

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СОРБЕНТЫ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА В ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ НИКЕЛЕВЫХ РУД

Г.В. Попов,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (НИГТЦ ДВО РАН), Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация: В работе дан критический анализ источников, обобщение фактического и теоретического материала по свойствам, применению природных и синтетических сорбентов для извлечения никеля и кобальта из продуктивных растворов после выщелачивания никелевых руд. Проведено сравнение перспективных сорбентов по эффективности их использования с сорбентами, используемыми в промышленности. Процессы сорбции с использованием природных веществ или синтетических смол способствуют селективному извлечению никеля и кобальта из водных растворов. Модифицированные различными функциональными группами цеолиты являются очень перспективным материалом для селективного извлечения. Способность избирательно извлекать катионы металлов и возможность регенерации делает ионообменные полимерные смолы одним из ведущих сорбентов в современном мире. Процесс сорбции с использованием полимерных смол позволяет избежать потери реагентов, дорогостоящей фильтрации и плохой селективности по никелю и кобальту в сравнении с ионами других металлов, присущих процессам экстракции растворителем. Сравнение значений сорбционных емкостей природных сорбентов показывает перспективность использования силикатных минералов — монтмориллонита и палыгорскита в промышленности, а также разработки технологических процессов с их использованием. Анализ степеней извлечения синтетических полимерных смол доказывает частое использование Amberlite, Dowex и Ionac в промышленности. Однако Dowex M4195 обладает наибольшей селективностью по отношению к никелю, благодаря наличию бис-пиколиламиновой функциональной группы, в отличие от остальных смол с иминодиацетатной группой. Кроме этого, недостатком хелатных смол зарубежного производства является их высокая стоимость, что нельзя сказать о катионите марки КУ 2-8 российского производителя.

Ключевые слова: гидрометаллургическая переработка, выщелачивание, сульфидная руда, латеритная руда, никель, кобальт, продуктивные растворы, сорбент, смола, цеолит.

PROMISING SORBENTS FOR THE EXTRACTION OF NICKEL AND COBALT IN THE HYDROMETALLURGICAL PROCESSING OF NICKEL ORES

G.V. Popov,

Federal State Budgetary Institution of Science Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract: The paper provides a critical analysis of the sources, a generalization of the factual and theoretical material on the properties, the use of natural and synthetic sorbents for the extraction of nickel and cobalt from productive solutions after the leaching of nickel ores. Comparison of promising sorbents in terms of efficiency of their use with sorbents used in industry has been carried out. Sorption processes using natural substances or synthetic resins contribute to the selective extraction of nickel and cobalt from aqueous solutions. Zeolites modified with various functional groups are very promising materials for selective recovery. The ability to selectively extract metal cations and the possibility of regeneration makes ion-exchange polymer resins one of the leading sorbents in the modern world. The polymer resin sorption process avoids wastage of reagents, costly filtration, and poor selectivity for nickel and cobalt over other metal ions associated with solvent extraction processes. A comparison of the values of the sorption capacities of natural sorbents shows the promise of using silicate minerals — montmorillonite and palygorskite in industry, as well as the development of technological processes using them. Analysis of the recovery rates of synthetic polymer resins proves the frequent use of Amberlite, Dowex and Ionac in the industry. However, Dowex M4195 has the highest nickel selectivity due to the presence of a bis-picolylamine functional group, unlike other resins with an iminodiacetate group. In addition, the disadvantage of foreign-made chelate resins is their high cost, which cannot be said about the cation exchanger grade KU 2-8 of a Russian manufacturer.

Keywords: hydrometallurgical processing; leaching; sulfide ore; laterite ore; nickel; cobalt; productive solutions; sorbent; resin; zeolite.

Технологическая схема для извлечения никеля и кобальта в основном состоит из выщелачивания различными способами с последующим разделением твердой и жидкой фаз [1, 2]. Трудности возникают при разделении никеля и кобальта и удалении примесей в виде катионов алюминия, железа, меди, магния и кальция из растворов. Отделение кобальта от никеля является сложной задачей из-за их близости в периодической таблице элементов и их аналогичного химического поведения в воде [3]. Способы извлечения металлов из продуктивных растворов зависят от условий проведения выщелачивания (рН, состав, концентрация металлов). Существует множество вариантов выделения тяжелых и цветных металлов, включая экстракцию растворителями, ионный обмен, осаждение, ультрафильтрацию, обратный осмос и электродиализ [4]. Вне зависимости от гидрометаллургического способа переработки руды, извлечение металлов после процесса выщелачивания ведется с помощью относительно малозатратного процесса жидкостной экстракции. Экстракция целевых металлов различными растворителями является важным объектом исследований, начиная с 1960-х годов [5]. Экстракция растворителем является наиболее предпочтительным способом для разделения и извлечения металлов из продуктивных растворов выщелачивания. Наиболее популярным альтернативным способом, помимо экстракции, является сорбция.

В XXI веке внимание уделено возможности использования недорогих и экологически чистых материалов в качестве потенциальных сорбентов для извлечения ионов металлов. Сорбция является важным методом разделения и извлечения металлов в гидрометаллургических процессах [6]. В технологическом процессе предпочтительны недорогие сорбенты. Сорбционные процессы с использованием природных веществ или синтетических смол дают удовлетворительные результаты по удалению катионов металлов из растворов.

Выделяют природные и синтетические сорбенты. К перспективным адсорбентам металлов относят промышленные отходы и побочные продукты металлургии, природные вещества, такие как цеолиты и глинистые материалы [7]. Кинетические характеристики сорбентов зависят от многих условий, таких как: наличие функциональных групп, структурными свойствами сорбента (размер, площадь поверхности, пористость), металлические свойства извлекаемого иона, начальная концентрация металла и содержания конкурирующих ионов в растворе, исходные рН и температура водной фазы. Применение хелатных смол повысит избирательность процесса извлечения никеля и кобальта из растворов [6-9]. Более того, смолы можно легко регенерировать и использовать повторно. Глинистые минералы признаны хорошими адсорбентами благодаря существованию различных активных центров, таких как поверхностные и ионообменные участки [7]. В последнее время особое внимание уделяется адсорбентам — гидрогелям [10]. Они зарекомендовали себя с отличной стороны для извлечения металлов из водных растворов. Применение жидких мембран несет потенциально привлекательную альтернативу процессу экстракции растворителем. При использовании мембран фаза растворителя внедряется в микропоры полимерного мембранного материала. Затем приготовленная мембрана помещается между водной исходной фазой и фазой приема, обеспечивая селективный перенос металлов из одной фазы в другую.

Многообещающими выглядят биологические сорбенты разного рода для извлечения металлов [11, 12]. Способность микроорганизмов поглощать ионы металлов из раствора с помощью различных механизмов хорошо известна во всем мире. Использование живой и неживой биомассы — это инновационная и альтернативная технология выделения металлов. Обычно в качестве биосорбентов используют бактерии, грибы, водоросли. Использование биосорбции обуславливается недорогой стоимостью материала и быстротой процесса. Однако существенными недостатками являются трудность в разделении полученной смеси и сравнительно низкая сорбционная емкость, в связи с чем биосорбенты пока не нашли широкого применения в промышленности.

Цель исследований: проведение анализа источников, обобщение фактического и теоретического материала по перспективным сорбентам для извлечения никеля и кобальта из продуктивных растворов в гидрометаллургической переработке никелевых руд.

Методы исследований. Использовались такие методы исследования как обобщение и анализ.

Результаты исследований

Природные сорбенты

К природным сорбентам относят цеолиты, глины, опилки и другие биосорбенты [13-19].

Цеолиты. Цеолиты представляют собой кристаллические алюмосиликаты, состоящие из трехмерных каркасов тетраэдров SiO_4 и AlO_4 , связанных кислородными мостиками. Структурная конфигурация и физико-химические свойства цеолита хорошо изучены и охарактеризованы. Они используются в самых разных отраслях промышленности из-за их довольно высокой сорбционной емкости (по никелю — 20,6-24,8 мг/г; по кобальту — 22,3-27,9 мг/г, (рис. 1), каталитических способностей и потенциала хранения.

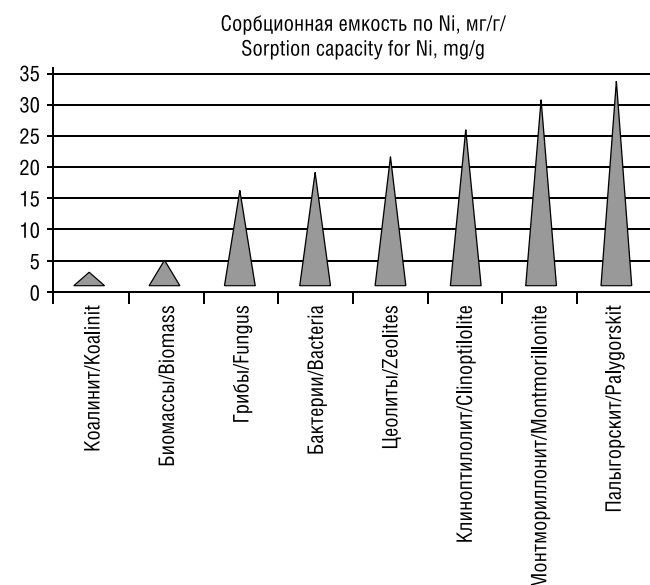


Рис. 1. Сорбционная емкость природных сорбентов / Fig. 1. Sorption capacity of natural sorbents.

Способность цеолитов очищать загрязненную воду от токсичных металлов, органических соединений и не только хорошо известна во всем мире. Существует около 40 природных цеолитов, происходящих из вулканических и осадоч-

ных пород. Цеолиты широко используют для удаления тяжелых металлов благодаря высокой ионообменной способности и определенному размеру пор. Основными разновидностями цеолитов-адсорбентов являются клиноптилолит и шабазит. Природные цеолиты находят широкое применение в качестве адсорбентов, молекулярных сит, мембран, ионообменников и катализаторов при борьбе с загрязнением, а также при восстановлении почв [13]. Высокая катионообменная способность и свойства молекулярных сит цеолитов делают возможным их использование для удаления из сточных вод токсичных ионов металлов, таких как свинец, никель, цинк, кадмий, медь, хром и кобальт [13]. Самым распространенным природным цеолитом для извлечения тяжелых металлов является клиноптилолит.

Клиноптилолит. Клиноптилолит показал высокую селективность по отношению к тяжелым металлам. Большие запасы природных цеолитов сосредоточены в Иордании, Италии, Великобритании, Мексике, Греции и Иране [13]. Местные промышленные предприятия имеют преимущества в виде доступности сырья, низкой стоимости и высокой эффективности удаления металлов. В работе [19] для извлечения цветных металлов использовали природные цеолиты Ягодинского месторождения Камчатского края. Было отмечено, что лимитирующей стадией сорбционного извлечения являлась внутридиффузионная стадия процесса. В первую очередь сорбции подвергались ионы меди, затем никеля и кобальта. Сделан вывод о том, что первоочередной является стадия ионного обмена, что подтверждает факт перспективного использования природного цеолита для сорбционного извлечения цветных металлов из растворов после бактериально-химического выщелачивания сульфидных руд.

Глинистые минералы — это недорогие и экологически безопасные материалы. Благодаря большой удельной поверхности, высокой пористости, поверхностному заряду и поверхностным функциональным группам глинистые минералы действуют как адсорбенты и фильтры [15]. Монтмориллонит принадлежит к семейству смектита и состоит из двух тетраэдрических листов на основе диоксида кремния [16]. Каолинит, самый распространенный член группы каолинов, является одним из самых распространенных глинистых минералов на Земле. Каолинит представляет собой слоистый диоктаэдрический алюмосиликат 1:1 [7]. Бентониты представляют собой глинистые силикаты и состоят в основном из смектитового минерала монтмориллонита, который представляет собой глинистый минерал 2:1, характеризующийся прослоями со слабым отрицательным зарядом слоя. Поверхности минералов можно модифицировать различными носителями органических соединений, которые повысят селективность сорбции.

Коалинит. Каолинит — один из самых простых и распространенных глинистых минералов. В [7] использовали каолинит для выделения кобальта, никеля и меди из водного раствора. Сорбция этих металлов на каолините соответствует линейной форме уравнения адсорбции Ленгмюра. Были найдены максимальные сорбционные емкости для Co — 0,9 мг/г, Ni — 1,7 мг/г и Cu — 10,8 мг/г при 25°C, *рис. 1*.

Монтмориллонит. Это перспективный силикатный минерал с высокой сорбционной емкостью в сравнении с цеолитами, клиноптилолитом. В исследованиях [16] проводили

адсорбцию ионов металлов на монтмориллоните, модифицированном кислотой. Результаты показали возможность использования монтмориллонита в качестве адсорбентов для ионов Cd, Co, Cu, Ni и Pb из водных сред. Данные адсорбции соответствовали изотермам Ленгмюра и Фрейндлиха. Сорбционные емкости, полученные в результате экспериментов, равнялись для кобальта — 28,6 и 29,7 мг/г; меди — 31,8 и 32,3 мг/г и никеля — 28,4 и 29,5 мг/г для монтмориллонита и активированного кислотой монтмориллонита соответственно, *рис. 1*. Авторы [17] использовали монтмориллонит, модифицированный хитозаном, для извлечения кобальта из раствора. В результате был получен новый композитный материал. Наибольшую адсорбционную емкость (150 мг/г) удалось получить при массовом отношении хитозана к глинистому минералу равному 0,25.

Пальгорскит. Также перспективным сорбентом можно считать пальгорскит, благодаря своей высокой сорбционной емкости по отношению к никелю и кобальту. Авторами [18] был использован пальгорскит, добываемый в районе Дваалбум в Северной провинции Южной Африки, в качестве адсорбента для выделения из водного раствора ионов свинца, никеля, хрома и меди. Адсорбционная емкость, рассчитанная по изотерме Ленгмюра, составила 33,4 мг/г для Ni (*рис. 1*) и 30,7 мг/г для Cu при pH 7,0 и температуре при 25°C для частиц глины размером 125 мкм. Адсорбция металлов из растворов имела порядок: Pb > Cr > Ni > Cu.

Биосорбенты. Биосорбция — это свойство некоторых типов неактивной неживой микробной биомассы связывать и концентрировать тяжелые металлы даже из очень разбавленного водного раствора. Обладая многими преимуществами, такими как высокая эффективность, низкая инвестиционная и эксплуатационная затраты, простота управления и эксплуатации, биологические методы привлекли большое внимание [20, 21]. Многие микробные вещества, такие как бактерии, грибы и водоросли, могут использоваться в качестве сорбентов в процессе биосорбции. По сравнению с живой биомассой неживая биомасса демонстрирует больше преимуществ. К ним относятся высокая эффективность, отсутствие необходимости в дополнительных питательных средах и питательных веществах, уменьшение образования осадка и низкая стоимость.

В основном биосорбцию используют для получения меди и цинка из растворов. Использование биосорбции обуславливается недорогой стоимостью материала и быстротой процесса. Однако существенным недостатком является трудность в разделении полученной смеси.

Бактерии. В работе [21] выделили штамм *Streptomyces roseorubens* (SY) для биосорбции никеля. Наличие на поверхности биомассы множества функциональных групп (карбоксил, карбонил и amino) делает ее перспективным материалом для извлечения многих металлов. Этот универсальный штамм оказался высокоэффективным биосорбентом для выделения ионов никеля из водного раствора [21]. Максимальная адсорбционная способность наблюдалась при 313 К и оказалась равной 208,4 мг/г. Биосорбцию ионов никеля и меди из водного раствора высушенным *S. coelicolor* A3 (2) исследовали в работе [22]. Максимальная сорбционная емкость по никелю составила 18 мг/г, *рис. 1*. Полученные авторами результаты показали, что *S. coelicolor* A3 (2) является хорошей адсорбирующей средой для ионов металлов

и обладает высокой адсорбционной способностью. Данные по адсорбции Ni и Cu отлично подходят для изотермы Фрейндлиха.

Грибы. В [20] был приготовлен новый иммобилизованный биосорбент на силикагеле из макрогрибов *Lactarius salmonicolor* для эффективного выделения ионов никеля из водного раствора. Сорбционная емкость сорбента составляла 14,9 мг/г для реальных промышленных растворов, *рис. 1*.

Водоросли. Бурые водоросли представляют собой особенно эффективный и устойчивый класс биосорбентов по сравнению с другими типами биомассы. Основными функциональными группами являются карбоксильная и сульфоновая группы. Группы сульфоновой кислоты, так же как и гидроксильные группы представлены в меньшем объеме. Адсорбционная способность водорослей напрямую связана с этими всеми группами, поэтому водоросли можно рассматривать как перспективный сорбент для никеля, кобальта и меди. Для извлечения Co и Ni используют *Ascophyllum nodosum*, а только для извлечения Ni — *Sargassum fluitans*, *S. natans*, *S. vulgare*, *Fucus vesiculosus*.

Различные биомассы (отходы). В исследовании [14] были проведены серийные эксперименты по выявлению сорбционной способности порошка из листьев тика (TLP) удалять ионы Ni и Co из водного раствора. Максимальные значения емкости составляли 75% для никеля и 76% для ионов кобальта, при оптимальном значении pH 5–6. Адсорбция ионов Cu, Cd и Ni из водных растворов активным и высушенным илом была исследована в лабораторных условиях авторами [11] для оценки ее потенциала в удалении ионов металлов. Адсорбционная способность ионов металлов на активном и высушенном иле соответствовало последовательности $Ni \approx Cu > Cd$ и $Cu > Ni > Cd$. В работе [12] исследована адсорбция свинца, кадмия и никеля из водного раствора опилками грецкого ореха. Порядок селективности адсорбента: $Pb \approx Cd > Ni$. Максимальная сорбционная емкость при 25°C рассчитанная по изотерме Ленгмюра составила 3,4 мг/г, *рис. 1*.

Сравнение значений сорбционных емкостей природных сорбентов показывает перспективность использования силикатных минералов — монтмориллонита и палыгорскита в промышленности, а также разработки технологических процессов с их использованием.

Синтетические сорбенты

Катионообменные смолы. Ионообменные полимерные смолы находят все более широкое применение за последнее десятилетие [6, 23]. Синтетические смолы — это различные типы обменных материалов, которые используют для поглощения ионов. Смолы образованы матрицей из полимерного материала, к которой прикреплены функциональные ионные группы. В зависимости от функциональных групп ионообменная смола может избирательно извлекать тяжелые металлы, такие как медь, никель, кобальт, кадмий, цинк и алюминий [8, 9, 23, 24]. В последнее десятилетие самыми распространенными катионитами использующиеся для получения металлов в промышленности являются сильно-кислые смолы с группами $(-SO_3H)$ и слабокислые смолы с группами карбоновых кислот $(-COOH)$. На крупных предприятиях наиболее часто используемыми хелатными смолами являются смолы марок Purolite, Lewatit Mono Plus,

Dowex, Dow, Amberlite. Важными параметрами ионного обмена служат pH среды, температура и время контакта.

На месторождении Murrin-Murrin в Западной Австралии [25] используют щелочное выщелачивание низкосортных сульфидных руд с применением глицина. Для извлечения никеля и кобальта из полученного раствора применяют Purolite S930 Plus. Степень извлечения для данной смолы составляет более 97% Ni, 65% Co и 99,0% Cu. На месторождении Bairo Alto в Бразилии используют смолы марок Dowex M4195, Amberlite IRC748, Ionac SR-5 и Purolite S930 [23]. Однако установлено, что смола Dowex M4195 обладает наибольшей селективностью к катионам никеля и кобальта, благодаря наличию бис-пиколиламиновой группы, в отличие от остальных смол с иминодиуксусной функциональной группой. В работе [26] исследовали сорбционное извлечение целевого компонента никеля из продуктивных растворов, полученных после бактериально-химического выщелачивания в НИГТЦ ДВО РАН. Авторами установлено, что сорбционное равновесие достигается в первый час сорбции катионитом КУ-2-8. Степень извлечения катионообменной смолой выше в натриевой форме. За три цикла сорбции удалось извлечь порядка 93% кобальта, 90% никеля и 86% меди. Вместе с целевыми металлами сорбции подвергается железо — 90% и магний 55% [26]. В [27] приводится сравнительный обзор отечественных и зарубежных исследований сорбции цветных металлов катионитом КУ-2-8 и его аналогами.

Гидрогели. Гидрогель представляет собой сеть полимерных цепей, набухающих в водном растворе. Быстрое набухание происходит за счет поглощения растворителя при помещении в раствор (сольватация). Исследования [28] посвящены извлечению ионов меди и цинка из водных растворов с помощью композитных гидрогелей альгината натрия и аттапульгита. Уравнение Ленгмюра хорошо описывают изотермы сорбции металлов. Авторы [28] отмечают возможность повторного использования материалов для адсорбции катионов. Использование различных гидрогелей для получения меди из растворов описаны в работе [10].

Силикагели. Одним из потенциальных неорганических материалов, которые могут быть использованы для извлечения, является силикагель [29]. Этот материал можно химически модифицировать различными функциональными группами, чтобы улучшить его эффективность. Другими преимуществами силикагеля являются доступность, большая удельная площадь поверхности и высокое термическое сопротивление. В исследовании [29] эксперименты проводили по выделению ионов кобальта и никеля из водного раствора с использованием силикагелевых материалов. Модифицирование адсорбентов проводили этилендиаминтетрауксусной (EDTA) и диэтиленetriаминпентауксусной (DTPA) кислотами. Максимальные значения сорбционной емкости силикагелем, модифицированным EDTA, составляли по Co и Ni — 20,0 и 21,6 мг/г, соответственно. Адсорбционные способности силикагеля, модифицированный DTPA равнялись по Co — 16,1 мг/г, по Ni — 16,7 мг/г.

Мембраны. Отделение меди, кобальта и никеля из водных растворов является основной задачей гидрометаллургической переработки после выщелачивания руды. Процессы разделения на основе мембран, такие как жидкая мембрана (SLM) и эмульсионно-жидкая мембрана (ELM), являются

потенциальной альтернативой для обработки разбавленных растворов, а капитальные затраты значительно снижаются по сравнению с традиционной экстракцией растворителем [30, 31]. В нескольких исследованиях изучались разделение и извлечение кобальта и никеля из растворов с помощью технологий разделения на основе мембран [31, 32, 33, 34]. В работе [34] разработали ионно-жидкостную мембрану на основе три(гексил)тетрадецил фосфоний хлорида для извлечения кобальта из солянокислых сред и его разделение от никеля. Соли кобальта переходят в водную фазу через мембрану, при этом соли никеля остаются в водной фазе. Использование мембран в статических условиях показала селективность извлечения кобальта 86% относительно никеля.

Сорбенты, используемые в реальных технологиях

После выщелачивания в продуктивный раствор переходят примеси металлов. Одной из перспективных технологий извлечения целевых металлов (Ni и Co) является сорбция, обладающая рядом преимуществ. Сорбция позволяет избежать потери реагентов, дорогостоящей фильтрации и плохой селективности по Ni и Co [6, 23, 35]. Процесс сорбции с использованием смол является обратимым процессом, связанный с обменом ионами между раствором электролита (водная фаза) и смолой (твердая фаза). Функциональные группы придают различные свойства смолам, такие как кислотные, основные или хелатирующие. Существует четыре основных типа, различающиеся по своим функциональным группам: сильнокислотные, сильноосновные, слабокислотные и слабоосновные [36]. Полимерные смолы должны быть нерастворимыми. Слабокислотные смолы с карбоксильными группами обладают плохой селективностью и их используют только в очень кислых растворах [23]. Смолы с функциональными группами фосфоновой кислоты обладают высокой селективностью к меди, цинку и кадмию, что делает их

менее эффективными для сорбции никеля и кобальта. Хелатирующие смолы, содержащие группы иминодиуксусной кислоты, избирательно извлекают никель и кобальт из сульфатных растворов [25, 36, 37]. Преимущество использования хелатирующей смолы является высокая селективность для одного металла по сравнению с другим. Это основано на различной стабильности комплекса металла при соответствующем значении pH раствора. В промышленности используют процессы периодического действия, в которых сорбент смешивается с раствором, и после достижения равновесия сорбент извлекают по средствам фильтрования. Емкость смолы ограничена, что ограничивает возможности промышленного применения, поэтому колонны с неподвижным слоем наиболее часто используют для промышленности. Существует три режима работы колонки: нисходящий и восходящий поток и противоток [25]. Наиболее часто используемыми зарубежными хелатирующими смолами являются представители марок Purolite, Lewatit Mono Plus, Dowex, Dow, Amberlite. В табл. 1 и на рис. 2, представлены основные месторождения и предприятия, на которых используется сорбционная технология извлечения никеля и кобальта.

Осуществление процессов сорбции никеля и кобальта с использованием синтетических смол происходит в вертикальных цилиндрических аппаратах при атмосферном давлении и температуре окружающей среды путем пропускания продуктивных растворов, полученных после выщелачивания руды, через слой сорбента. Важным является подбор оптимальной высоты слоя сорбента и диаметра сорбера. Расчет данных параметров производится с учетом изотерм сорбции, полученных экспериментальным путем. Одним из важных параметров также является стадия элюирования смолы и время регенерации. Грамотно подобранный элюент повышает степень извлечения металлов. Ионы

Таблица 1 / Table 1

Месторождения, на которых используют сорбционное извлечение никеля и кобальта / Deposits where sorption extraction of nickel and cobalt is used.

Месторождение / Field	Компания / Company	Смола / Small	Содержания Ni и Co / Contents of Ni and Co	Литература / Letter
Cawse / (Западная Австралия)	Centaur	Lewatit TP 220 MonoPlus	1,0 г/л Ni 0,5 г/л Co	[8, 9, 24]
Bulong (Западная Австралия)	Preston Resources	Lewatit TP 207 MonoPlus; Amberlite IRC748; Purolite S 930	0,42 г/л Ni 0,04 г/л Co	[36]
Bulong (Западная Австралия)	Bulong Nickel	Purolite S950; Purolite S930		[6]
Murrin-Murrin (Западная Австралия)	Anaconda Nickel	Purolite S930 Plus	Ni - 0,66% Co - 0,014%	[25]
Bairro Alto (Бразилия)	BHP Billiton	Dowex M4195	5,75 г/л Ni 0,24 г/л Co	[23]
Bairro Alto (Бразилия)	BHP Billiton	Ionac SR-5	5,75 г/л Ni 0,24 г/л Co	[23]
Niquel do Vermelho (Бразилия)	Vale do Rio Doce	Amberlite IRC748		[38]
Niquel do Vermelho (Бразилия)	Vale do Rio Doce	Purolite S930		[38]
Кингашское (Россия, Красноярский край)	Гипроникель	Purolite S930	1,1 г/л Ni 0,03 г/л Co	[39]
Точильногорское (Россия, Свердловская область)	Голд	Purolite S930		[40]
Усть-Порожинское (Россия, Красноярский край)	Гидрометаллургия	KY 2-8	Ni - 1,7% Co - 0,02%	[41]
Буруктальское (Россия, Оренбургская область)	Южурал никель	KY 2-8		[42]
Шануч (Россия, Камчатский край)	НИГТЦ ДВО РАН	KY 2-8	5,3 г/л Ni 0,13 г/л Co	[26]

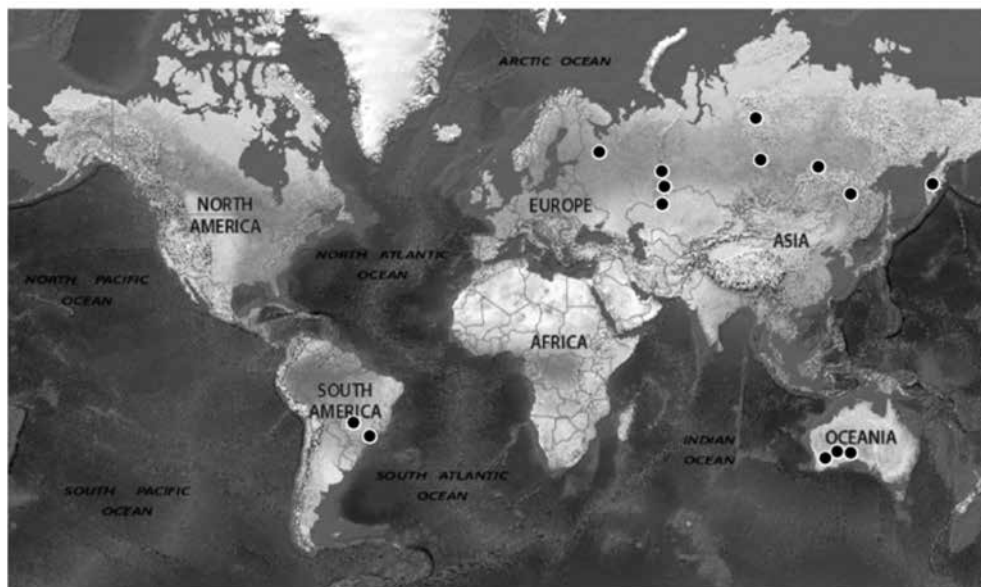


Рис. 2. Месторождения, на которых используют сорбционное извлечение никеля и кобальта / Fig. 2. Deposits where sorption extraction of nickel and cobalt is used.

металлов можно элюировать растворами серной кислоты, соляной кислоты или гидроксида аммония. Никель и кобальт могут быть предпочтительно удалены при условии применения специального реагента. Оптимизация концентрации раствора должна привести к селективному элюированию. Одним из факторов, влияющих на проведение процесса сорбции металлов, является скорость пропускания раствора через слой сорбента. Степень извлечения увеличивается при ее снижении, тоже самое происходит при увеличении высоты слоя сорбента.



Рис. 3. Степень извлечения смол разных марок / Fig. 3. The degree of extraction of resins of different grades.

Анализ степеней извлечения синтетических полимерных смол (рис. 3) доказывает частое использование Amberlite, Dowex и Ionac в промышленности. Однако Dowex M4195 обла-

дает наибольшей селективностью по отношению к никелю, благодаря наличию бис-пиколиламинной функциональной группы, в отличие от остальных смол с иминодиацетатной группой. Кроме этого недостатком хелатных смол зарубежного производства является их высокая стоимость, что нельзя сказать о катионите марки КУ 2-8 российского производителя.

Заключение

Из рассмотренных сорбционных материалов наибольший интерес представляют силикатные минералы и синтетические ионообменные смолы. Природные сорбенты приходят на замену активированному углю в качестве адсорбента благодаря своей доступности и низкой стоимости. Однако биосорбция не рента-

бельна из-за сложности разделения конечных продуктов и сравнительно низкой сорбционной емкости. Хелатные синтетические ионообменные смолы в свою очередь способны селективно извлекать катионы никеля и кобальта, что ведет к высокой степени извлечения. Dowex M4195 обладает наибольшей селективностью по отношению к никелю, благодаря наличию бис-пиколиламинной функциональной группы, в отличие от остальных синтетических смол Amberlite IRC748; Purolite S 930 и Ionac SR-5 с иминодиацетатной группой. Однако недостатком хелатных смол зарубежного производства является их высокая стоимость, что нельзя сказать о катионите марки КУ 2-8 российского производителя.

Выводы

1. В статье дан критический анализ источников, обобщение фактического и теоретического материала по перспективным сорбентам для извлечения никеля и кобальта из продуктивных растворов в гидрометаллургической переработке никелевых руд.

2. Установлено, что использование синтетических смол является наиболее распространенным способом сорбционного извлечения в реальных технологических схемах на действующих предприятиях в мире. Анализ показал, что высокие значения сорбционных емкостей монтмориллонита и палыгорскита показывают перспективность их использования в промышленных технологиях.

3. Результаты исследований могут быть полезными для дальнейших экспериментальных исследований в области переработки никелевых руд и извлечению никеля и кобальта из полученных продуктивных растворов. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Chong S., Hawker W., Vaughan J. Selective reductive leaching of oxidised cobalt containing residue // Minerals Engineering. - 2013. - Vol. 54. - P. 82-87.
2. Dreisinger D. Keynote address: hydrometallurgical process development for complex ores and concentrates // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. - 2009. - Vol. 109. - P. 253-271.

3. Janiszewska M., Markiewicz A., Regel-Rosocka M. Hydrometallurgical separation of Co(II) from Ni(II) from model and real waste solutions // *Journal of Cleaner Production*. - 2019. - Vol. 228. - P. 746-754.
4. Santanilla A.J.M., Aliprandini P., Benvenuti J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Structure investigation for nickel and cobalt complexes formed during solvent extraction with the extractants Cyanex 272, Versatic 10 and their mixtures // *Minerals Engineering*. - 2021. - Vol. 160. - P. 563-563.
5. Ramachandra B. Process for the recovery of cobalt and nickel from sulphate leach liquors with saponified Cyanex 272 and D2EHPA // *Separation Science and Technology*. - 2007. - Vol. 42. - P. 2067-2080.
6. Deepatana A., Tang J.A., Valix M. Comparative study of chelating ion exchange resins for metal recovery from bioleaching of nickel laterite ores // *Minerals Engineering*. - 2006. - Vol. 19. - P. 1280-1289.
7. Yavuz O., Altunkaynak Y., Guzel F. Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite // *Water Research*. - 2003. - Vol. 37. - P. 948-952.
8. Littlejohn P., Vaughan J. Recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings through resin-in-pulp scavenging and selective ammoniacal elution // *Minerals Engineering*. - 2013. - Vol. 54. - P. 14-20.
9. Littlejohn P., Vaughan J. Selective elution of nickel and cobalt from iminodiacetic acid cation exchange resin using ammoniacal solutions // *Hydrometallurgy*. - 2014. - Vol. 141. - P. 24-30.
10. Jalali M.A., Koohi A.D., Sheykhan M. Experimental study of the removal of copper ions using hydrogels of xanthan, 2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid, montmorillonite: Kinetic and equilibrium study // *Carbohydrate Polymers*. - 2016. - Vol. 142. - P. 124-132.
11. Ong S-A., Toorisaka E., Hirata M. Comparative study on kinetic adsorption of Cu (II), Cd (II) and Ni (II) ions from aqueous solutions using activated sludge and dried sludge // *Appl Water Sci*. - 2013. - Vol. 3. - P. 321-325.
12. Yasemin B., Zek T. Removal of heavy metals from aqueous solution by sawdust adsorption // *Journal of Environmental Sciences*. - 2007. - Vol. 19. - P. 160-166.
13. Erdem E., Karapinar N., Donat R. The removal of heavy metal cations by natural zeolites // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2004. - Vol. 280. - P. 309-314.
14. Vilvanathan S., Shanthakumar S. Removal of Ni (II) and Co (II) ions from aqueous solution using teak (*Tectona grandis*) leaves powder: adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamics study // *Desalination and Water Treatment*. - 2016. - Vol. 57. - № 9. - P. 3995-4007.
15. Yuan G.D., Theng B.K.G., Churchman G.J., Gates W.P. Clays and clay minerals for pollution control // *Developments in Clay Science*. - 2013. - Vol. 5. - P. 587-644.
16. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorptive accumulation of Cd (II), Co (II), Cu (II), Pb (II), and Ni (II) from water on montmorillonite: Influence of acid activation // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2007. - Vol. 310. - P. 411-424.
17. Wang H., Tang H., Liu Z., Zhang X., Hao Z., Liu Z. Removal of cobalt (II) ion from aqueous solution by chitosan-montmorillonite // *Journal of Environmental sciences*. - 2014. - Vol. 26. - P. 1879-1884.
18. Potgieter J.H., Potgieter-Vermaak S.S., Kalibantonga P.D. Heavy metals removal from solution by palygorskite clay // *Minerals Engineering*. - 2006. - Vol. 19. - P. 463-470.
19. Белова Т.П. Кинетика сорбции ионов меди, никеля и кобальта при совместном присутствии из водных растворов цеолитами // *Сорбционные и хроматографические процессы*. - 2018. - № 3. - Т. 18. - С. 324-331.
20. Akar T., Celik S., Gorgulu A.A., Tunali A.S. Nickel removal characteristics of an immobilized macro fungus: Equilibrium, kinetic and mechanism analysis of the biosorption // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. - 2013. - Vol. 88. - № 4. - P. 680-689.
21. Long J., Gao X., Su M., Li H., Chen D., Zhou S. Performance and mechanism of biosorption of nickel (II) from aqueous solution by non-living *Streptomyces roseorubens* SY // *Colloids and Surfaces*. - 2018. - Vol. 548. - P. 125-133.
22. Ozturk A., Artan T., Ayar A. Biosorption of nickel (II) and copper (II) ions from aqueous solution by *Streptomyces coelicolor* A3(2) // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. - 2004. - Vol. 34. - P. 105-111.
23. Mendes F.D., Martins A.H. Selective sorption of nickel and cobalt from sulphate solutions using chelating resins // *International Journal of Mineral Processing*. - 2004. - Vol. 74. - P. 359-371.
24. Wolowicz A., Hubicki Z. The use of the chelating resin of a new generation Lewatit Mono Plus TP-220 with the bis-picolylamine functional groups in the removal of selected metal ions from acidic solutions // *Chemical Engineering Journal*. - 2012. Vol. 197. - P. 493-508.
25. Eksteen J.J., Oraby E.A., Nguyen V. Leaching and ion exchange based recovery of nickel and cobalt from a low grade, serpentine-rich sulfide ore using an alkaline glycine lixiviant system // *Minerals Engineering*. - 2020. - Vol. 145. - P. 106-117.
26. Белова Т.П., Ратчина Т.И., Ершова Л.С. Сорбционное извлечение никеля из продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Специальный выпуск 32*. - 2017. - № 12. - С. 303-309.
27. Авфукова Л.С., Белова Т.П. Сорбционное извлечение ионов цветных металлов из многокомпонентных растворов катионитом КУ-2-8 и его зарубежными аналогами // *Успехи современного естествознания*. - 2021. - № 6. - С. 42-48.
28. Huang D., Wang W., Wang A. Removal of Cu²⁺ and Zn²⁺ ions from aqueous solution using sodium alginate and attapulgite composite hydrogels // *Adsorption Science & Technology*. - 2013. - № 7. - Vol. 31. - P. 611-623.
29. Repo E., Kurniawan T.A., Warchol J.K., Sillanpaa M.E.T. Removal of Co (II) and Ni (II) ions from contaminated water using silica gel functionalized with EDTA and/or DTPA as chelating agents // *Journal of Hazardous Materials*. - 2009. - Vol. 171. - P. 1071-1080.
30. Aliprandini P., Correa M.M.J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Influence of metallic impurities on solvent extraction of cobalt and nickel from a laterite waste liquor // *The Minerals, Metals & Materials Series*. - 2019. - P. 137-142.
31. Eyupoglu V., Unal A., Polat E., Eren B., Kumbasar R.A. An efficient cobalt separation using PVDF-co-HFP based ultrafiltration polymer inclusion membrane by room temperature ionic liquids // *Separation and Purification Technology*. - 2022. - Vol. 303. - P. 122-134.

32. Sulaiman R.N.R., Jusoh N., Othman N., Noah N.F.M., Rosly M.B., Rahman H.A. Supported liquid membrane extraction of nickel using stable composite SPEEK/PVDF support impregnated with a sustainable liquid membrane // *Journal of Hazardous Materials*. - 2019. - Vol. 380. - P. 120-129.
33. Wellens S., Thijs B., Binnemans K. An environmentally friendlier approach to hydrometallurgy: highly selective separation of cobalt from nickel by solvent extraction with undiluted phosphonium ionic liquids // *Green Chem.* - 2012. - Vol. 14. - P. 16-28.
34. Zante G., Boltoeva M., Masmoudi A., Barillon R., Trebouet D. Selective separation of cobalt and nickel using a stable supported ionic liquid membrane // *Separation and Purification Technology*. - 2020. - Vol. 252. - P. 117-128.
35. Wang L.Y., Lee M.S. Separation of Co(II) and Ni(II) from chloride leach solution of nickel laterite ore by solvent extraction with Cyanex 301 // *International Journal of Mineral Processing*. - 2017. - Vol. 166. - P. 45-52.
36. Zainol Z., Nicol M.J. Comparative study of chelating ion exchange resins for the recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings // *Hydrometallurgy*. - 2009. - Vol. 96. - P. 283-287.
37. Abbasi P., McKeivitt B., Dreisinger D.B. The kinetics of nickel recovery from ferrous containing solutions using an Iminodiacetic acid ion exchange resin // *Hydrometallurgy*. - 2018. - Vol. 175. - P. 333-339.
38. Патент RU 2418873 C2. Коста Р. де С., Мендес Ф.Д. Способ извлечения никеля и кобальта из латеритовой руды. 20.05.2011. Бюл. № 14.
39. Kuz'min V.I., Kuz'min D.V. Sorption of nickel and copper from leach pulps of low-grade sulfide ores using Purolite S930 chelating resin // *Hydrometallurgy*. - 2014. - Vol. 141. - P. 76-81.
40. Свиблов В.В., Гуминский В.И., Гуров В.А., Гребнев Г.С., Тагильцев В.С., Четверкин В.И. Опытные работы по подземному выщелачиванию никеля из силикатных руд // *Недропользование XXI век*. - 2009. - № 2. - С. 68-73.
41. Пашков Г.Л., Сайкова С.В., Пантелева М.В., Сайкова Д.И. Катионообменное выщелачивание окисленных никелевых руд Усть-Порожского месторождения // *Цветные металлы*. - 2018. - № 8. - С. 52-56.
42. Makovskaya O.Yu., Bryantseva N.I. Nickel sorption from sulphate solutions of oxidized nickel ores leaching // *Defect and Diffusion Forum*. - 2021. - V.410. - P.394-399.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chong S., Hawker W., Vaughan J. Selective reductive leaching of oxidised cobalt containing residue // *Minerals Engineering*. - 2013. - Vol. 54. - P. 82-87.
2. Dreisinger D. Keynote address: hydrometallurgical process development for complex ores and concentrates // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. - 2009. - Vol. 109. - P. 253-271.
3. Janiszewska M., Markiewicz A., Regel-Rosocka M. Hydrometallurgical separation of Co(II) from Ni(II) from model and real waste solutions // *Journal of Cleaner Production*. - 2019. - Vol. 228. - P. 746-754.
4. Santanilla A.J.M., Aliprandini P., Benvenuti J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Structure investigation for nickel and cobalt complexes formed during solvent extraction with the extractants Cyanex 272, Versatic 10 and their mixtures // *Minerals Engineering*. - 2021. - Vol. 160. - P. 563-563.
5. Ramachandra B. Process for the recovery of cobalt and nickel from sulphate leach liquors with saponified Cyanex 272 and D2EHPA // *Separation Science and Technology*. - 2007. - Vol. 42. - P. 2067-2080.
6. Deepatana A., Tang J.A., Valix M. Comparative study of chelating ion exchange resins for metal recovery from bioleaching of nickel laterite ores // *Minerals Engineering*. - 2006. - Vol. 19. - P. 1280-1289.
7. Yavuz O., Altunkaynak Y., Guzel F. Removal of copper, nickel, cobalt and manganese from aqueous solution by kaolinite // *Water Research*. - 2003. - Vol. 37. - P. 948-952.
8. Littlejohn P., Vaughan J. Recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings through resin-in-pulp scavenging and selective ammoniacal elution // *Minerals Engineering*. - 2013. - Vol. 54. - P. 14-20.
9. Littlejohn P., Vaughan J. Selective elution of nickel and cobalt from iminodiacetic acid cation exchange resin using ammoniacal solutions // *Hydrometallurgy*. - 2014. - Vol. 141. - P. 24-30.
10. Jalali M.A., Koohi A.D., Sheykhani M. Experimental study of the removal of copper ions using hydrogels of xanthan, 2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid, montmorillonite: Kinetic and equilibrium study // *Carbohydrate Polymers*. - 2016. - Vol. 142. - P. 124-132.
11. Ong S-A., Toorisaka E., Hirata M. Comparative study on kinetic adsorption of Cu (II), Cd (II) and Ni (II) ions from aqueous solutions using activated sludge and dried sludge // *Appl Water Sci*. - 2013. - Vol. 3. - P. 321-325.
12. Yasemin B., Zek T. Removal of heavy metals from aqueous solution by sawdust adsorption // *Journal of Environmental Sciences*. - 2007. - Vol. 19. - P. 160-166.
13. Erdem E., Karapinar N., Donat R. The removal of heavy metal cations by natural zeolites // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2004. - Vol. 280. - P. 309-314.
14. Vilvanathan S., Shanthakumar S. Removal of Ni (II) and Co (II) ions from aqueous solution using teak (*Tectona grandis*) leaves powder: adsorption kinetics, equilibrium and thermodynamics study // *Desalination and Water Treatment*. - 2016. - Vol. 57. - № 9. - P. 3995-4007.
15. Yuan G.D., Theng B.K.G., Churchman G.J., Gates W.P. Clays and clay minerals for pollution control // *Developments in Clay Science*. - 2013. - Vol. 5. - P. 587-644.
16. Bhattacharyya K.G., Gupta S.S. Adsorptive accumulation of Cd (II), Co (II), Cu (II), Pb (II), and Ni (II) from water on montmorillonite: Influence of acid activation // *Journal of Colloid and Interface Science*. - 2007. - Vol. 310. - P. 411-424.
17. Wang H., Tang H., Liu Z., Zhang X., Hao Z., Liu Z. Removal of cobalt (II) ion from aqueous solution by chitosan-montmorillonite // *Journal of Environmental sciences*. - 2014. - Vol. 26. - P. 1879-1884.
18. Potgieter J.H., Potgieter-Vermaak S.S., Kalibantonga P.D. Heavy metals removal from solution by palygorskite clay // *Minerals Engineering*. -

2006. - Vol. 19. - P. 463-470.
19. Belova T.P. Kinetics of sorption of copper, nickel and cobalt ions in the joint presence of zeolites from aqueous solutions // Sorption and chromatographic processes. - 2018. - № 3. - T. 18. - P. 324-331.
 20. Akar T., Celik S., Gorgulu A.A., Tunalı A.S. Nickel removal characteristics of an immobilized macro fungus: Equilibrium, kinetic and mechanism analysis of the biosorption // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. - 2013. - Vol. 88. - № 4. - P. 680-689.
 21. Long J., Gao X., Su M., Li H., Chen D., Zhou S. Performance and mechanism of biosorption of nickel (II) from aqueous solution by non-living *Streptomyces roseorubens* SY // Colloids and Surfaces. - 2018. - Vol. 548. - P. 125-133.
 22. Ozturk A., Artan T., Ayar A. Biosorption of nickel (II) and copper (II) ions from aqueous solution by *Streptomyces coelicolor* A3(2) // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. - 2004. - Vol. 34. - P. 105-111.
 23. Mendes F.D., Martins A.H. Selective sorption of nickel and cobalt from sulphate solutions using chelating resins // International Journal of Mineral Processing. - 2004. - Vol. 74. - P. 359-371.
 24. Wolowicz A., Hubicki Z. The use of the chelating resin of a new generation Lewatit Mono Plus TP-220 with the bis-picolylamine functional groups in the removal of selected metal ions from acidic solutions // Chemical Engineering Journal. - 2012. Vol. 197. - P. 493-508.
 25. Eksteen J.J., Oraby E.A., Nguyen V. Leaching and ion exchange based recovery of nickel and cobalt from a low grade, serpentine-rich sulfide ore using an alkaline glycine lixiviant system // Minerals Engineering. - 2020. - Vol. 145. - P. 106-117.
 26. Belova T.P., Ratchina T.I., Ershova L.S. Sorption extraction of nickel from productive solutions of bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-nickel ores // Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). Special issue 32. - 2017. - № 12. - P. 303-309.
 27. Avfukova L.S., Belova T.P. Sorption extraction of non-ferrous metal ions from multicomponent solutions by cation exchanger KU-2-8 and its foreign analogues // Successes of modern natural science. - 2021. - № 6. - P. 42-48.
 28. Huang D., Wang W., Wang A. Removal of Cu²⁺ and Zn²⁺ ions from aqueous solution using sodium alginate and attapulgite composite hydrogels // Adsorption Science & Technology. - 2013. - № 7. - Vol. 31. - P. 611-623.
 29. Repo E., Kurniawan T.A., Warchol J.K., Sillanpää M.E.T. Removal of Co (II) and Ni (II) ions from contaminated water using silica gel functionalized with EDTA and/or DTPA as chelating agents // Journal of Hazardous Materials. - 2009. - Vol. 171. - P. 1071-1080.
 30. Aliprandini P., Correa M.M.J., Tenorio J.A.S., Espinosa D.C.R. Influence of metallic impurities on solvent extraction of cobalt and nickel from a laterite waste liquor // The Minerals, Metals & Materials Series. - 2019. - P. 137-142.
 31. Eyupoglu V., Unal A., Polat E., Eren B., Kumbasar R.A. An efficient cobalt separation using PVDF-co-HFP based ultrafiltration polymer inclusion membrane by room temperature ionic liquids // Separation and Purification Technology. - 2022. - Vol. 303. - P. 122-134.
 32. Sulaiman R.N.R., Jusoh N., Othman N., Noah N.F.M., Rosly M.B., Rahman H.A. Supported liquid membrane extraction of nickel using stable composite SPEEK/PVDF support impregnated with a sustainable liquid membrane // Journal of Hazardous Materials. - 2019. - Vol. 380. - P. 120-129.
 33. Wellens S., Thijs B., Binnemans K. An environmentally friendlier approach to hydrometallurgy: highly selective separation of cobalt from nickel by solvent extraction with undiluted phosphonium ionic liquids // Green Chem. - 2012. - Vol. 14. - P. 16-28.
 34. Zante G., Boltoeva M., Masmoudi A., Barillon R., Trebouet D. Selective separation of cobalt and nickel using a stable supported ionic liquid membrane // Separation and Purification Technology. - 2020. - Vol. 252. - P. 117-128.
 35. Wang L.Y., Lee M.S. Separation of Co(II) and Ni(II) from chloride leach solution of nickel laterite ore by solvent extraction with Cyanex 301 // International Journal of Mineral Processing. - 2017. - Vol. 166. - P. 45-52.
 36. Zainol Z., Nicol M.J. Comparative study of chelating ion exchange resins for the recovery of nickel and cobalt from laterite leach tailings // Hydrometallurgy. - 2009. - Vol. 96. - P. 283-287.
 37. Abbasi P., McKeivitt B., Dreisinger D.B. The kinetics of nickel recovery from ferrous containing solutions using an Iminodiacetic acid ion exchange resin // Hydrometallurgy. - 2018. - Vol. 175. - P. 333-339.
 38. Patent RU 2418873 C2. Kosta R. de S., Mendes F.D. Method for extracting nickel and cobalt from laterite ore. 20.05.2011. Бюл. № 14.
 39. Kuz'min V.I., Kuz'min D.V. Sorption of nickel and copper from leach pulps of low-grade sulfide ores using Purolite S930 chelating resin // Hydrometallurgy. - 2014. - Vol. 141. - P. 76-81.
 40. Sviblov V.V., Guminskij V.I., Gurov V.A., Grebnev G.S., Tagil'cev V.S., CHetverkin V.I. Experimental work on underground leaching of nickel from silicate ores // Subsoil use XXI century. - 2009. - № 2. - P. 68-73.
 41. Pashkov G.L., Sajkova S.V., Panteleeva M.V., Sajkova D.I. Cation-exchange leaching of oxidized nickel ores of the Ust-Porozhinsky deposit // Non-ferrous metals. - 2018. - № 8. - P. 52-56.
 42. Makovskaya O.Yu., Bryantseva N.I. Nickel sorption from sulphate solutions of oxidized nickel ores leaching // Defect and Diffusion Forum. - 2021. - V.410. - P.394-399.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Григорий Васильевич:

научный сотрудник,

Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук
(НИГТЦ ДВО РАН),

г. Петропавловск-Камчатский, Россия,

e-mail: Popovg.v@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Popov Grigory Vasilievich:

Researcher,

Federal State Budgetary Institution of Science Research
Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian
Academy of Sciences,

Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,

e-mail: Popovg.v@yandex.ru