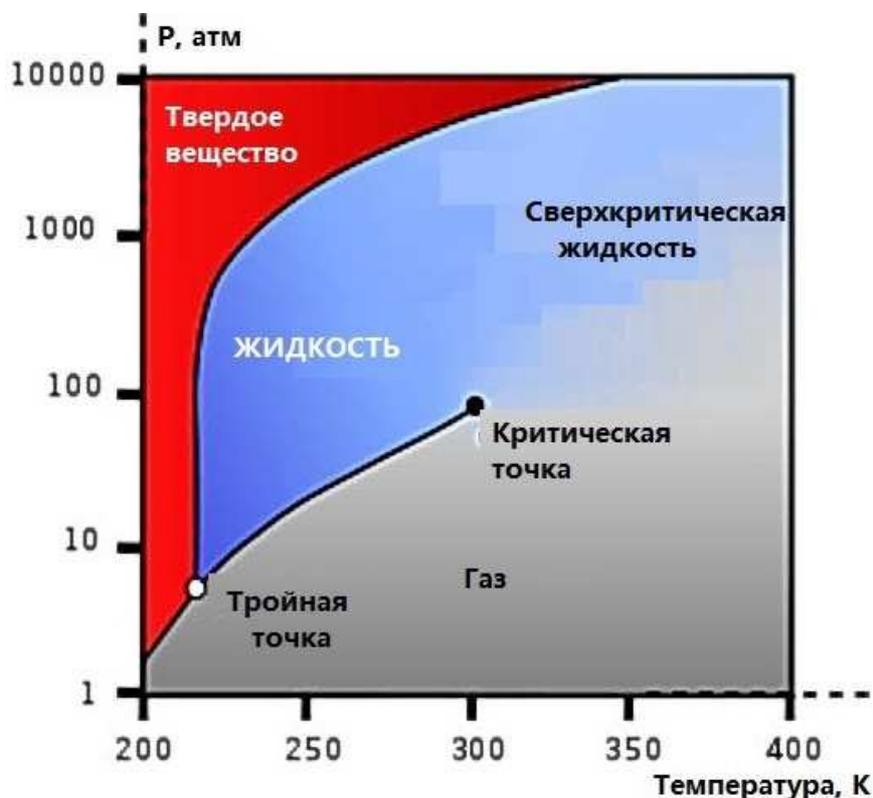


Рисунок 5 — Фазовая диаграмма состояния CO_2 в координатах температура–давление [26]

Свойства СКЖ резко отличаются от свойств веществ в обычном состоянии. Например, сверхкритическая вода растворяет жиры и масла, нерастворимые в ней в обычном состоянии, приобретая также окислительные свойства (например, способна окислять пирит, на чем основаны некоторые технологические разработки). СКЖ, подобно газам, обладают весьма низкой вязкостью и экстремально высокой смачиваемостью, приобретая способность легко проникать в мельчайшие поры и микротрещины. В сверхкритических средах протекают многие химические реакции, которые невозможно осуществить в обычных условиях. Растворимость обычных газов в scCO_2 весьма высока: растворимость кислорода в scCO_2 составляет 10–30 %, в то время как в воде — не более 0,01 %. Разбавленные растворы органических кислот в среде scCO_2 приобретают способность выщелачивать металлы из рудного сырья так же эффективно, как и обычно используемые минеральные кислоты [27].

Преимущество использования сверхкритических жидкостей в качестве среды для выщелачивания — возможность быстрого получения конечных продуктов путем простой декомпрессии (газификации) насыщенной жидкой фазы, минуя промежуточные стадии.

Практическим методом реализации промышленных процессов переработки сырья с использованием СКЖ является автоклавное выщелачивание.

Сверхкритический диоксид углерода ($scCO_2$) — наиболее доступная сверхкритическая жидкость. Критические давление и температура диоксида углерода составляют 74 атм и 31 °С [28]. Для получения $scCO_2$ требуются сравнительно небольшие энергозатраты. Он дешев, нетоксичен, химически инертен, не обладает коррозионной активностью, негорюч и легко удаляется путем простого сброса давления. $scCO_2$ смешивается с кислородом, водородом и является хорошим растворителем для многих органических и неорганических веществ. Хотя CO_2 является парниковым газом, его использование практически ничего не добавляет в атмосферу, так как его источником является сама атмосфера.

Перспективно использование $scCO_2$ для окисления сульфидных и углеродистых золотосодержащих руд и концентратов перед цианидным выщелачиванием Au. Процесс разработан в Иордании (King Abdullah University of Science and Technology). Определяющее значение при этом имеет крайне низкая вязкость и весьма высокая проникающая способность $scCO_2$. Это позволяет исключить из технологических схем переработки золотосодержащего сырья энергозатратную операцию ультратонкого измельчения и существенно ускорить процесс. Окисление сульфидных минералов производится при pH ~12 и давлении 120–600 атм. Метод может быть реализован в непрерывном режиме, напоминающем автоклавное окисление, в том числе и в варианте многостадийного выщелачивания. Перспективно его использование для переработки сульфидных медно-никелевых руд, медноколчеданных руд, цинковых руд и т.д. [29].

Разработан процесс выщелачивания РЗЭ из лома аккумуляторов электромобилей в среде сверхкритического диоксида углерода ($scCO_2$), в котором растворен экстрагент хелатного действия — азотнокислый комплекс трибутилфосфата (ТБФ- HNO_3). Разработчик процесса — University of Toronto (Канада) [30].

Исходный лом измельчается до крупности –0,012 мм и загружается в реактор совместно с расчетным количеством комплекса ТБФ- HNO_3 . После закрытия и герметизации реактора в систему подается $scCO_2$. Продукты реакции собираются в емкости декомпрессии. Диоксид углерода в процессе декомпрессии переходит в газообразное состояние и выпускается в атмосферу. Рабочие параметры процесса: температура — 35 °С, давление — 310 атм, продолжительность — 2 ч, интенсивность перемешивания — 1500 об/мин, соотношение Ж:Т = 10:1. Извлечение РЗЭ в раствор составляет 86–90 % [30].

Технологическое оборудование, входящее в состав установки, произведено компанией Supercritical Fluid Technology Inc. (США). Схема установки показана на рисунке 6.

Процессы с использованием СКЖ перспективны для переработки сырья ДМ, редких элементов, а также различных видов электронного лома и твердых бытовых отходов (ТБО).

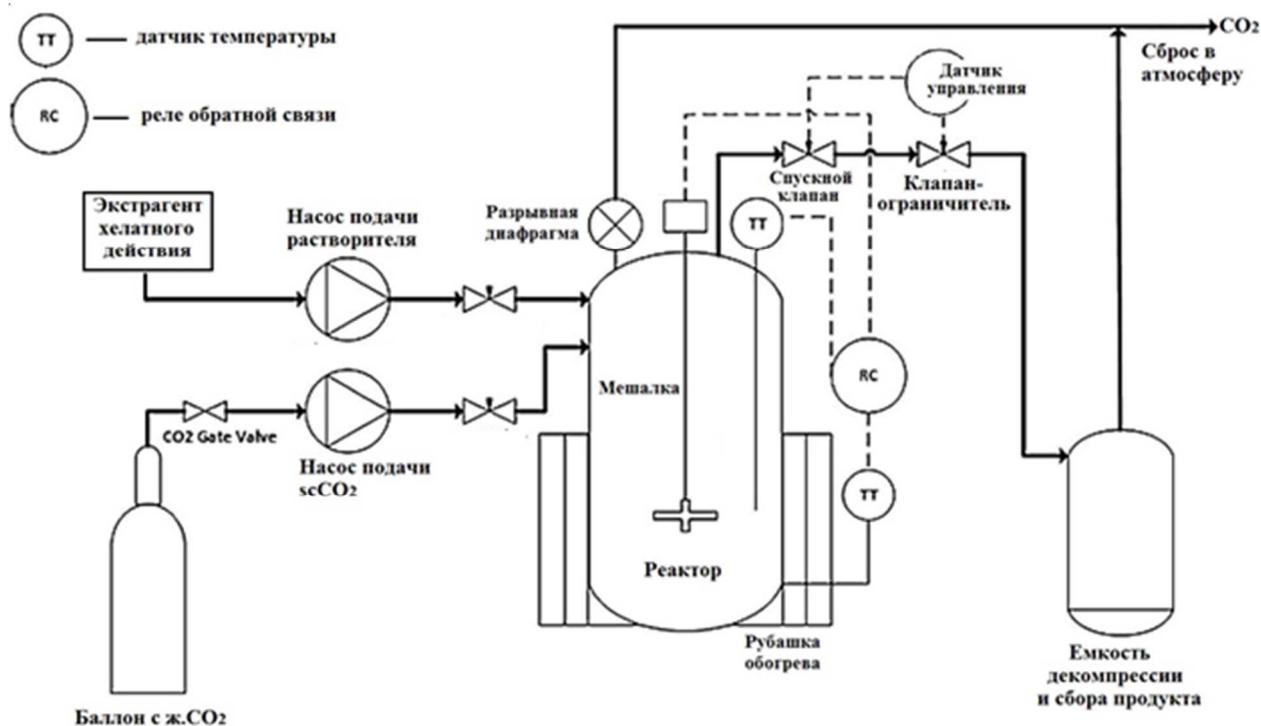


Рисунок 6 — Схема экспериментальной установки выщелачивания РЗЭ из лома аккумуляторов с использованием scCO₂ [30]

5. ИОННЫЕ ЖИДКОСТИ

Ионные жидкости являются одним из перспективных типов альтернативных растворителей. По химическому составу это соли крупных органических катионов. Степень их воздействия на здоровье производственного персонала и окружающую среду минимальна. Токсичность ИЖ низка по сравнению с традиционными выщелачивающими реагентами и органическими растворителями [31], по основным параметрам они соответствуют принципам «зеленой химии» [32]. Являясь фактически низкотемпературными расплавами, они обладают набором уникальных свойств:

1. Наличие широкого температурного интервала нахождения в жидком состоянии (до 400–500 °С). Для сравнения величина данного интервала для воды и органических растворителей — около 100 °С, для аммиака — 44 °С. Это чрезвычайно важно для химической технологии [33].

2. Негорючесть и термическая устойчивость до температур 200–360 °С.

3. Возможность многократного рециклирования для повторного использования.

4. Нелетучесть: давление насыщенного пара у ИЖ настолько низкое, что их можно подвергать вакуумной сушке без потери массы [34].

5. Возможность синтеза ИЖ для селективного выщелачивания индивидуальных веществ [1].

6. Высокая электропроводность в сочетании с низкой вязкостью.

7. Возможность применения ионных жидкостей в качестве электролитов для прямого электролитического получения активных металлов при

комнатной температуре. Многие металлы (Mg, Al, PЗЭ) невозможно выделить электролизом из водных растворов в свободном состоянии, но из растворов в ИЖ эти металлы осаждаются электролизом при комнатной температуре [35].

8. Экстремально высокая сольватирующая способность. Некоторые ИЖ способны при обычных температурах растворять такие вещества, как оксиды магния, алюминия, различные люминесцентные составы и другие соединения, для растворения которых традиционно используются минеральные кислоты.

В ходе лабораторных экспериментов установлено, что ИЖ можно использовать для выщелачивания драгоценных металлов из упорных сульфидных руд при обычных температурах, для прямого выщелачивания меди из первичных халькопиритовых руд, а также для разделения металлов платиновой группы (МПП). Например, экстракция Pd(II) из растворов хлоридного выщелачивания концентратов МПП с использованием ИЖ CyphosIL 101 и CyphosIL 104 (производитель — канадская компания CYTEC и компания Sigma Aldrich, США) обеспечивает выделение не менее 99 % Pd из исходного раствора [34]. Использование ионных жидкостей в качестве 10 % (об.) добавки к сернокислотным выщелачивающим растворам (ВР) позволило осуществить прямое выщелачивание меди из первичных халькопиритовых руд Чили [35].

Основным барьером на пути перехода к широкомасштабному использованию ионных жидкостей в промышленности является их высокая стоимость, в 5–20 раз превышающая стоимость обычных органических растворителей. ИЖ уже сейчас можно применять для извлечения наиболее дорогостоящих металлов (Ag, Au, In, металлов платиновой группы, тяжелых PЗЭ) из концентратов [31]. Проводятся работы по организации промышленного производства так называемых глубокоэвтектических двойных систем (DES) — наиболее дешевых ИЖ: исходные компоненты для их синтеза производятся в промышленности в больших объемах и отличаются достаточно низкой стоимостью: холинхлорид (витамин B₄) и мочевины реализуются по относительно низким ценам (2 евро/кг и 0,5 евро/кг соответственно) [36].

6. РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ БИОТЕХНОЛОГИИ

В последние годы выполнено большое количество прикладных биотехнологических разработок, приведших к появлению новых прорывных направлений в гидрометаллургии.

Биосорбенты с высокой и сверхвысокой удельной емкостью насыщения. Многие типы биосорбентов демонстрируют впечатляющие значения полной емкости насыщения по ДМ по сравнению с ионитами и активированными углями, традиционно используемыми в промышленности. Так, биомасса бактерий *Bacillus subtilis* с L-цистеином демонстрирует максимальную емкость насыщения по Au(I), составляющую 4,04 кг/т при pH 2,0, сорбент на основе отходов разделки панцирей крабов *Ucides cordatus* — уже 33,48 кг/т при pH 3,4, а биосорбент на основе хитозанового волокна с

полиэтиленимином (ПЭИ) — уже 251,7 кг/т при рН 5,5, что превосходит максимально достижимое насыщение даже для лучших ионитов молекулярного распознавания [37].

Преимущество использования биосорбентов — возможность их синтеза из простых биокультур и продуктов переработки природного сырья в сочетании с простотой извлечения ДМ из насыщенного сорбента (обычное сжигание или озоление).

Недостатками биосорбентов в чистом виде являются малая плотность, малый размер и низкая механическая прочность частиц. Для практического применения биосорбентов производится закрепление биомассы на различных подложках (полиуретан, силикагель, целлюлоза, хитозан и другие материалы), что обеспечивает биосорбенту высокую прочность, оптимальный размер частиц и высокую удельную поверхность. Для достижения кислотоустойчивости и органоустойчивости биосорбентов используются синтетические полимеры. Оптимальной формой использования биосорбентов являются сорбционные волокна и высокопористые гранулы [37].

Первая в мире промышленная установка биосорбции ДМ действует в Южной Корее (химкомбинат Samsung-VP Chemical, г. Ульсан, Южная Корея), где на гранулированный биосорбент на основе биокультуры *S. glutamicum* осуществляется извлечение рутения (Ru) из сбросных растворов цеха производства уксусной кислоты, где используется гомогенный катализатор на основе соединений рутения. Максимальное насыщение биосорбента составляет 16–47 кг Ru/т.

Ожидается дальнейшее расширение сферы использования биосорбентов на гидрометаллургических производствах [37].

Биотехнологии для вскрытия инкапсулированного золота.

Обеспечение доступа растворов к поверхности рудных частиц — основное требование для переработки рудного сырья методами КВ и ПВ. Основными проблемами в плане доступа растворов в золотодобывающей промышленности являются:

- инкапсуляция Au в силикатных минералах;
- нахождение частиц Au в составе непроницаемых мелкозернистых горных пород;
- блокировка поверхности частиц Au углеродистыми материалами, сульфидными минералами, оксидами или гидроксидами железа.

Только в регионе Скалистых Гор (США) имеется до 3 000 мелких и средних месторождений Au (содержание Au в руде 4–10 г/т), которые не могут быть отработаны по причине экранирования поверхности рудного золота [38].

Компания Auric BioRecovery, Inc (США) разработала метод раскрытия поверхности рудного золота по микротрещинам с использованием модифицированных местных биокультур бактерий. Продукты жизнедеятельности последних проникают по микротрещинам к поверхности золота, попутно расширяя эти микротрещины и делая возможным проникновение выщелачивающих растворов к металлу. Процесс продолжается достаточно быстро.

В настоящее время компания Auric BioRecovery, Inc выполняет опытно-промышленные работы по раскрытию поверхности частиц Au на крупном месторождении Guildford (штат Виктория, Австралия), где поверхность частиц Au в конгломератах блокирована оксидами железа и силикатными минералами. Сообщается об успешном раскрытии поверхности Au за счет биоизменения минералов по микротрещинам. Процесс продолжается около 5 сут. Примерно 20 % объема ресурсов месторождения Guildford уже переведено в выщелачиваемую форму. Месторождение предполагается обрабатывать методом ПВ. Операции выщелачивания предшествует биозакисление — подача бактериальных культур в продуктивный горизонт с последующей короткой выдержкой [38].

Перспективные области применения:

- месторождения золота в гравийных конгломератах, палеороссыпи;
- месторождения золота, где поверхность частиц Au блокирована силикатами, пленками гидроксидов железа, углеродистыми материалами;
- меднопорфировые, золотомедные, медно-никелевые сульфидные руды с тонкой вкрапленностью целевых минералов.

Биотехнология искусственного перевода непроницаемых пород в гидропроницаемую форму (технология биоразрыва). В 2019 г. компания Auric BioRecovery, Inc (США) сообщила о создании **технологии биоразрыва** — биотехнологии, обеспечивающей возникновение проницаемости в непроницаемых горных породах (рисунок 7) [38].

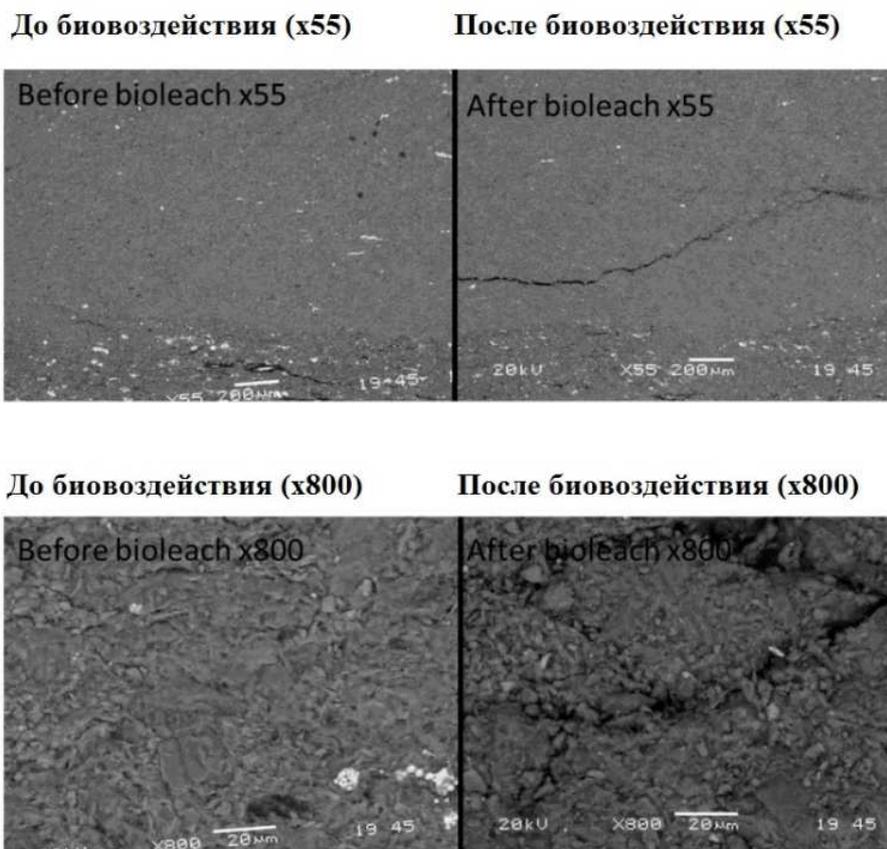


Рисунок 7 — Микрофотографии структуры черных сланцев до и после бактериального воздействия [38]

В ходе полевых испытаний, проведенных на неназванном предприятии в США, проблема заключалась в создании линий протока из массива компактных сланцевых пород к стволу откачной скважины. Исходная гидравлическая проницаемость горной породы была весьма низкой (не более 5 миллиарда мД). В результате воздействия культуры модифицированных бактерий произошло разрушение компактной структуры черного сланца с увеличением проницаемости в 200 раз за счет изменения структуры минеральных составляющих породы (рисунок 7).

7. ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЛИТИЯ ИЗ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАССОЛОВ И НОВЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ

Устойчивый рост мирового спроса на литий стимулирует вовлечение в переработку, наряду с рассолами, литиеносными пегматитами и литийсодержащими слюдами, также и новых видов сырья — литиеносных глин и литий-боратных руд.

Первое в мире предприятие по производству лития из литиеносных глин сооружается канадской компанией Vasconga Minerals Ltd на месторождении Sonora (Мексика). Готовой продукцией предприятия будет карбонат лития батарейного качества. Технологический процесс разработан компанией Ausenco Services Pty Ltd (Австралия) [39]. При измельчении руды и последующей классификации большая часть лития переходит в состав гранулометрической фракции 0,045–0,075 мм, направляемой на сульфатизирующий обжиг. Продукт обжига измельчается до крупности — 0,25 мм и направляется на водное выщелачивание, фильтрацию и упаривание фильтрата. После очистки полученного раствора от примесей литий осаждается в форме карбоната. Сквозное извлечение Li из руды составит 78,0 % [40]. Запуск предприятия в работу запланирован на 2020 г. [41].

Месторождение Kings Valley — крупнейшее месторождение литиеносных глин в США. Его доказанные и вероятные запасы составляют 179 млн т руды со средним содержанием 0,33 % Li. Оператором месторождения является компания Lithium Americas Corp. (США) [42]. Руду планируется измельчать с последующей классификацией с отделением обогащенной литием мелкой фракции. Концентрат обрабатывается раствором 20 г/л H_2SO_4 в режиме агитационного выщелачивания при нагревании. Извлечение Li в раствор составляет от 80,0 до 96,95 % от исходного содержания; продолжительность процесса — 2 ч; удельный расход H_2SO_4 : 17,2–30,7 кг/кг Li_2CO_3 . Продуктивный раствор нейтрализуется известняком, подвергается фильтрационной очистке от осадка $CaSO_4$ и направляется на операцию очистки от Mg путем кристаллизации $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ и осаждения остатка Mg в виде $Mg(OH)_2$. Фильтрат направляется на получение товарного продукта — карбоната лития Li_2CO_3 . Плановая мощность предприятия — 60 000 т Li_2CO_3 /год, срок работы предприятия — 49 лет, проектное извлечение Li из руды — 87,7 % [43].

В рамках программы импортозамещения в США активизированы работы по освоению литиеносных геотермальных рассолов бассейна Salton Sea (штат Калифорния). Сооружается 3 крупных предприятия по извлечению лития. Для его селективного извлечения впервые будут использованы термостойкие неорганические иониты молекулярного распознавания. В финансировании работ участвуют фонды Berkshire Hathaway (Уоррен Баффетт) и Breakthrough Energy Ventures (Б. Гейтс, Дж. Безос и М. Блумберг). Технологии извлечения лития уже отработаны на опытном предприятии в г. Окленд (штат Калифорния).

Компания Berkshire Hathaway Energy Renewables сооружает предприятие с дебитом переработки рассолов $220 \text{ м}^3/\text{час}$. Конечным продуктом будет карбонат лития аккумуляторной чистоты с себестоимостью 4 000 долл. США/т [44].

Компания Simbol Materials, Inc осваивает в районе Salton Sea лицензионный участок с ресурсами, оцениваемыми в $\sim 1,77$ млн т Li. Сорбция Li будет производиться на неорганический ИМР с селективностью не менее 99 %. После сорбции Li рассолы закачиваются обратно в исходный геотермальный горизонт. Десорбция Li выполняется путем простой промывки водой с упариванием десорбата до концентрации 42 % LiCl [45].

Компания Lilac Solutions, Inc сооружает предприятие Hell's Kitchen, где для извлечения Li из гидротермальных рассолов будут также использоваться неорганические ИМР. Десорбция Li с насыщенного ИМР будет выполняться растворами HCl. Продолжительность единичного цикла сорбции-десорбции — не более 2 ч. Десорбат будет направляться на получение чистого LiCl. Плановая мощность предприятия: 17 350 т/год Li_2CO_3 . Начало бурения первых скважин — июль 2020 г., запуск в работу — 2023 г. [46].

8. РАСШИРЕНИЕ СФЕРЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

КВ ванадия из бедных руд успешно испытано для освоения ресурсов месторождения черносланцевых ванадиевых руд Gibellini (США, штат Невада, компания Prophecy Development Corp.) [47]. КВ позволяет вовлечь в переработку бедные руды, содержащие 0,15–0,6 % V. *Сернокислотное КВ ванадия* обеспечивает извлечение V из руды ~ 60 –70 % при удельном расходе серной кислоты 31,8 кг/т руды. Продолжительность процесса — 200 сут, извлечение V из продуктивных растворов проводится экстракционно-осадительным методом [48]. *Щелочное КВ ванадия* (выщелачивающий раствор — 18 г/л NaOH) в ходе опытно-промышленных испытаний обеспечило извлечение 68,8 % V в течение 44 сут. После очистки от элементов-примесей раствор направлялся на экстракцию с осаждением V из реэкстракта в виде метаванадата аммония [49].

Сернокислотное КВ лития впервые в мировой практике осуществлено в опытно-промышленном масштабе в США (2018 г.) на месторождении литиево-борных руд Rhyolite Ridge (штат Невада) компанией Global

Geoscience Ltd (Австралия). КВ Li выполняется с использованием ВР с концентрацией 50 г/л H_2SO_4 . Продолжительность процесса составляет 40–200 сут. До 50 % кислоты при переработке продуктивных растворов можно повторно использовать в процессе КВ. Извлечение Li в раствор составляет 89–97 % от исходного содержания в руде. Промышленное КВ руды будет осуществляться в штабелях с высотой единичного яруса 40–50 м [50].

ПВ меди. В последнее время в мире растет число предприятий, извлекающих медь с использованием технологии скважинного ПВ. В 2020 г. в США были запущены в работу 2 крупных предприятия ПВ меди из бедных окисленных и полуокисленных руд. Оба предприятия расположены в штате Аризона.

Предприятие Florence (оператор — компания Florence Copper, Inc., США) запущено в работу 08.01.2019 г. Оно обрабатывает методом ПВ окисленные и смешанные медно-порфировые руды месторождения Poston Butte. Окисленные руды залегают на глубине около 120 м; нижняя граница рудного тела находится на глубине 150–365 м. Схема технологического процесса на предприятии Florence приведена на рисунке 8.

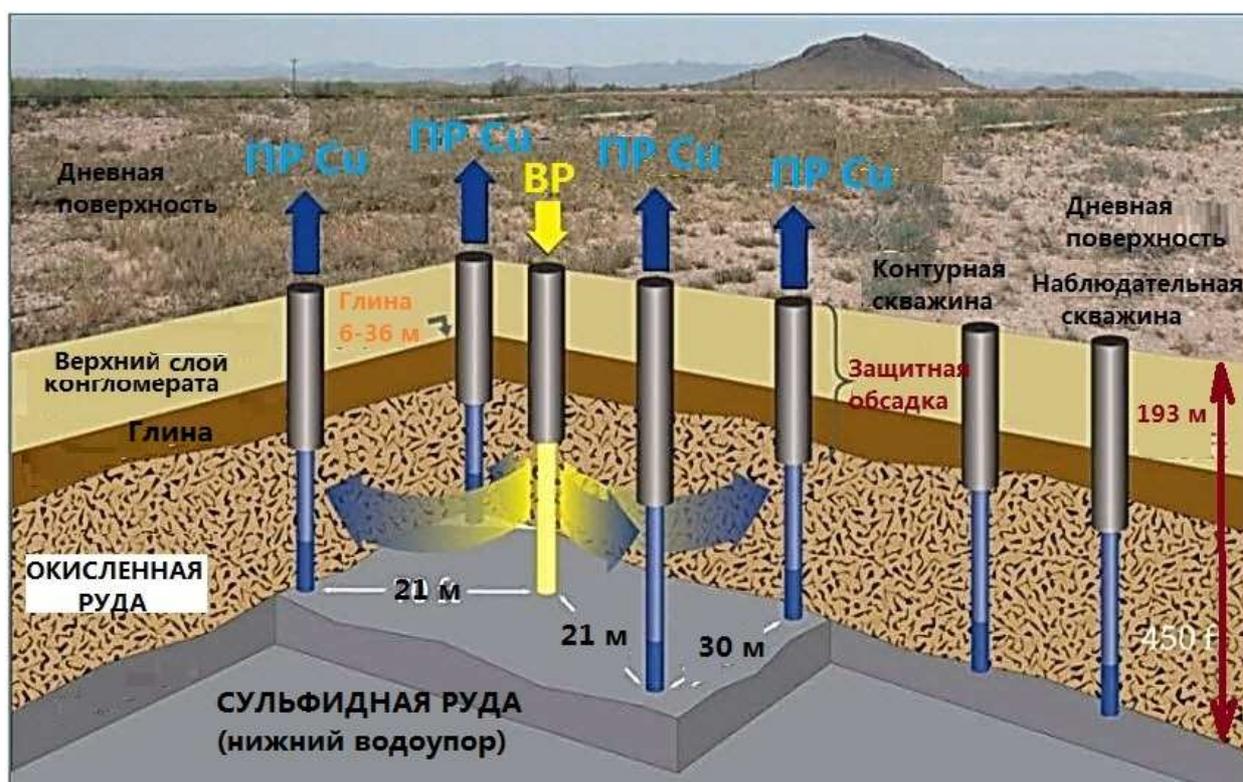


Рисунок 8 — Схема процесса ПВ меди на предприятии Florence Copper [52]
Сокращения: ВР — выщелачивающий раствор (5–6 г/л H_2SO_4), ПР — продуктивный раствор

Процесс ПВ меди осуществляется с использованием выщелачивающих растворов, содержащих 5–6 г/л H_2SO_4 [51]. Опытно-промышленный блок ПВ, состоящий из 24 скважин (4 закачных, 9 откачных и 11 наблюдательных), был запущен в работу 08.01.2019 г. Промышленная добыча методом ПВ начата в декабре 2019 г. Плановое время работы предприятия — 20 лет, годовой объем выпуска катодной меди — 40 000 т [52].

Предприятие Gunnison (компания Excelsior Mining Arizona Inc.(Канада) Рудное тело месторождения Gunnison представлено окисленными рудами с развитой естественной трещиноватостью, залегающими ниже уровня грунтовых вод. Размеры рудного тела составляют $2500 \times 700 \times 200$ м. Количество руды составляет 792 млн т при среднем содержании 0,29 % Cu. Плановая величина извлечения в раствор составляет 48 % от исходного содержания Cu в руде [53]. Концентрация серной кислоты в ВР для отработки различных рудных зон — 1,0–15 г/л H_2SO_4 [54]. Проектная производительность предприятия — 57 000 т Cu/год.

9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАТНОГО ОСМОСА ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЗОЛОТОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Большой проблемой для золотодобывающих предприятий является водный дебаланс (избыток растворов в технологической схеме), приводящий к необходимости накопления избыточных растворов в хвостохранилищах или к сбросу избыточных растворов в водоемы с использованием сложных схем химической очистки. Технология ОО позволяет производить быструю очистку дебалансных растворов таких предприятий до кондиций, удовлетворяющих требованиям природоохранных органов.

Обратный осмос— процесс, в котором при определённом давлении (несколько десятков атмосфер) вода проходит через полупроницаемую мембрану из более концентрированного в менее концентрированный раствор, то есть в направлении обратном направлению обычного осмоса. При этом мембрана пропускает воду, но не пропускает растворённые в ней вещества. Поток исходного раствора разделяется на поток обессоленной воды (фильтрат или пермеат) и поток концентрированного раствора, куда переходят примеси (концентрат). Процесс ОО не требует нагревания и применяется для опреснения морской воды и для концентрирования растворенных веществ.

Компания Anglo Asian Mining (Великобритания) ввела в работу установку ОО на золотодобывающем предприятии Гедабек (Азербайджан) в 2018 г. Исходный дебалансный раствор направляется последовательно на операции песчаной фильтрации (очистка от илов), ультрафильтрации (очистка от тонких взвесей), собственно оборотноосмотическую очистку (2 стадии) и контрольное обезвреживание раствором H_2O_2 . Исходный раствор содержит (мг/л): Au 0,09, Cu 449, CN^- 9,2, очищенный фильтрат установки ОО перед сбросом содержит (мг/л): Au 0, Cu 0,36, CN^- 0,01, что удовлетворяет требованиям природоохранных органов. Концентрат установки ОО направляется обратно в процесс на доизвлечение Au и Cu.

Установка ОО состоит из патронов высокого давления, через которые пропускаются очищаемые растворы под давлением 69 атм. Каждый патрон включает 6 фильтрующих элементов на основе композитной полиамидной мембраны Lewabrane RO B400. Распределение потоков фильтрата и концентрата установлено так, что объем фильтрата составляет 90 % от

исходного объема раствора. Производительность установки ОО по исходному раствору — 60 м³/час, доля объема очищенной воды — 90 % от исходного объема дебалансных растворов. Внешний вид установки показан на рисунке 9.



Рисунок 9 — Блок обратного осмоса. Установка водоочистки предприятия Гедабек (Азербайджан) [55]

Блок песочной фильтрации и блок ультрафильтрации установки ОО снабжены автоматической системой обратной промывки. Установка оснащена также системой химического кондиционирования мембран фильтрующих элементов для поддержания их чистоты и эффективности работы.

С 2018 г. предприятие Гедабек перешло на замкнутый водный баланс, полностью прекратив внешний водозабор. В настоящее время установка ОО работает в периоды выпадения больших количеств атмосферных осадков и притока талых вод весной для сброса дебалансных вод во внешние водотоки [55].

Использование ОО для очистки дебалансных растворов золотодобывающих предприятий актуально для нашей страны, поскольку оно позволит уменьшить нагрузку на плотины хвостохранилищ наливного типа за счет сокращения объема растворов в них, что существенно снизит риск возникновения техногенных аварий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курков А.В., Мамошин М.Ю., Рогожин А.А. Прорывные гидрометаллургические процессы для устойчивого развития технологий переработки минерального сырья. М.: ВИМС, 2019. С. 107. ISBN 978-5-6042742-1-7.

2. Mining and Process Solutions. TECHNOLOGY — Веб-адрес: <https://www.mpsinnovation.com.au/technology/>, дата доступа: 29.06.2019 г.

3. Gold extraction from paleochannel ores using an aerated alkaline glycine lixiviant for consideration in heap and in-situ leaching applications — E.A. Oraby, J.J. Eksteen et al. (Faculty of Science and Engineering, Western Australian School of Mines: Minerals, Energy and Chemical Engineering, Curtin University, GPO Box U1987, Perth, WA 6845, Australia DOI: [10.1016/j.mineng.2019.04.023](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.04.023) — Веб-адрес:

https://www.researchgate.net/publication/334142993_Gold_extraction_from_paleochannel_ores_using_an_aerated_alkaline_glycine_lixiviant_for_consideration_in_heap_and_in-situ_leaching_applications, дата доступа: 29.07.2020 г.

4. Thor Mining - ISR Copper Projects — 23 December 2019, Thor Mining Plc — Веб-адрес: <http://www.thormining.com/>, дата доступа: 12.01.2020 г.

5. Leaching tests move Thor a step closer to ISR copper solution at Kapunda, August 29, 2018 — Веб-адрес: <http://www.miningnewspro.com/News/246909/Leaching-tests-move-Thor-a-step-closer-to-ISR-copper-solution-at-Kapunda>, дата доступа: 12.01.2020 г.

6. Future of the GlyLeach™ Process Treating Komatiite Nickel Deposits in WA — Frank Trask (Mining and Process Solutions (MPS), Australia) and Elsayed Oraby (Curtin University, Australia) — Presenter and Corresponding Author Frank Trask (ftrask@mpsinnovation.com.au) — In: Proceedings of ALTA 2019 Nickel-Cobalt-Copper Sessions Including Pressure Acid Leaching Forum (20-22 May 2019, Perth, Australia), pp. 346 — 354 (ALTA Metallurgical Services. Melbourne, Australia, веб-адрес: www.altamet.com.au (ISBN: 978-0-9946425-5-4).

7. Leaching of Cobalt Bearing Nickel Sulfide and Furnace Converter Mattes with Alkaline Glycine, and Subsequent SX and IX — Jacques Eksteen, Elsayed Oraby, Lurika Lombard and Lauren Di Prinzio (Western Australian School of Mines, Minerals, Energy and Chemical Engineering, Curtin University, Australia) — Proceedings of ALTA 2018 Nickel-Cobalt-Copper Sessions Including Hydromet Processing of Copper, Nickel & Cobalt Sulphides Forum, 21-23 May 2018, Perth, Australia — ISBN: 978-0-9946425-1-6, pp. 486–499 — ALTA Metallurgical Services Publications, ALTA Free Library — Веб-адрес: <http://www.altamet.com.au>, дата доступа: 18.03.2020 г.

8. Accelerated leaching of gold, silver and copper-gold ores with glycine or cyanide-glycine, a low cost, non-toxic, reusable reagent — AusIMM Branch Meeting, Kalgoorlie, Australia — Prof Jacques Eksteen (Curtin University, Western Australian School of Mines) — Веб-адрес: www.ausimm.com.au/content/docs/branch/2016/kalgoorlie_2016_presentation.pdf, дата доступа 29.06.2019 г.

9. 911 Metallurgist. Metallurgists & Mineral Processing Engineers. Веб-адрес: <https://www.911metallurgist.com/hydrometallurgy/who-knows-about-the-cyanide-reagent-substitute-flotent-gold-sc-570/>, дата доступа 14.05.2019 г.
10. Барченков В.В., Кудияров Н.Ю. Опыт применения в Китае нецианистого реагента Flotent Gold^{SC} 570 для выщелачивания золота из руд // Золотодобыча. — 2016. — Т.9. — С. 14–16.
11. Jin Chan. Environmental-friendly Gold Dressing Agent — Веб-адрес: http://www.gxshgk.com/senhe_en/index.php/content/index/pid/15.html, дата доступа 06.06.2020 г.
12. Beyuo M., Abaka-Wood G.B., Asamoah R.K., Kabenlah A., Amankwah R.K. A Comparative Study of Sodium Cyanide and JinchanTM Leaching Reagents: A Case Study at Goldfields Ghana Limited // 4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference. — 2018. — P. 195–199.
13. Hongruifu Jinchan environmental ore dressing gold leaching agent — Веб-адрес: <https://russian.alibaba.com/product-detail/hongruifu-jinchan-environmental-ore-dressing-gold-leaching-agent-for-gold-extraction-62110704752.html>, дата доступа: 06.06.2020 г.
14. Guangxi Senhe Hi-Tech — Веб-адрес: <https://jinchan.en.ecplaza.net/>, дата доступа 10.06.2020 г.
15. Molecular recognition Processes Applicable to the Recovery of Speciality and Toxic Metals in Processing of Base Metal Ores — By Neil E.Izzatt, Steven R.Izzatt and Ronald L. Bruening (IBC Advanced Technologies, USA). Presenter and Corresponding Author Neil Izatt (nizatt@ibcmrt.com) — Proceedings of ALTA 2014 Nickel-Cobalt-Copper Sessions, 26–28 May 2014, Perth, Australia (ISBN 978-0-9871262-9-0) — (ALTA Metallurgical Services, Melbourne, Australia) — ALTA Free Library — Веб-адрес: <http://www.altamet.com.au>, дата доступа 26.12.2018 г.
16. IXOS ® EXTRACTION MEDIA FOR THE MINING INDUSTRY (Gold Flyer Final 2, Sept 6, 2016) — Веб-адрес: <https://www.6wic.com/>, дата доступа 16.02.2019 г.
17. Веб-адрес: <http://www.ibcmrt.com/>, дата доступа 10.02.2019 г.
18. April 1, 2019: 6th Wave and CyPlus Sign Representation Agreement for Gold Extraction Nanotechnology — Веб-адрес: <https://www.6wic.com/press-releases.html>, дата доступа 15.04.2019 г.
19. Ucore Welcomes University of Kentucky to US Rare Earths Consortium — A Press Release — Published: June 19, 2017 8:01 a.m. ET — Веб-адрес: <https://www.marketwatch.com/press-release/ucore-welcomes-university-of-kentucky-to-us-rare-earth-consortium-2017-06-19/print>, дата доступа: 26.01.2019).
20. Ucore Corporate Presentation 2016 — Веб-адрес: <https://ucore.com/>, дата доступа 03.02.2019 г.
21. Review of Applications of SuperLig® Molecular Recognition Technology Products for the Gold Industry — Neil E. Izatt, Steven R. Izatt, Ronald L. Bruening & John B. Dale (IBC Advanced Technologies, USA) — Presented by Neil E. Izatt (nizatt@ibcmrt.com) — Proceedings of ALTA 2010 Gold Ore Processing Symposium, 27–28 May 2010, Perth, Australia (ISBN: 978-0-9871262-9-0) —

ALTA Free Library — Веб-адрес: <http://www.altamet.com.au>, дата доступа 20.02.2019 г.

22. Веб-адрес: <https://ucore.com/projects/bokan-mountain-alaska>, дата доступа 02.02.2019 г.

23. White Paper on Separation of Rare Earth Elements, February 20, 2016 — Molecular Recognition Technology: A Green chemistry Process for Separation of Individual rare earth Metals — Steven R. Izatt, James S. McKenzie, Neil E. Izatt, Ronald L. Bruening, Krzysztof E. Krakowiak, and Reed M. Izatt (IBC Advanced Technologies, Inc., 856 E Utah Valley Drive, American Fork, UT 84003 USA (Corresponding author: sizatt@ibcmrt.com) and Ucore Rare Metals, Inc., 210 Waterfront Drive, Suite 106, Bedford, Nova Scotia, Canada B4A 0H3) — Веб-адрес: https://ucore.com/documents/WhitePaper_REE_Separations.pdf, дата доступа 03.03.2019 г.

24. Bokan Dotson-Ridge. “America’s Emerging HREE Capitol”™ — A Ucore Rare Metals Corporate Presentation, 2013 — Веб-адрес: <http://www.ucore.com>, дата доступа 25.01.2019 г.

25. Патентная заявка США US20200165699A1 — Ion exchange system for lithium extraction (David Henry Snyder et al., Lilac Solutions Inc, Middletown, RI, USA) – Filed: Jan 27, 2020, Publication date: May 28, 2020

26. Веб-адрес: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9b/Carbon_dioxide_pressure-temperature_phase_diagram-en.svg/290px-Carbon_dioxide_pressure-temperature_phase_diagram-en.svg.png, дата доступа: 16.06.2019 г.

27. Chapter 14. Recent Advances in Solvent Extraction Processes and Techniques — Kislik V.S. (The Hebrew University of Jerusalem) – DOI: 10.1016/B978-0-444-53778-2.10014-7 — In book: Solvent Extraction, pp.483-524 — Веб-адрес:

https://www.researchgate.net/publication/279522919_Chapter_14_Recent_Advances_in_Solvent_Extraction_Processes_and_Techniques, дата доступа 17.04.2019 г.

28. Веб-адрес: https://en.wikipedia.org/wiki/Supercritical_fluid#Properties, дата доступа: 11.04.2019 г.

29. Патентная заявка US20170240434A1 — Enhanced metal recovery through oxidation in liquid and/or supercritical carbon dioxide — Mario Bruno, Ulrich Buttner (King Abdullah University of Science and Technology) — Priority Date: 2016-02-23.

30. Supercritical Fluid Extraction of Rare Earth Elements from NiMH Battery — Y. Yao, J. Zhang, J. Anawati and G. Azimi (University of Toronto, 200 College Street, Toronto, ON M5S3E5, Canada) — https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_195 — In: Extraction 2018. Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy, Editors: Boyd R. Davis • Michael S. Moats • Shijie Wang – The Minerals, Metals & Materials Series, pp.2329 – 2335 – ISSN 2367-1181 ISSN 2367-1696 (electronic) – (ISBN 978-3-319-95021-1, ISBN 978-3-319-95022-8 (eBook), Library of Congress Control Number: 2018947474) — © The Minerals, Metals & Materials Society 2018 — Веб-адрес: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8>, дата доступа: 11.04.2020 г.

31. Nicolas Schaeffer, Helena Passos, Isabelle Billard, Nicolas Papaiconomou & João A.P. Coutinho (2018): Recovery of metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE) using unconventional solvents based on ionic liquids, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, DOI: 10.1080/10643389.2018.1477417 — Веб-адрес: https://www.researchgate.net/publication/328765410_Recovery_of_metals_from_waste_electrical_and_electronic_equipment_WEEE_using_unconventional_solvents_based_on_ionic_liquids?enrichId=rgreq-bf5541a224fdd9e0797e8186f8e7aa54-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMzMjY0ODc2NTQxMDtBUzo3NDI4NTg1MjkxNzc2MDBAMTU1NDEyMjY4MzA2OQ%3D%3D&el=1_x_2&esc=publicationCoverPdf, дата доступа: 06.06.2019 г.
32. Byrne, F. P. et al. — Tools and techniques for solvent selection: Green solvent selection guides — *Sustainable Chemical Processes*, 2016, 4, p. 7
33. Кустов Л.М. и др. (ИОХ РАН) Ионные жидкости как каталитические среды — *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*, 2004, т. XLVIII, № 6, с. 13–35.
34. Application of Ionic Liquids in Hydrometallurgy — Jesik Park (School of Advanced Materials & Systems Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Kyungbuk 203-701, Korea; E-Mail: parkjesik@gmail.com) et al. — *Int. J. Mol. Sci.* 2014, 15, 15320-15343; doi:10.3390/ijms150915320, Веб-адрес: https://www.researchgate.net/publication/265213951_Application_of_Ionic_Liquids_in_Hydrometallurgy, дата доступа 11.05.2019 г.
35. Ionic liquids as additives for acid leaching of copper from sulfidic ores — Carlos Carlesi Jara et al (Pontificia Universidad Catolico de Valparaiso, Chile) — *Hydrometallurgy* 161, January 2016 — <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.012> — Веб-адрес: https://www.researchgate.net/publication/291387195_Ionic_liquids_as_additives_for_acid_leaching_of_copper_from_sulfidic_ores/citation/download, дата доступа: 12.05.2019 г.
36. Jenkin, G.R.T., et al. – The application of deep eutectic solvent ionic liquids for environmentally-friendly dissolution and recovery of precious metals. — *Miner. Eng.* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.026>, Веб-адрес: https://www.researchgate.net/publication/282856365_The_application_of_deep_eutectic_solvent_ionic_liquids_for_environmentally-friendly_dissolution_and_recovery_of_precious_metals/, дата доступа 04.06.2019 г.
37. Biosorbents for recovery of precious metals – Sung Wook Won (Department of Marine Environmental Engineering and Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, 38 Cheondaegukchi-gil, Tongyeong, Gyeongnam 650-160, Republic of Korea) et al. — *Bioresour. Technol.* (2014), Веб-адрес: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.121>, дата доступа: 30.04.2020 г.
38. The Use of Bugs for In Situ Recovery Offers a New Frontier for Monetising Stranded Assets – Ian R F MacCulloch (Coomooroo Explorations Coy Pty Ltd, Australia) and Leslie C Thompson (Auric BioRecovery, USA), Presenter: James K Dirstein, Geophysicist and Company Director (jkdirstein@gmail.com), Corresponding Author: Ian MacCulloch (rocdoc1945@bigpond.com) — In:

Proceedings of ALTA 2019 In Situ Recovery Sessions Including Enhancing ISR Permeability Forum — 24 May 2019, Perth, Australia — 2 nd Annual In Situ Recovery Event, pp. 56 — 68 (ALTA Metallurgical Services, Melbourne, Australia — Веб-адрес: www.altamet.com.au (ISBN: 978-0-9946425-8-5).

39. Technical Report on the Feasibility Study for the Sonora Lithium Project, Mexico — Effective Date: December 12, 2017, Issue Date: January 25, 2018. Prepared For Bacanora Minerals Ltd by Ausenco Services Pty Ltd (144 Montague Rd, South Brisbane, Australia), January 2018 — Веб-адрес: <http://www.bacanoralithium.com/pdfs/Bacanora-FS-Technical-Report-25-01-2018.pdf>, дата доступа: 25.05.2020 г.

40. The Sonora Lithium Project — Molding Success from Clay — Alan Langridge, Andrea McGlynn (Ausenco, Australia) and Jeff Claflin (Earendil Pty Ltd, Australia) — In: Proceedings of ALTA 2018 Uranium-REE-Lithium Sessions Including Lithium Processing Forum, 24-25 May 2018, Perth, Australia, pp. 240 — 251 — ALTA Metallurgical Services Publications (ISBN: 978-0-9946425-3-0), ALTA Free Library — Веб-адрес: <http://www.altamet.com.au>, дата доступа: 31.03.2020 г.

41. Sonora Lithium project update — Веб-адрес: <https://www.globalminingreview.com/mining/12112019/sonora-lithium-project-update/>, дата доступа: 01.06.2020 г.

42. Lithium Americas Corp. Independent Technical Report for the Thacker Pass Project, Humboldt County, Nevada, USA. Effective date: 15 February 2018, Filing date: 17 May 2018 — Веб-адрес: https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1440972/000156459018013979/lac-ex991_8.htm, дата доступа: 01.06.2020 г.

43. Technical Report on the Pre- Feasibility Study for the Thacker Pass Project, Humboldt County, Nevada, USA — Effective Date: August 1 st, 2018 — Веб-адрес: https://www.lithiumamericas.com/_resources/pdf/investors/technical-reports/thacker-pass/Technical-Report-Thacker-Pass.pdf, дата доступа: 01.06.2020 г.

44. CEC Approves Geothermal Brine Extraction From Salton Sea — By David Krause, May 15, 2020 — Веб-адрес: https://www.newsdata.com/california_energy_markets/regulation_status/cec-approves-geothermal-brine-extraction-from-salton-sea/article_50592760-96fb-11ea-98e3-2b077cd455ca.html, дата доступа: 03.06.2020 г.

45. Sustainable Extraction of Valuable Elements — John L Burba, PhD President and CEO, Simbol Materials, Inc — Веб-адрес: https://www.aiche.org/sites/default/files/docs/conferences/event/b.1_burba_suschem.pdf, дата доступа: 04.06.2020 г.

46. Lithium Extraction — Веб-адрес: <http://www.lilacsolutions.com/technology>, дата доступа: 04.06.2020 г.

47. The Gibellini Vanadium Project, Eureka County, Nevada: A Permitting and Development Stage Project, December 18th, 2018 PCY_2018-12-18th_Corporate_Presentation_Final — Веб-адрес: <http://www.prophecydev.com>, дата доступа: 11.01.2020 г.

48. Extracting Vanadium through Heap Leach Technology — Will It Work? Extracting Vanadium through Heap Leach Technology – Will It Work? — Michael Drozd, Vice President of Operations, Prophecy Development Corp., Date April 10, 2019 — Веб-адрес: <https://www.vanadiumprice.com/category/articles/>, дата доступа: 28.02.2020 г.

49. Vanadium Extraction and Recovery by Alkaline Heap Leaching of Mineralized Material from the Gibellini Project in Eureka County, Nevada — By Jared Olson (Dr. Dev Chidambaram, Thesis Advisor — A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Materials Science and Engineering — The University of Reno, Nevada — May 2019.

50. Lithium and Boron Extraction from the Rhyolite Ridge Ore (Nevada, USA) – Peter Ehren – In: Extraction 2018. Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy, Editors: Boyd R. Davis • Michael S. Moats • Shijie Wang – The Minerals, Metals & Materials Series, pp.2247 – 2259 – ISSN 2367-1181 ISSN 2367-1696 (electronic) – (ISBN 978-3-319-95021-1, ISBN 978-3-319-95022-8 (eBook), Library of Congress Control Number: 2018947474) – © The Minerals, Metals & Materials Society 2018 – Веб-адрес: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8>, дата доступа: 01.06.2020 г.

51. Arizona Mining Review: Touring Florence Copper In-Situ Recovery Project. 26 July 2018 — Веб-адрес: <https://blog.azgs.arizona.edu/blog/2018-07/arizona-mining-review-touring-florence-copper-situ-recovery-project>, дата доступа: 10.02.2020 г.

52. Building North America's Low-Cost Multi-Asset Copper Producer – Taseko, A Corporate Presentation. November 2019 – Веб-адрес: <https://www.tasekomines.com/assets/docs/pdf/TasekoProspectus>, дата доступа: 07.02.2020 г.

53. Excelsior Mining Corp.: We Make Copper Green. January 2020 (A Presentation) — Веб-адрес: https://www.excelsiormining.com/images/pdf/Presentation/2020/February_18_2020_PPT.pdf, дата доступа: 20.02.2020 г.

54. Gunnison Copper Project. NI 43-101 Technical Report, Feasibility Study (Cochise County, Arizona, USA) M3-PN 160076, Effective Date: December 17, 2016 — Issue Date: January 16, 2017.

55. The Industrial Application of Ultrafiltration and Reverse Osmosis for the Recovery of Copper, Silver and Cyanide from Gold Leach Liquors — Farhang Hedjazi and A. John Monhemius (Anglo Asian Mining PLC, Baku, Azerbaijan) — In: Extraction 2018. Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy, Editors: Boyd R. Davis • Michael S. Moats • Shijie Wang –The Minerals, Metals & Materials Series, pp.1883 — 1892 — ISSN 2367-1181 ISSN 2367-1696 (electronic) — (ISBN 978-3-319-95021-1, ISBN 978-3-319-95022-8 (eBook), Library of Congress Control Number: 2018947474) — © The Minerals, Metals & Materials Society 2018 — Веб-адрес: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8>, дата доступа: 16.04.2020 г.

Подписано в печать 03.11.2020 г.
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,73
Тираж 15 экз. Заказ № 14

Редакционно-издательский сектор (РИС) ВИМС.
119017, Москва, Старомонетный пер., д. 31. Тел. (495) 9503570
Отпечатано на ризографе в РИС ВИМС.