

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 551.24:553:546.74
DOI 10.17513/use.38504



CC BY 4.0

**МЕСТОРОЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ: РАСПРОСТРАНЕНИЕ,
ЗАПАСЫ И ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ****Ларионова Т. И. ORCID ID 0009-0000-2582-7707, Бородина Д. С.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация,
e-mail: sirius70@mail.ru*

Статья посвящена комплексному анализу проблем глобальных никелевых ресурсов. Целью исследования является изучение вопросов, связанных с определением основных проблем поиска, разработки и освоения месторождений никеля. Для достижения цели собраны, изучены и систематизированы актуальные данные порядка 28 опубликованных источников. Применен метод анализа вторичных данных. Проведенными исследованиями подтверждено, что в настоящее время ресурсная база никелевого сырья значительно истощена. В этой связи уделено внимание проблемам освоения ресурсов никеля, которые определяют современную динамику многих отраслей промышленности. Рассмотрена целесообразность поиска новых и расширения разрабатываемых никеленосных территорий за счет планирования поисково-оценочных работ на флангах и глубоких горизонтах известных рудных узлов. Получен вывод о необходимости технологических инноваций для поиска и освоения нетрадиционных типов руд, таких как месторождения техногенного генезиса, продукты ударных процессов, а также черносланцевые толщи. Показано, что способы извлечения полезных компонентов из руд требуют всесторонней модернизации, что обусловлено, в частности, пагубным влиянием на окружающую среду. Для снижения отрицательного воздействия на экологию процессов извлечения полезных компонентов из рудного материала рекомендовано внедрять в производство новые усовершенствованные экологически безопасные, эффективные и экономически рентабельные, малоотходные технологии. Результаты проведенных исследований показали, что на современном этапе основной задачей поиска и освоения месторождений никеля является усовершенствование способов проводимых работ перечисленных направлений.

Ключевые слова: месторождения никеля, поиски и добыча полезных ископаемых, рудные тела

**NICKEL DEPOSITS: DISTRIBUTION,
RESERVES, AND DEVELOPMENT PROBLEMS****Larionova T. I. ORCID ID 0009-0000-2582-7707, Borodina D. S.**

*Federal State Budgetary Institution of Science Research Geotechnological Center
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation, e-mail: sirius70@mail.ru*

The article is devoted to a comprehensive analysis of the problems of global nickel resources. The purpose of the study is to examine the issues related to identifying the main problems of searching for, developing, and exploiting nickel deposits. To achieve this goal, relevant data from about 28 published sources have been collected, studied, and systematized. The method of secondary data analysis has been applied. The conducted research has confirmed that the resource base of nickel raw materials is currently significantly depleted. In this regard, attention has been paid to the problems of exploiting nickel resources, which determine the current dynamics of many industries. The expediency of searching for new and expanding the developed nickel-bearing territories by planning prospecting and evaluation works on the flanks and deep horizons of known ore nodes is considered. The conclusion is obtained on the need for technological innovations for searching and development of non-traditional types of ores such as deposits of technogenic genesis, products of impact processes, as well as black shale strata. It is shown that the methods of extracting useful components from ores require comprehensive modernization, which is due, in particular, to the harmful impact on the environment. To reduce the negative impact on the environment of the processes of extracting useful components from ore material, it is recommended to introduce new improved environmentally friendly, efficient and cost-effective, low-waste technologies into production. The results of the conducted research have shown that at the current stage, the main task of searching and developing nickel deposits is to improve the methods of the work carried out in the listed areas.

Keywords: nickel deposits, exploration, mining, ore bodies

Введение

Никель давно перешел в категорию материалов стратегического и повседневного значения. На современном уровне развитие таких отраслей, как «зеленая» энергетика

(аккумуляторы), аэрокосмическая и оборонная промышленность, медицина, химическое машиностроение и инфраструктурное строительство, невозможно без его использования. Стабильное обеспечение этим важным ре-

сурсом сопряжено с комплексом взаимосвязанных проблем, пронизывающих всю цепочку – от этапов геологоразведочных работ до промышленного освоения недр.

Поиск новых месторождений никеля сталкивается с растущими объективными трудностями. Наиболее богатые и доступные для открытия объекты в значительной степени уже выявлены и истощены. Развитие сырьевой базы смещается в сторону вовлечения более бедных по содержанию, но крупных по запасам источников никеля, что требует адаптации и разработки новых поисковых моделей и технологий. Серьезные вызовы возникают и на стадии разработки уже разведанных месторождений. Один из таких вызовов обусловлен тем, что технологии добычи и переработки руд, как правило, сопряжены с рисками загрязнения окружающей среды, притом что экологические требования сегодня являются одним из ключевых ограничивающих факторов.

Таким образом, современная проблематика, связанная с месторождениями никеля, представляет собой сложный узел, в котором переплетаются геологические, технологические, экономические и экологические факторы. Эффективное развитие никелевой промышленности невозможно без системного анализа проблем и поиска инновационных решений на каждом этапе – от прогнозирования и поиска новых ресурсов до их экологически сбалансированной и экономически целесообразной добычи. В этой связи рассмотрение вопросов, связанных с выделением и решением указанных проблем, имеет особую актуальность. Данная статья посвящена детальному рассмотрению указанных аспектов с целью структурирования ключевых вызовов и направлений для их преодоления.

Цель исследования – раскрытие и освещение вопросов, связанных с определением основных проблем поиска и разработки источников никеля, а также с предложением рекомендаций для решения выявленных проблем.

Материалы и методы исследования

В статье приводятся результаты сбора, изучения и анализа материалов предыдущих исследователей, связанных с проблемами поиска и разработки источников никеля. Работа с опубликованными (вторичными) данными представляет собой целостный исследовательский процесс, построенный на критическом мышлении, технических навыках извлечения и обработки данных,

владении статистическими методами анализа и строгом соблюдении принципов исследовательской этики. Применение этих методов позволило извлекать обоснованные выводы, экономя время и ресурсы на самостоятельный сбор первичной информации.

Результаты проведенных исследований позволили систематизировать полученные данные по определенным критериям. Это позволило выйти на более высокий уровень владения информацией и дальнейшего получения выводов и рекомендаций. Полученная в результате проведенных исследований информация может быть использована для оптимизации и решения задач расширения минерально-сырьевой базы для никелевой промышленности.

В качестве объекта исследования в настоящей работе выбраны месторождения никеля. Основным материалом для анализа состояния запасов никелевого сырья и характеристики месторождений послужили статьи и другие материалы, опубликованные в разные годы. Исследование проводилось в течение 2024–2025 гг. Всего было проанализировано порядка 28 источников. Исследования проводились путем системного подхода с использованием различных методов анализа информации.

Результаты исследования и их обсуждение

Никель начал использоваться людьми с древних времен. Так, китайцы еще в III в. до н. э. производили и экспортировали сплавы никеля. Как отдельный химический элемент никель был открыт в 1751 г. шведским ученым-химиком Акселем Кронстедтом. Одни из первых рудопроявлений никеля были обнаружены в Канаде (район Садбери) в 1853–1856 гг. [1; 2].

Основные генетические типы месторождений никеля

Никель относится к группе сидерофильных и литофильных элементов, что предопределяет два главных типа его промышленных месторождений: сульфидные медно-никелевые (магматические) и силикатные (коры выветривания). Выделяются также месторождения гидротермального и контактово-карстового типа, имеющие подчиненное значение в связи с низкой распространенностью и содержаниями полезного компонента.

Магматические месторождения

Магматические месторождения никеля обеспечивают основную долю добычи ме-

талла в мире благодаря крупным масштабам рудных тел и возможности отработки открытым способом. Россия (Норильский рудный район), Канада (рудный пояс Садбери) и Австралия являются лидерами по запасам данного типа. Изучение условий магматического рудогенеза имеет ключевое значение для прогнозирования и поисков новых слепых рудных тел на глубине. Магматические месторождения никеля генетически связаны с процессами дифференциации базит-ультрабазитовой магмы. Их образование происходит на стадии кристаллизации магматического расплава, обогащенного магнием и железом. Исходная магма, поднимаясь по глубинным разломам из мантийных источников (обычно деплетированной мантии или плюмов), содержит растворенные сульфиды и силикаты [3].

Ключевым процессом рудообразования является ликвация – разделение первично гомогенного силикатного расплава на две несмешивающиеся жидкости: силикатную (породообразующую) и сульфидную (рудную). Это происходит вследствие изменения термодинамических параметров (падение давления, температуры) и ассимиляции корового материала, который повышает содержание серы в системе [4; 5, с. 371].

Тяжелая сульфидная жидкость, представленная преимущественно пирротинном, пентландитом и халькопиритом, под действием гравитации опускается в придонные части магматической камеры. Накопление рудного вещества происходит обычно в придонных частях интрузивных тел, а также в зоне эндоконтакта.

Главными рудными минералами магматического типа месторождений являются пентландит ((Fe,Ni)₉S₈), пирротин (Fe₇S₈), халькопирит (CuFeS₂). По текстуре руды делятся на вкрапленные (сингенетические), сульфиды равномерно распределены в силикатной матрице (оливин, пироксен); массивные (нодулярные и брекчиевые), сплошные сульфидные скопления, залегающие, как правило, в подошве интрузивов.

В рамках магматического типа выделяют две главные подгруппы:

1. Ликвационные месторождения в расчлененных интрузивах. Приурочены к крупным стратиформным массивам (Норильск в России, Бушвельд в ЮАР). Отличаются огромными запасами и комплексным составом руд (Ni, Cu, Co, МПГ, Au).

2. Месторождения зеленокаменных поясов (коматитовые). Связаны с архейскими ультраосновными вулканидами – комати-

итами. Примером служит месторождение Камбалда в Австралии. Эти руды, как правило, более богаты никелем, но объемы залежей меньше.

Месторождения коры выветривания

Месторождения кор выветривания (латеритные месторождения) никеля формируются в условиях влажного тропического климата. В процессе химического разложения серпентинитов и перидотитов подвижные элементы выносятся, а никель накапливается в остаточных минералах. В экзогенных условиях при выщелачивании серпентинитов и оливина при избытке CO₂ происходит переход никеля в раствор бикарбоната Ni(HCO₃)₂. В результате дальнейшей миграции никеля в виде раствора в благоприятных для образования водных силикатов условиях происходит его осаждение. Накопление никеля в пределах кор выветривания происходит, как правило, в нижних горизонтах [5, с. 379]. Основные рудные тела залегают в двух горизонтах: охристо-кремнистых латеритах и зоне гидросиликатов. Рудные тела месторождений кор выветривания имеют обычно плащеобразную, площадную или линейную форму. Среди рудных минералов наибольшую ценность представляет гарниерит и нонтронит, концентрирующие металл в легкообогащаемой форме. Крупнейшие провинции расположены в Новой Каледонии, Индонезии и на Кубе, где коры выветривания достигают мощности 50 м.

Плутоногенные гидротермальные месторождения

На месторождениях данного типа рудные тела прослеживаются на десятки – первые сотни метров как по простиранию, так и по падению, при среднем значении мощности 0,4–0,5 м. Главными рудными минералами являются никелин, смальтин, скуттерудит, саффлорит. Плутоногенные гидротермальные месторождения никеля различаются по составу руд и условиям образования. При низких и средних температурах формируются жильные месторождения никель-кобальтовых арсенидов с серебром и висмутом. При гидротермальных процессах повышенные концентрации никеля в виде арсенидов и сульфидов образуются в парагенезисе с кобальтом, мышьяком, серой, иногда и висмутом, ураном и серебром. Месторождения плутоногенного гидротермального типа не представляют практического интереса в связи с низкими запасами и содержанием полезного компонента. В России к месторождениям этого типа относят место-

рождение Ховуаксы в Туве. За рубежом – месторождения в Марокко (Бу-Аззер), Канаде (Эльдорадо, Кобальт), Германии (Рудные горы), Финляндии и Киргизии.

Месторождения контактово-карстового типа

Контактово-карстовые месторождения образуются на контакте магматических и карбонатных пород. Воды тысячелетиями выщелачивают карстовые полости, создавая природные ловушки. Рудные тела характеризуются сложной формой. Залежи имеют форму гнезд или карманов. Химический состав залежей отличается высокой изменчивостью по простиранию. Добыча залежей данного генетического типа осложнена нестабильностью и обводненностью карстов. В нашей стране к месторождениям этой группы относится Уфалейское месторождение. Уфалейское месторождение приурочено к тектоническому контакту известняков и серпентинитов [5, с. 123, 348].

Факторы, влияющие на формирование месторождений никеля

Формирование генетических типов месторождений никеля контролируется геологическими, физико-химическими и климатическими факторами, которые создают условия для образования значительных рудных скоплений.

1. Магматический фактор (для сульфидного типа)

Образование сульфидных медно-никелевых месторождений неразрывно связано с внутриплитным магматизмом крупных провинций. Ключевым фактором является внедрение высокомагнезиальных расплавов (пикритов, коматиитов) или базальтовой магмы в земную кору. Решающую роль играет процесс ликвации: при падении температуры и давления исходный силикатный расплав разделяется на две несмешиваемые жидкости – силикатную и сульфидную [6, с. 5]. В сульфидной фракции, в связи с большей ее плотностью, происходит концентрация никеля, меди и элементов платиновой группы. Однако для промышленной концентрации необходим фактор ассимиляции серы. Внедряющаяся магма должна проплавить и усвоить серосодержащие породы (сульфаты или пирит вмещающих толщ), чтобы повысить содержание серы в системе. Без дополнительного источника серы сульфиды выделяются в малом объеме и рассеиваются, не формируя рудных тел. Форма рудных тел зависит от структурного фактора. В камерах расслоенных интрузи-

вов тяжелая сульфидная жидкость скапливается в придонных частях магматических камер (силлах, лополитах) [7]. Напротив, в условиях субвулканических или жерловых фаций формируются жильные и брекчиевые руды, где сульфиды цементируют обломки вмещающих пород.

2. Факторы гипергенного концентрирования (для силикатного типа)

Силикатные (никелевые) месторождения образуются в корах выветривания ультраосновных пород (перидотитов, дунитов, серпентинитов). Здесь ведущими факторами выступают климатический и тектонический. Процесс требует влажного тропического или субтропического климата, обеспечивающего интенсивное химическое выветривание. В условиях плоского рельефа и стабильного тектонического режима происходит разложение первичных минералов (оливина, серпентина). Никель, высвобождающийся при разрушении кристаллической решетки, в кислой среде верхних горизонтов мигрирует в нижние горизонты коры выветривания. В зоне застойного водного режима, где среда становится щелочной, никель осаждается, замещая магний в гидросиликатах (гарниерите, нептуите). Важнейшим фактором является наличие длительного перерыва в осадконакоплении и тектонической стабильности – для формирования зрелого латеритного профиля требуются миллионы лет без эрозии. Промышленная ценность месторождений сульфидного и силикатного типов часто усиливается гипергенными процессами. Мощность зоны выщелачивания и зоны накопления латеритов контролируется уровнем грунтовых вод. В сульфидных месторождениях зона окисления приводит к выносу серы и обогащению верхних горизонтов вторичными силикатами никеля.

Среди факторов, влияющих на формирование месторождений никеля, выделяются также геологические эпохи и стадии геодинамического развития.

3. Геологические эпохи как факторы образования месторождений никеля

Докембрийская эпоха выступает ключевым фактором рудообразования благодаря двум аспектам: специфическому геохимизму мантии того времени (повышенная никеленосность) и развитию тектонических режимов, способствовавших становлению крупных ультраосновных тел. Именно в этот период сформировались основные промышленно значимые типы сульфидных медно-никелевых месторождений, что об-

условлено спецификой тектоники плит, тепловым режимом и составом мантии в архее и раннем протерозое [6, с. 6]. Главенствующая роль в этом процессе принадлежит докембрийским зеленокаменным поясам и областям развития расслоенных интрузий. Классическими примерами месторождений, сформированными в докембрийскую эпоху, являются месторождения Камбалда (Австралия) и пояса Абитибиды (Канада), а также интрузивы Бушвельдского комплекса (ЮАР) и Великая Дайка (Зимбабве), где никеленосность ассоциирована с базальными горизонтами ультраосновной фации [5, с. 354].

В позднепалеозойскую эпоху формировались месторождения гидротермального генезиса, среди которых можно отметить кобальт-никелевые месторождения (Ховуаксы, Тува). На Урале в позднем палеозое формирование месторождений никеля происходило в корях выветривания ультраосновных пород (Еловское, Устейское и др.). Месторождений никеля с промышленными содержаниями ценных компонентов, сформированными в данную эпоху, не найдено.

В мезозойскую эпоху благодаря активным проявлениям магматизма и рифтогенеза возникли термодинамические и физико-химические условия, необходимые для отделения, транспортировки и концентрирования сульфидного никелевого оруднения в промышленных масштабах. В раннемезозойский этап произошло внедрение основной массы сибирских траппов на рубеже перми и триаса, тектоно-магматическая активизация привела к образованию крупнейших сульфидных медно-никелевых месторождений Норильского рудного района (Сибирская платформа). В это же время произошло формирование месторождений в ЮАР (Восточный Грикваленд) [5, с. 354].

В мезозое продолжается формирование никеленосных кор выветривания на Южном Урале (Еловское, Устейское и др.). Распространение силикатных никелевых руд отмечается и в других регионах (Казахстан, Бразилия и др.).

Главным фактором кайнозойского никелевого рудогенеза явилась экзогенная переработка древних ультраосновных массивов. Это привело к формированию богатых силикатных (окисленных) руд, приуроченных к корам выветривания мезозойско-кайнозойского возраста (Урал, Куба, Новая Каледония, Индонезия), что делает кайнозой значимым этапом в образовании значительной части мировых запасов никеля нетрадиционного для более древних эпох. В резуль-

тате мезозойско-кайнозойской тектоники широко проявился процесс формирования латеритного типа выветривания ультраосновных пород (перидотитов, дунитов, серпентинитов) обнажившихся на континентах. Оптимальные условия для этого сложились в гумидном и семигумидном тропическом и субтропическом климате палеогена и неогена. Это привело к формированию богатых силикатных (окисленных) руд, приуроченных к корам выветривания мезозойско-кайнозойского возраста (Урал, Куба, Новая Каледония, Индонезия) [6, с. 9].

4. Геодинамический фактор

Формирование промышленно значимых скоплений никеля является закономерным результатом эволюции литосферы в специфических геодинамических обстановках, которые определяют источник рудного вещества, механизмы его транспортировки и физико-химические условия концентрации. Наблюдается зависимость формирования месторождений никеля от геодинамического режима территории. Основные мировые запасы никеля (сульфидный тип) генетически связаны с внутриплитным магматизмом зон растяжения, а именно с процессом рифтогенеза и мантийным плюмовым магматизмом [5, с. 123]. Классическим примером служат крупные изверженные провинции, где в условиях континентального рифтогенеза происходило внедрение высокомагнезиальных расплавов (коматитов, пикритов) [6, с. 9; 7].

Вторым важнейшим геодинамическим фактором является формирование кор выветривания [5, с. 143]. Данный процесс реализуется в условиях платформенного (кратонного) режима с длительным континентальным перерывом в осадконакоплении. Тектоническая стабильность и выровненный рельеф в условиях гумидного или тропического климата способствуют глубокой химической дезинтеграции ультраосновных пород (офиолитовых комплексов), обнажающихся в складчатых поясах, завершивших свое развитие. В гипергенных условиях происходит мобилизация никеля, его перетолжение и концентрирование в коре выветривания с образованием силикатных (гарниерит-нонтронитовых) руд. Формирование подобных месторождений, широко распространенных на Урале, в Новой Каледонии и на Кубе, является прямым следствием пенепленизации рельефа в постинверсионную стадию развития региона. Таким образом, геодинамический режим выступает не просто фоном, а главным энергетическим и ве-

ществленным фактором, определяющим тип, масштаб и промышленную ценность месторождений никеля.

Таким образом, формирование месторождений никеля – это результат совпадения мантийного источника, благоприятной геодинамической обстановки для ликвации или выветривания, а также специфических термодинамических условий в земной коре.

Распространение, запасы и использование никелевых руд

В связи с широким использованием никеля в различных сферах (в производстве нержавеющей стали и специальных сплавов, в химической промышленности, энергетике и электронике и др.), определяется значимость никеленосных руд для мирового баланса. В 2022 г. мировое производство никеля в товарных рудах и концентратах составило около 3,3 млн т, наибольший рост показателя отмечен в Индонезии (на 54 %) и России (на 12 %) [8]. Мировые запасы никеля на сегодняшний день составляют около 162 млн т, среди которых на долю силикатных никелевых руд приходится 60 % подтвержденных запасов [9; 10]. В России сосредоточено около 15 % мировых запасов. При этом 90 % российских запасов медно-никелевых руд относится к сульфидному типу, который связан с дифференцированными массивами основных и ультраосновных пород. Остальные 10 % находятся в рудах силикатных месторождений коры выветривания ультраосновных массивов [8]. По разведанным запасам месторождения никеля подразделяются на уникальные (более 1 млн т), весьма крупные (от 500 тыс. до 1 млн т), крупные (от 250 тыс. до 500 тыс. т), средние (от 100 тыс. до 250 тыс. т) и мелкие (менее 100 тыс. т).

Месторождения Курило-Камчатского региона

К одной из новых территорий, на которых производится разработка и поиски медно-никелевых руд на Дальнем Востоке России, относится Камчатская никеленосная провинция [11]. Месторождения и проявления Камчатской металлогенической провинции приурочены к Камчатскому срединному массиву. Промышленные медно-никелевые оруденения месторождений Камчатской никеленосной провинции, как правило, связано синтрузия микортландит-горнблендит-пироксенит-габбро-диоритовой ассоциации дукусского комплекса [12; 13]. Руды Камчатской никеленосной провинции, в отличие от руд Норильского рудного района,

содержат меньше меди [12]. Месторождения Камчатской никеленосной провинции по содержанию полезных компонентов относятся к классу средних и мелких с богатыми рудами сплошного, гнездово-прожилкового и вкрапленного характера при содержании никеля 5,49 %. Главными рудными минералами являются пирротин, пентландит и халькопирит. Прогнозные ресурсы никеля Камчатской никеленосной провинции составляют более 1 млн т [12; 13].

Месторождения Сибири

Формирование промышленно значимых месторождений сульфидных медно-никелевых руд на Сибирской платформе генетически связано с процессами траппового магматизма на границе перми и триаса [5, с. 202]. Рудные тела приурочены к дифференцированным интрузиям основного состава, пространственно тяготеющим к зонам глубинных разломов. Главным районом добычи является Норильский рудный узел, где в пределах Хараелахского и Норильско-Марковского интрузивов локализованы уникальные по запасам залежи. Промышленная ценность определяется высокими содержаниями никеля, меди, кобальта и металлов платиновой группы в вкрапленных и массивных рудах. Руды сложены пирротином (52 %), халькопиритом (28 %), пентландитом (20 %) и минералами группы платины. На востоке региона, в зоне сочленения Сибирской платформы и складчатого обрамления, известны более мелкие объекты, связанные с ультраосновным магматизмом. Руды этих месторождений, как правило, характеризуются более низким качеством и сложным минералогическим составом.

Месторождения Кольского полуострова

Никелевые месторождения Кольского полуострова входят в состав Печенгско-Имандра-Варзугской зоны. Печенгско-Имандра-Варзугская зона протягивается в северо-западном направлении и захватывает территорию Финляндии и Норвегии. В пределах Кольского полуострова расположен Мончегорский рудный район, в котором находится Мончегорское месторождение. Медно-никелевое оруденение Мончегорского месторождения относится к ликвационно-магматическому типу. Основную массу рудного вещества составляют ликвационные сульфиды. Ликвационные сульфиды при зарождении магмы находятся в растворенном состоянии. При кристаллизации магмы происходит выделение ликвационных сульфидов [3]. В северо-западной части Кольского полуострова расположен

Печенгский рудный район. Медно-никелевые месторождения Печенгского рудного района имеют магматический генезис и связаны с измененными ультрабазитовыми телами. Интрузивные массивы с рудоносной минерализацией имеют пластообразную или линзовидную форму. Медно-никелевые руды Печенгского рудного района представлены вкрапленными, сплошными, брекчиевидными и прожилково-вкрапленными морфологическими типами. В большинстве случаев руды приурочены к нижним частям ультраосновных массивов и к подстилающим их породам. Главными сульфидными минералами являются пирротин, пентландит и халькопирит [5, с. 308].

Месторождения Белоруссии

Вопрос наличия промышленных месторождений цветных металлов на территории Белоруссии долгое время оставался открытым в силу глубокого залегания кристаллического фундамента (от 100 до 5000 м под осадочным чехлом). На территории Белоруссии выявлены два основных генетических типа никелевого оруденения: сульфидный медно-никелевый (связанный с магматическими породами основного-ультраосновного состава) и силикатный (коры выветривания) [2]. Основные перспективы никеленосности связываются с двумя типами геологических образований: ультрабазит-базитовыми комплексами фундамента и корами выветривания. Ельский рудный узел (Микашевичско-Житковичский выступ) является одним из наиболее изученных в отношении никеленосности. Здесь в ходе глубокого бурения в 1970–1980-х гг. были вскрыты интрузии основного и ультраосновного состава (перидотиты, пироксениты, габброиды).

В пределах Центрально-Белорусской зоны смятия (Минская область) известен Бобовнянский массив габброидов. Здесь также фиксируются геохимические аномалии никеля. Тип минерализации: Преимущественно силикатный никель (связанный с минералами группы серпентина и хлорита).

Наиболее богатым источником никеля в Белоруссии считаются древние коры выветривания мезозойского возраста (элювий), развитые по ультраосновным породам в Полесье. По условиям образования белорусские коры выветривания напоминают разрабатываемые месторождения силикатного никеля на Украине (Побужский рудный район) и Среднем Урале.

Ресурсный потенциал никеля в Белоруссии остается недостаточно изученным.

Перспективы его промышленного освоения связаны не с открытием богатых сульфидных руд классического типа, а с выявлением крупнообъемных месторождений с низким содержанием металла в корках выветривания при условии разработки эффективных технологий обогащения.

Несмотря на наличие утвержденных запасов, месторождения никеля в Белоруссии в настоящее время не разрабатываются. Это обусловлено комплексом факторов:

1. Технологическая сложность извлечения никеля из руды.

2. Сложные горнотехнические условия залегания рудных тел.

3. Экономическая конъюнктура: при текущем уровне мировых цен на никель себестоимость производства белорусского металла будет выше средней рыночной.

Таким образом, месторождения никеля в Белоруссии представляют собой реальный минерально-сырьевой потенциал. В случае изменения экономических условий (дефицит металла на рынке, развитие «зеленой» энергетики, требующей больших объемов никеля) или появления инновационных технологий переработки эти объекты могут быть вовлечены в промышленное освоение [2].

Месторождения Канады

Медно-никелевые месторождения, расположенные на территории Канады, имеют в основном магматический генезис. Месторождения этой генетической группы связаны с магматическими телами пироксенит-перидотитовой формации [14, с. 15]. Имеется также гипотеза импактного происхождения месторождений этой группы. Месторождения этой группы приурочивают также к астроблеме, возникшей на месте падения крупного метеорита в протерозойское время [15; 5, с. 370]. Общие запасы месторождения составляют 360 млн т руды при среднем содержании никеля 1,5 % [8].

Магматический комплекс Стиллуотер

Магматический комплекс Стиллуотер расположен в северо-западной части территории США и относится к габбро-норит-пироксенит-перидотитовой формации. Массив имеет расслоенное строение. С массивом связан ряд крупных рудопроявлений и месторождений меди, никеля, хрома и платины [8].

Бушвельдский комплекс месторождений Африки

Никелевые месторождения Бушвельдского комплекса, расположенного в южной части Африканской платформы приурочены к расслоенной серии пород основного и ультраосновного состава (габбро-норит-пи-

роксенит-перидотитовая формация). В вертикальном разрезе интрузива наблюдаются все типы магматических разновидностей мафит-мезомафического состава. Бушвельдский рудный интрузив имеет лаполитообразную форму [5, с. 259]. Медно-никелевые сульфидные руды имеют вкрапленный характер. Главными рудными минералами являются пентландит, пирротин и виоларит. Наиболее крупным месторождением Бушвельдского комплекса является месторождение Nkomati. Добыча ведется как открытым, так подземным способом. Основная зона минерализации месторождения Nkomati представлена сплошным сульфидным рудным телом с относительно высоким содержанием никеля. Среднее содержание никеля в руде составляет 0,37 %. Доказанные и вероятные запасы месторождения Nkomati составляют 980 тыс. т [8].

Месторождения Западной Австралии

По запасам никеля Австралия занимает одно из первых мест в мире, они составляют 17,7 млн т [8; 14, с. 45]. Разработка месторождений никеля в Австралии началась еще в конце 1960-х гг. Месторождения разрабатывались подземным способом. Здесь было обнаружено более 30 месторождений, образующих Западно-Австралийскую никеленосную провинцию. Никеленосность Западно-Австралийского региона в большинстве случаев связана с вулканическими коматитами, а также с интрузивными дунитами и расслоенными габброидами. Приуроченность оруденения к интрузивным дунитам и расслоенным габброидам позволила объединить месторождения Западно-Австралийского региона в Западно-Австралийский тип, наиболее близкий по ряду генетических и структурных параметров к Норильскому типу [16–18]. Одной из наиболее характерных особенностей данного типа является резкая вещественная рудная зональность. Внутренняя расслоенность сульфидных руд связывается с распадом моносльфидных твердых растворов. Рудные залежи в большинстве случаев развиты в основании толщ серпентинизированных оливиновых перидотитов, представляющих нижние кумулятивные части ультрамафических коматитов. Рудные тела большинства месторождений Западно-Австралийской никеленосной провинции имеют форму линз и прослоев, согласных общему напластованию пород коматит-толеитовой формации. Иногда рудные тела имеют столбообразную форму. Содержание никеля в рудах составляет от 0,6 до 9,5 % при среднем значении 2,1 % [8].

Прогнозирование месторождений никеля

Для проведения прогноза месторождений никеля необходимо изучение и установление закономерностей связи рудных формаций и месторождений [19, с. 7; 20; 4]. В зависимости от решаемых задач прогнозирование подразделяется на локальное и региональное. Локальное и региональное прогнозирование базируется на комплексном анализе геологических, геофизических и геохимических данных [21].

Основной задачей регионального прогнозирования является выделение новых перспективных территорий. В его задачу также входит определение перспектив площадей, находящихся в составе известных продуктивных районов.

Основной задачей локального прогнозирования на наличие полезных ископаемых перспективных территорий в пределах уже известных территорий и действующих предприятий является выявление рудоконтролирующих структур и фаций. Локальное прогнозирование осуществляется в пределах, выделенных и установленных руденосных регионов и в районах действующих предприятий никелевой промышленности. Увеличить количество этих факторов позволяет повышение объема изученного материала. Кроме того, одной из главных задач геологоразведочных работ является также проведение планомерных поисковых работ на перспективных площадях.

Необходимо отметить, что на разрабатываемых месторождениях никеля отмечается тенденция к снижению запасов массивных руд с высоким содержанием полезного компонента. Снижение запасов богатых руд заставляет разрабатывать и проводить внедрение новых методических исследований. Такие исследования должны способствовать поиску новых месторождений и источников получения полезного компонента. Одним из таких направлений является применение гидрохимического метода поиска полезных ископаемых и в частности никеля [12; 4].

Новые источники получения никеля

Постоянный рост рынка потребления никеля требует поиска новых никеленосных провинций и месторождений. Рост цен на никелевое сырье заставляет осваивать территории, считавшиеся ранее нерентабельными, а также проводить планирование поисково-оценочных работ на флангах и глубоких горизонтах уже известных рудных зон и узлов [3]. Очевидно, что даже Но-

рильский комбинат может оказаться на грани разорения, если руководство не будет заниматься модернизацией технологий переработки руд и поиском новых рудных тел на уже освоенных территориях [5, с. 431].

Одним из новых рудных источников получения никелевого сырья являются импактные кратеры (астроблемы). Наиболее ярким примером такой импактно-магматической минерализации является месторождение Садбери (Канада). Долгое время генезис этого уникального медно-никелевого месторождения вызывал споры. Современные петрологические и изотопные исследования подтверждают, что его образование инициировано падением крупного астероида около 1,85 млрд лет назад. Следовательно, метеоритные процессы следует рассматривать не как основной поставщик никеля, а как важный геологический агент, способный в исключительных случаях модифицировать рудоносные системы и создавать аномально богатые скопления руды. На территории России к таким объектам можно отнести Попигайскую структуру [5, с. 370].

Черносланцевые толщи и глубоководные конкреции, также можно рассматривать в качестве источников никеля. Содержание никеля в них может достигать 70 г/т [22].

К новому направлению получения никеля в последние годы стали относить переработку техногенных отходов месторождений. Структура техногенного месторождения включает комплекс продуктов горно-обогажительного (отвалы, хвостохранилища) и металлургического (шлаки) производства [23]. Переработка техногенных отходов месторождений может стать одним из ключевых источников по решению проблемы истощения богатых запасов [24].

Проблемы поиска и разработки месторождений никеля

Поиски и разработка месторождений никеля являются стратегически важными направлениями для мировой промышленности, обеспечивая сырьем такие ключевые секторы, как металлургия, машиностроение, электротехника и производство аккумуляторов. Однако на современном этапе отрасль сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем на всех стадиях – от поиска до эксплуатации.

Основные проблемы поиска заключаются в истощении и ухудшении качества легкодоступных ресурсов. Крупные и богатые месторождения сульфидного типа в традиционных горнорудных районах в значитель-

ной степени выработаны. Это заставляет планировать геологоразведочные работы в сложных, часто труднодоступных регионах и на объектах с более низким содержанием полезного компонента. В случае латеритных месторождений, составляющих около 60 % мировых ресурсов, поиск осложняется их значительной площадью распространения и необходимостью оценки не только никеля, но и попутных компонентов (кобальт, редкоземельные элементы) для обеспечения экономической целесообразности. Современный поиск требует применения дорогостоящих высокотехнологичных методов (геофизика, дистанционное зондирование и др.) и комплексного моделирования, что увеличивает временные и финансовые затраты.

Ключевые проблемы разработки носят технико-технологический, экономический и экологический характер.

1. Технологические сложности. Переработка бедных и сложных по составу руд, особенно латеритов, требует больших энергозатрат и применения специфических, часто индивидуально разрабатываемых гидрометаллургических или пирометаллургических схем. Сульфидные месторождения уходят на большие глубины, что повышает риски ведения горных работ и затраты на инфраструктуру.

2. Экологический аспект. Добыча и переработка никельсодержащих руд связаны с образованием больших объемов отходов (вскрышные породы, хвосты обогащения, шлаки). Существует риск загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, кислыми стоками и пылевыми выбросами. Особенно остро эта проблема стоит при разработке латеритов в странах с уязвимыми экосистемами. Это ведет к ужесточению природоохранного законодательства и росту затрат предприятий на внедрение наилучших доступных технологий и рекультивацию.

3. Экономические факторы. Проекты становятся все более капиталоемкими при длительных сроках окупаемости. Их рентабельность зависит от конъюнктуры мировых цен на никель, которая подвержена значительным колебаниям. Нестабильность цен создает риски для инвестиций в новые масштабные проекты.

Исследователями установлено, что извлечение цветных и благородных металлов, в том числе и никеля, из ультрамафических пород традиционными методами неэкономично [2]. Также этот процесс оказывает па-

губное влияние на окружающую среду [25]. В связи с этим необходимо проводить разработку и внедрение в производство новых методик извлечения полезных компонентов из рудного материала, использование которых позволяет сохранить геоэкологический баланс природных территорий, например таких, как бактериально-химическое выщелачивание [26–28].

Заключение

Изучение вопросов, связанных с поисками и разработкой месторождений никеля, вызвано необходимостью расширения минерально-сырьевой базы никелевой промышленности. Анализ, обобщение и систематизация опубликованных данных позволили выделить основные проблемы поиска и разработки источников никеля, получить выводы и дать рекомендации для решения установленных проблем.

Проведенными исследованиями подтверждено, что на разрабатываемых месторождениях никеля отмечается тенденция к снижению запасов богатых (массивных) и увеличению бедных (вкрапленных) руд, а также общему истощению минерально-сырьевой базы никеля. В этой связи рассмотрена целесообразность расширения разрабатываемых и освоения новых никеленосных территорий. При этом рекомендовано вовлечение в разработку нетрадиционных видов источников никелевого сырья, таких как импактные структуры, черносланцевые залежи, глубоководные конкреции, техногенные отходы месторождений никеля.

Исследования также показали, что добыча и переработка никельсодержащих руд связаны с рисками загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами, кислыми стоками, пылевыми выбросами и другими вредными отходами производства. Для снижения отрицательного воздействия на окружающую среду процессов извлечения полезных компонентов из рудного материала рекомендовано внедрение новых модернизированных методик и технологий переработки минерального сырья, которые разрабатываются учеными (бактериально-химическое выщелачивание и др.).

Таким образом результаты проведенных исследований, показали, что на современном этапе развития никелевой промышленности основной задачей поиска, освоения и эксплуатации источников никеля является разработка и применение новых низкотратных и экологических методик в перечисленных направлениях.

Список литературы

1. Земсков В. В., Прасолов В. И. Истощение минеральных ресурсов как угроза экономической безопасности России // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2021. Т. 11. № 10. С. 195–205. DOI: 10.34670/AR.2021.76.61.023. EDN: KVHANA.
2. Десяткин А. С., Гайсина Л. Г. Современные тенденции и проблемы освоения медно-порфировых месторождений Российской Федерации // Экологический вестник России. 2018. № 4. С. 38–42. EDN: YVIZJM.
3. Криволуцкая Н. А. Геохимические исследования пород Сибирской магматической провинции и их роль в теории образования уникальных платино-медно-никелевых месторождений // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 738–756. EDN: ROAVGE.
4. Гроховская Т. Л., Бакаев Г. Ф., Шолохнев В. В., Лапина М. И., Муравицкая Г. Н., Войтехович В. С. Рудная платино-металлическая минерализация в расслоенном Мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 4. С. 329–352. EDN: OTUUIID.
5. Лихачев А. П. Платино-медно-никелевые месторождения / А. П. Лихачев. М.: Эслан, 2006. 495 с. EDN: QKFZVW. ISBN 5-94101-155-5.
6. Быховер Н. А. Распределение мировых ресурсов минерального сырья по эпохам рудообразования. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 576 с.
7. Семячков А. И., Балащенко В. В. Оценка экономических и экологических условий для эффективного освоения силикатных никелевых руд месторождений Среднего Урала // Экономика региона. 2024. Т. 20. № 1. С. 205–217. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-1-14. EDN: EXFAFM.
8. Игровская Л. В. Особенности развития мировой никелевой промышленности на современном этапе // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2006. № 1. С. 96–99. EDN: KHRNWF.
9. Лялюк Е. С., Горячев А. А., Компанченко А. А. Извлечение цветных металлов из сульфидных руд с помощью биовыщелачивания на примере Аллареченского техногенного месторождения // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2023. Т. 26. № 2. С. 150–159. DOI: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-150-159. EDN: VHNCYL.
10. Московкин Д. В. Анализ состояния минерально-сырьевой базы мировой никелевой промышленности // Записки Горного института. 2002. Т. 150. № 2. С. 155–158. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-mineralno-syrievoy-bazy-mirovoy-nikelevoy-promyshlennosti> (дата обращения: 15.02.2026).
11. Кунгурова В. Е. Краткий обзор минерально-сырьевого потенциала Камчатской никеленосной провинции (основные этапы изучения, состояние и перспективы освоения) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 10. С. 31–56. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-12-10-31. EDN: XASDFI.
12. Паламарь С. В. Гидрохимические методы поисков месторождений никеля на Камчатке // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № S57. С. 142–147. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-57-142-147. EDN: YUBKTI.
13. Трухин Ю. П., Степанов В. А., Сидоров М. Д. Камчатская никеленосная провинция // Доклады Академии наук. 2008. Т. 418. № 6. С. 802–805. EDN: ICEAHD.
14. Туганова Е. В. Формационные типы, генезис и закономерности размещения сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений (на примере Восточно-Сибирской и некоторых других провинций). СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 100 с.
15. Latypov R., Chistyakova S., Grieve R., Huhma H. Evidence for igneous differentiation in Sudbury Igneous Complex and impact-driven evolution of terrestrial planet proto-crusts // Nature Communications. 2019. Vol. 10. Is. 1. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-08467-9> (дата обращения: 14.02.2026). DOI: 10.1038/s41467-019-08467-9. EDN: CREXTW.

16. Крылов И. О., Никулин И. И. Новые данные об условиях локализации и составе сульфидных медно-никелевых руд западной части Октябрьского месторождения Норильского района // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2023. № 3. С. 98–112. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-98-112.
17. Заскинд Е. С., Конкина О. М. Типизация сульфидных медно-никелевых и платинометалльных месторождений для целей прогноза и поисков // Отечественная геология. 2019. № 2. С. 3–15. DOI: 10.24411/0869-7175-2019-10010.
18. Chayka I. F., Kamenetsky V. S., Zhitova L. M. et al. Hybrid Nature of the Platinum Group Element Chromite-Rich Rocks of the Norilsk 1 Intrusion: Genetic Constraints from Cr Spinel and Spinel-Hosted Multiphase Inclusions // Economic Geology. 2020. Vol. 115. Is. 6. P. 1321–1342. DOI: 10.5382/ econgeo.4745. EDN: KEILXJ.
19. Радько В. А. Фации интрузивного и эффузивного магматизма Норильского района. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 226 с. ISBN 978-5-93761-243-4.
20. Спиридонов Э. М. Норильские рудоносные интрузивы и сульфидные руды. К 120-летию М. Н. Годлевского // Отечественная геология. 2022. № 6. С. 95–116. DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10038. EDN: UZAZWC.
21. Малич К. Н. Критерии прогноза сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Норильской провинции // Литосфера. 2021. № 21 (5). С. 660–682. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-5-660-682.
22. Батурин Г. Н. Геохимия микроэлементов в углеродистых осадках современных морей и океанов // Геохимия. 2017. № 5. С. 402–412. DOI: 10.7868/S0016752517050041. EDN: YTKRIB.
23. Гурская Л. И., Снежко О. Н., Молчанов А. В., Васильев С. П. Техногенные месторождения платиновых металлов – новый источник ценного промышленного сырья // Региональная геология и металлогения. 2016. № 66. С. 80–90. EDN: WEIOVP.
24. Василькова А. О., Васильков Н. В., Хмельницкая О. Д., Войлошников Г. И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 1. С. 97–107. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-1-97-107.
25. Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Кузнецов В. В., Абурова В. А. Выбор параметров флотации сульфидных медно-никелевых руд на основе анализа распределения компонентов по флотиремости // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 1. С. 131–147. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-1-0-131.
26. Трухин Ю. П., Хайнасова Т. С., Рогатых С. В. Выделение хемолитотрофных микроорганизмов из окисленной руды медно-никелевого месторождения Шануч (Камчатка) для биовыщелачивания сульфидных руд // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2012. № 1. С. 86–91. URL: <https://www.vydelenie-hemolitotrofnih-mikroorganizmov-iz-okislennoy-rudy-medno-nikelevogo-mestorozhdeniya-shanuch-kamchatka-dlya-biovyschelachivaniya-sulfidnyh-rud.pdf> (дата обращения: 14.02.2026).
27. Александрова Т. Н., О’Коннор С. Переработка платинометалльных руд в России и Южной Африке: состояние и перспективы // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 462–473. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.9.
28. Гаврилов А. С., Ординарцев Д. П., Крашенинин А. Г., Петрова С. А. Извлечение никеля и кобальта из продукционных растворов кучного выщелачивания окисленных никелевых руд // Разведка и охрана недр 2022. № 8. С. 63–68. DOI: 10.53085/0034-026X_2022_08_63.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.