

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И РУДООБРАЗУЮЩИЕ СИСТЕМЫ ПЕЧЕНГСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (АРКТИЧЕСКАЯ ЗОНА РОССИИ)

К. В. Лобанов, М. В. Чичеров, И. А. Чижова, Т. А. Горностаева

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация)

Н. В. Шаров

Институт геологии ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (Петрозаводск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2019 г.

На основе результатов геофизического изучения и сверхглубокого бурения была создана интегральная глубинная модель Печенгского рудного района (Арктическая зона России). Детальные сейсмотомографические исследования центральной части рудного района позволили выявить под Печенгской структурой подъем верхней границы поверхности Мохо, что трактуется как реликтовый мантийный плюм, который определял геологические события в палеопротерозое. Исследования сверхглубокой скважины СГ-3 доказали высокую насыщенность докембрийской коры разнообразной рудной минерализацией на всем вскрытом интервале, в том числе золоторудной в интервале 9500–11 000 м. На основе интегральной геодинамической модели глубинного строения Печенгского рудного района предложена новая интерпретация локализации месторождений.

Ключевые слова: Арктическая зона, Печенгский рудный район, медно-никелевые месторождения, золотая минерализация, металлы платиновой группы, Кольская сверхглубокая скважина, сейсмические исследования.

Введение

В экономическом развитии и геологическом изучении Печенгского рудного района преобладают добыча и переработка сульфидных медно-никелевых руд. Сульфидные медно-никелевые месторождения Печенгского рудного поля являются вторым после Норильского района источником никеля в нашей стране и основой самого крупного из ныне действующих горнодобывающих предприятий Европы. Они входят в первую пятерку сульфидных медно-никелевых месторождений мира и являются объектом все расширяющихся геолого-разведочных и научно-исследовательских работ. Главные металлы — медь, никель и кобальт. Попутно добываются металлы платиновой группы. Балансом на 31 декабря 2017 г. учтены запасы в количестве 470,4 млн т руды, содержащие 3,16 млн т Ni и 1,54 млн т Cu.

Печенгский рудный район традиционно рассматривается как состоящий из Печенгского и Аллареченского рудных полей. Первое приурочено к структуре одноименного раннепротерозойского вулканогенно-осадочного комплекса. Второе расположено

к югу от этой структуры в архейских метаморфических породах. В составе карельской Печенга-Имандра-Варзугской зоны Печенгский рудный район фигурировал во всех геотектонических и металлогенических интерпретациях Фенноскандинавского щита. Зона состоит из нескольких тектонически нарушенных сегментов, отличающихся различными раннепротерозойскими вулканогенно-осадочными комплексами и их строением. Основными частями являются Имандра-Варзугская зона и Печенгская структура. Иногда Печенгская структура объединяется с поясом Пасвик-Полмас [1; 2]. Корреляция геологических, геофизических и металлогенических данных по прилегающим территориям России, Норвегии и Финляндии позволила предположить, что Печенгский рудный район представляет собой изолированный сегмент Печенга-Имандра-Варзугской металлогенической зоны [2; 3].

На северо-востоке район ограничен Титовско-Амбарной (Воронья-Колмозерской) системой разломов, с юго-востока — Лицко-Арагубской, на северо-западе — Инари-Киркинеской, а на юго-западе — системой малоизученных разломов северо-западного простирания (рис. 1а). В этой интерпретации архейский фундамент Печенгского рудного района

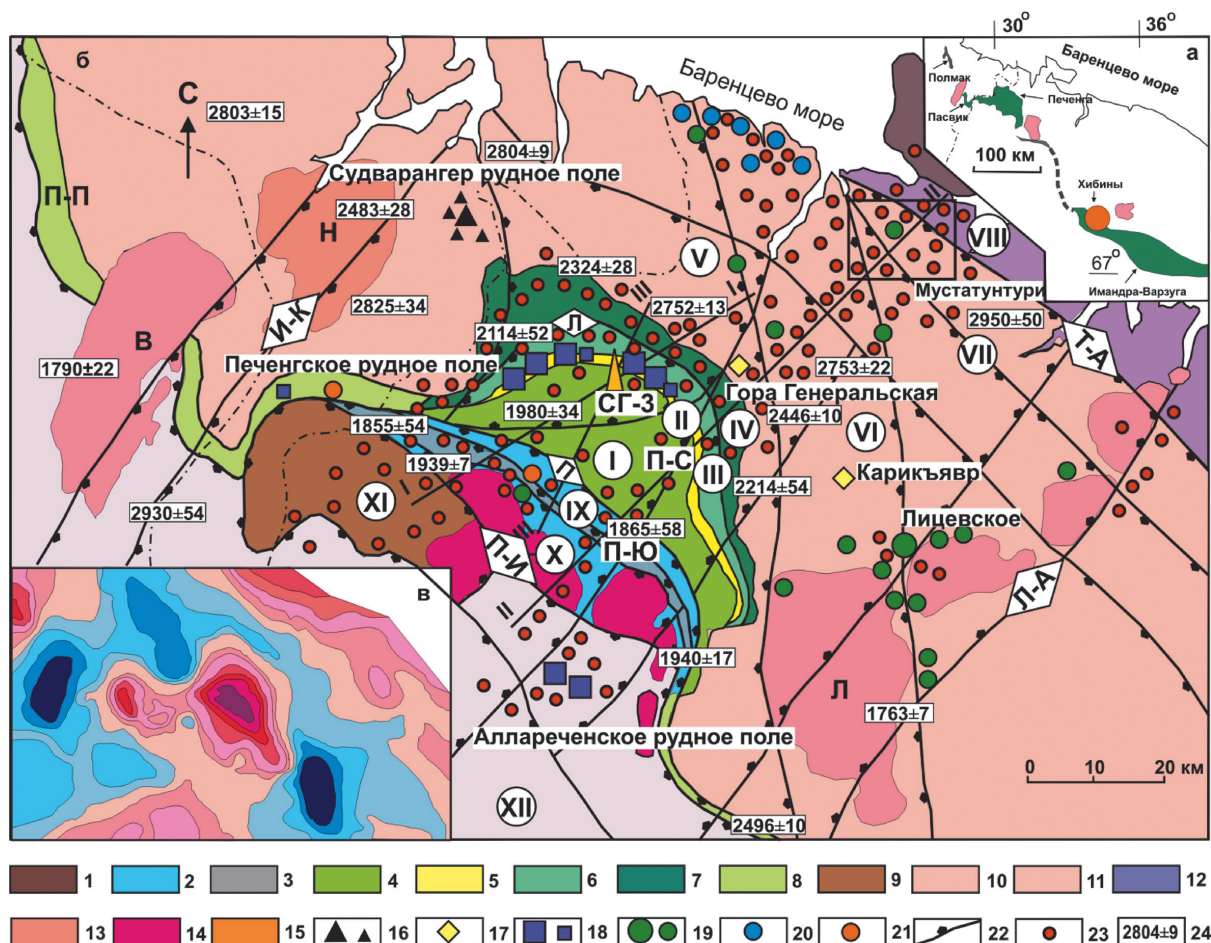


Рис. 1. Схема регионального размещения (а) геологического строения (б), гравитационного поля (в) в Печенгском рудном районе [1; 2]: 1 – позднепротерозойские осадочные отложения; 2–7 – ранний протерозой: 2, 3 – южнопеченгская серия (Пороярвинский блок – IX); 2 – метавулканогенные и метасадочные породы, 3 – метаандезиты; 4–7 – северопеченгская серия: 4 – metabasalts and metasedimentary rocks of Kolasjoki formation (Kolasjoki block – III), 7 – метаандезиты и метасадочные породы свит куэтсарви, ахмалахти (Луостаринский – IV); 8 – северопеченгская и южнопеченгская серии нерасчлененные; 9 – кристаллические сланцы тундровой серии (Тундровый – XI); 10–12 – архей: 10 – гнейсы, мигматиты, граниты и амфиболиты Кольско-Норвежского блока (Западно-Няссюкский – V, Няссюкско-Титовский – VI, Лиинахамарский – VII), 11 – гнейсы и кристаллические сланцы блока Инари (Аллареченский – XII), 12 – гранитизированные гнейсы Мурманского блока (VIII); 13–15 – раннепротерозойские гранитоиды: 13 – поздние интрузивные (лицко-арагубский комплекс), В – Вайноспаа, Л – Лицкий; 14 – реоморфические (Толпвидский – X); 15 – ранние интрузивные, Н – Нейден; 16–21 – рудные месторождения (крупные значки) и рудопроявления (мелкие значки): 16 – Fe, 17 – ЭПГ, 18 – Cu-Ni, 19 – U, 20 – Pb-Zn, 21 – Au; 22 – зоны разломов (буквы в ромбах): Т-А – Титовско-Амбарная (Воронья-Колмозерская), Л-А – Лицко-Арагубская, И-К – Инари-Киркенеская, П-И – Печенга-Имандра, Л – Лучломпольский, П – Порыташский; 23 – места отбора ориентированных образцов, 24 – результаты изохронного датирования (млн лет). П-С – Северное крыло, П-Ю – Южное крыло Печенгской структуры, П-П – пояс Пасвик-Полмак. Цифры в кружках – формализованные тектонические блоки. I-I – расчетный профиль, проходящий через Кольскую сверхглубокую скважину, II-II – опорный профиль на поверхности через Печенгский район, III-III – сейсмический профиль КОЛА ОГТ-92

Fig. 1. Scheme of the regional location (a), the geological structure (b), and the gravitational field (v) in the Pechenga ore region [1; 2]. 1 – late Proterozoic sedimentary rocks; 2–7 – early Proterozoic: 2, 3 – South Pechenga series (Porajarvi block – IX): 2 – metavolcanic and metasedimentary rocks, 3 – metaandesites; 4–7 – North Pechenga series: 4 – metabasalts and metapicrites of Pilgujarvi formation (Pilgujarvi block – I), 5 – metasedimentary Productive mass enclosing Ni-bearing intrusions (Productive block – II), 6 – metabasalts and metasedimentary rocks of Kolasjoki formation (Kolasjoki block – III), 7 – metaandesites and metasedimentary rocks of Kuetsjarvi and Ahmalahti formation (Luostari block – IV); 8 – South Pechenga and North Pechenga series undivided; 9 – crystalline schist of Tundra series (Tundra block – XI); 10–12 – Archaean: 10 – gneisses, crystalline schist of the Kola-Norwegian block (West Njassjuksky – V, Njassjuksko-Titovsky – VI, Liinahamari – VII), 11 – gneiss and crystalline schist of Inari block (Allarechensky – XII), 12 – granitized gneisses of the Murmansk block (VIII); 13–15 – early Proterozoic granitoids: 13 – late intrusive (Litsko-Aragubsky complex), В – Wainospaa, Л – Litsky; 14 – reomorphic (Tolpvidsky – X); 15 – early intrusive, Н – Neiden; 16–21 – ore deposits (large icons) and ore occurrences (small icons): 16 – Fe, 17 – PGE, 18 – Cu-Ni, 19 – U, 20 – Pb-Zn, 21 – Au; 22 – fault zones (letters in rhombi): Т-А – Titovsko-Ambarnaya (Voronya-Kolmozerskaya), Л-А – Litsko-Aragubskaya, И-К – Inari-Kirkeneskaya, П-И – Pechenga-Imandra, Л – Luchlompolsky, П – Por'itashsky; 23 – oriented sampling sites, 24 – isochronous dating results (millions of years). П-С – North wing, П-Ю – South wing of the Pechenga structure, П-П – Pasvik-Polmak belt. Numbers in the circles – formalized tectonic blocks. I-I – design profile passing through the Kola super-deep well, II-II – reference profile on the surface through the Pechenga district, III-III – KOLA OGT-92 seismic profile

включает в себя несколько фрагментов Норвежско-Кольского и Инари блоков, в то время как его протерозойские структурные элементы включают в себя Печенгскую структуру, пояс Пасвик-Полмак, цепь лицо-арагубских гранитоидных массивов, гранитоидного массива Вайноспаа, а также ряд разломов фундамента более высоких порядков. Некоторые из этих разломов, вероятно, были унаследованы от архейских структур (рис. 1б).

Следует подчеркнуть, что основные тектонические элементы Печенгского рудного района четко отражены в региональном гравитационном поле. Печенгская структура соответствует положительной гравитационной аномалии, которая охватывает как северную, так и южную ее части и прилегающую территорию блока Инари. Отрицательные гравитационные аномалии совпадают с гранитами и гранитоидным массивом Вайноспаа, и они симметричны относительно положительной аномалии. Мелкие аномалии гравитационного поля связаны с куполами реоморфических гранитоидов (рис. 1в).

В рамках предложенных границ в Печенгский рудный район кроме Печенгского и Аллареченского рудных полей входят архейские железные руды Судварангера (Sydvaranger), раннепротерозойские элементы платиновой группы (ЭПГ) и никелевые рудопроявления горы Генеральской, позднеархейская-раннепротерозойская радиоактивная минерализация различных типов, гидротермальные свинцово-цинковые жилы (вероятно, рифейского возраста) и золотосеребряная минерализация, открытая на

глубоких горизонтах скважины СГ-3 и в Южно-Печенгской структурной зоне [2; 4].

Глубинная интегральная модель Печенгского рудного района

Исследование Кольской сверхглубокой скважины СГ-3 не ограничивалось изучением керна. Также принималась во внимание ее общая геологическая позиция, установленная в ходе долгосрочных комплексных работ, направленных на создание интегральной геодинамической модели Печенгского района. Исследования проводились на основе специализированной документации разреза скважины и включали структурно-петрологические и петрофизические исследования образцов керна, дополненные изучением соответствующих участков коренных пород на поверхности для корреляции разреза скважины и опорного профиля, проходившего от побережья Баренцева моря до Аллареченского рудного поля [2; 3].

Исследования были направлены на выявление взаимосвязи между деформацией и метаморфизмом, а также петрофизическими свойствами горных пород и рудных месторождений. В базу данных были включены 1600 образцов керна скважины СГ-3 и 3500 образцов, отобранных на поверхности. Плотность пород и анизотропия продольных ультразвуковых волн (KAVp) были использованы в качестве основных параметров для сравнения разреза скважины СГ-3 и опорного профиля на поверхности (рис. 2). Первый параметр отражает литологию пород, второй — интенсивность синметаморфических

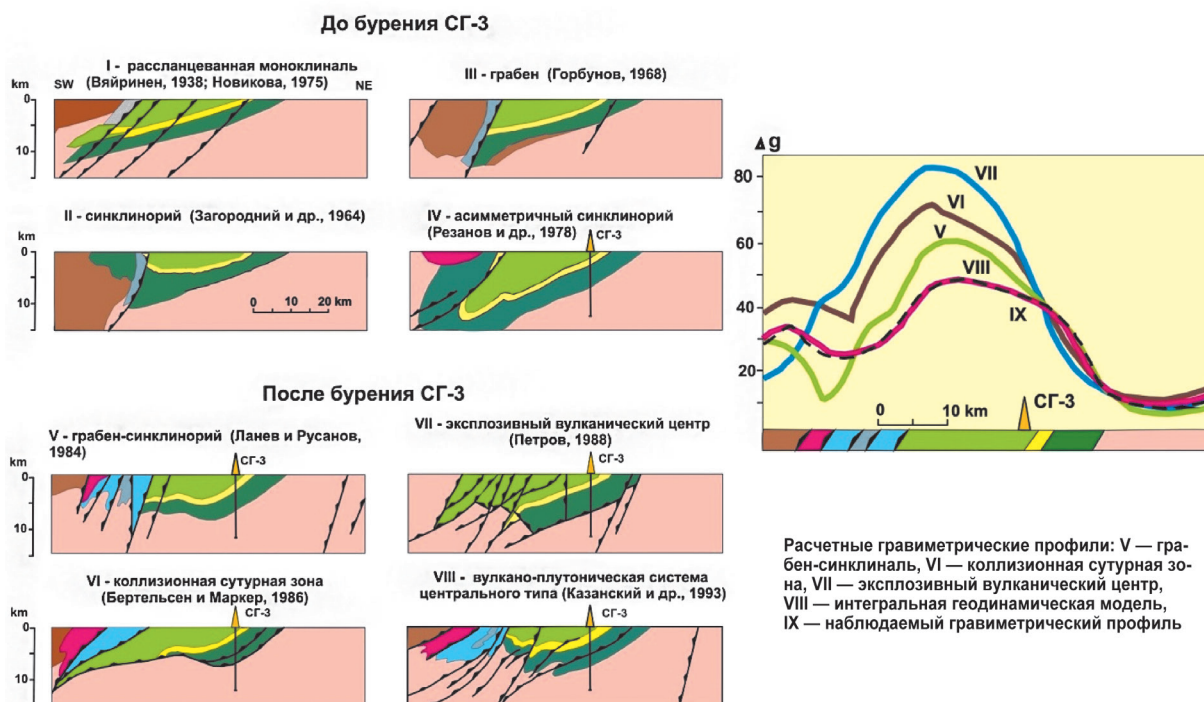


Рис. 2. Альтернативные модели глубинного строения Печенгской структуры в проекции разреза через Кольскую сверхглубокую скважину (слева) и сопоставление наблюдаемого и расчетного гравиметрических профилей (I-IX) [1]

Fig. 2. Alternative models of the deep Pechenga structure in the projection of the section through the Kola super-deep well (on the left) and comparison of the observed and calculated gravimetric profiles (on the right) (I-IX) [1]

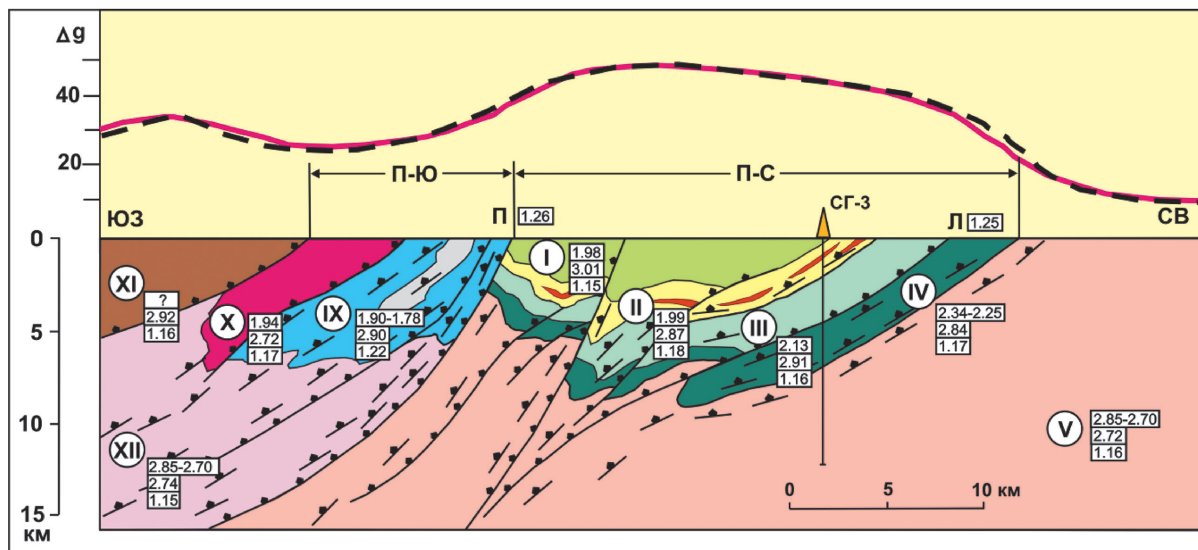


Рис. 3. Схематический разрез объемной интегральной геодинамической модели Печенгского рудного района через скважину СГ-3 и сопоставление наблюдаемого (красная сплошная линия) и расчетного (черный пунктир) гравиметрических профилей. Условные обозначения – на рис. 1. Цифры в квадратах – средние значения для пород формализованных тектонических блоков (I–XII): верхняя – возраст пород (млрд лет), средняя – плотность (г/см³), нижняя – значение KAVp
Fig. 3. Schematic section of the volume integrated geodynamic model of the Pechenga ore district through the SG-3 well and comparison of the observed (red solid line) and calculated (intermittent black line) gravimetric profiles. See fig. 1 for legend. Numbers in squares – average values for rocks of formalized tectonic blocks (I–XII): the upper one – the age of rocks billion years, the medium – density (g/cm³), the lower one – the KAVp value

тектонических деформаций. Кроме того, были учтены новые данные по возрасту и морфологии гравитационного поля в Печенгском районе. Для расчета параметров использовались специальные компьютерные программы. Данные по отдельным пробам были составлены для типов пород и обработаны методом средневзвешенных значений для эталонного разреза скважины и пород, отобранных для сравнения с поверхности [2].

Были сформулированы геологические ограничения объемной модели Печенгского района, вытекающие из изучения поверхности и скважины. Но их оказалось недостаточно для градуировки модели по вертикали. Решение было найдено путем формализации и корреляции разреза скважины и опорного профиля по плотности пород и объемной анизотропии скоростей продольных волн.

Никеленосная Печенгская структура лучше всего изучена в Печенгском рудном районе. Серия глубинных моделей, предложенных в середине 1980-х годов, были основаны на той же геологической карте Печенгского рудного поля и разрезе скважины СГ-3. Эти модели рассматривают структуру Печенги как грабен-синклиналь, асимметричную синклиналь, взрывной вулканический центр, зону шва столкновения континент-континент и др.

Компьютерная технология позволила пересмотреть эти альтернативные модели путем сравнения наблюдаемых и расчетных профилей силы тяжести, проходящих через скважину СГ-3. Геологические ограничения модели, данные о плотности и значении KAVp в разрезе скважины и на поверхности

впервые были использованы для переоценки интегрированной глубинной геодинамической модели на глубину до 15 км. Переоценка геодинамической модели в основном базировалась на сопоставлении наблюдаемых и расчетных профилей гравитации вдоль участка, проходящего через скважину СГ-3. Компьютерная технология позволила рассчитать гравитационные профили для различных моделей по морфологии и размерам тектонических единиц и соответствующих средних плотностей пород. Другими словами, решена обратная задача моделирования и воспроизведения поля по объекту с известными параметрами. В интегральной объемной геодинамической модели рассчитанные и наблюдаемые гравитационные профили лучше соответствуют друг другу (рис. 3) [4].

Важным результатом разработки интегральной модели Печенгского рудного района является вывод о сравнительно небольшой глубине ее северной части (т. е. северопеченгской серии), которая в вертикальном разрезе не превышает 10–12 км. То же характерно для южной части (или южнопеченгской серии). Согласно компьютерному анализу гравитационных данных под центральной частью Печенгской структуры нет мощных основных и ультраосновных тел. Вариации KAVp в разрезе Печенгской структуры указывают на более интенсивные деформации северной части по сравнению с южной. В северном сегменте синметаморфические сдвиги и разломы в основном влияли на рудоносную Продуктивную толщу и нижние части северопеченгской серии. Судя по распределению плотностей пород,

максимальная глубина нижнего контакта Продуктивной толщи не превышает 5—6 км. На юге распространение Продуктивной толщи ограничено Полярташским разломом [1—3].

Интегральная глубинная модель рассматривает Печенгский рудный район как горизонтальный разрез мантийной вулcano-плутонической рудообразующей системы центрального типа. Модель определяет северное крыло Печенгской структуры как фрагмент вулканической кальдеры, а ее южную часть описывает как чешуйчатую моноклиналь в сочетании с куполами реоморфических гранитоидов. Развитию системы предшествовал рифтогенез консолидированной сиалической коры. Модель предполагает генетическую связь между протерозойским вулканизмом и никеленосным основным-ультраосновным плутолизмом. Основные и более молодые средние вулканические породы, заполняющие две вулcano-тектонические депрессии, прослеживаются в мощной зоне северо-западных разломов. В дальнейшем вулcano-тектонические депрессии подверглись интенсивному сжатию и метаморфизму, что отразилось и на породах фундамента. Наконец, в условиях растяжения сформировались крутопадающие зоны катаклазитов и ретроградного метаморфизма [4].

Рудообразующие системы Печенгского рудного района

В Печенгском рудном районе пространственно совмещены четыре разнотипных рудообразующих системы — платинометалльная плутогенная, медно-никелевая вулcano-плутогенная, урановорудная и золоторудная флюидно-метасоматические, которые образованы при разных геотектонических режимах на карельском и свекофенском (2,4—1,6 млрд лет) этапах развития Балтийского щита. Более молодые процессы тектоно-магматической активизации, связанные с формированием шельфа Баренцева моря, привели к преобразованию этих месторождений и формированию гидротермальной

свинцово-цинковой минерализации. Установлено, что роль мантийных источников и процессов в развитии уменьшалась, а внутрикоровых увеличивалась. Этим объясняется последовательный переход платинометалльного оруденения в связи с гипербазитами к сульфидному медно-никелевому в ассоциации с габбро-верлитовыми интрузиями и далее к метаморфогенному гидротермально-метасоматическому урановому и золотому рудообразованию.

Нет никаких доказательств непрерывного простиранья медно-никелевой рудообразующей системы под Печенгской структурой. Наряду с этим с помощью сейсмических и петрологических данных были обнаружены два свидетельства медно-никелевой рудообразующей системы на более глубоких горизонтах [5], а именно: Vp/Vs аномалии на глубине 20—25 км, аналогичные той, что существует под Норильским рудным районом и считается промежуточной магматической камерой, и подъем границы Мохо, достигающий максимальной высоты 34 км под Печенгской структурой, которые могут быть истолкованы как реликтовый мантийный плюм [2—4; 6].

Центральная часть Печенгского рудного района была выбрана для более детальных сейсмотомографических исследований с использованием геологических, геофизических, петрологических и дополнительных сейсмических данных. Установлено, что под Печенгской структурой верхняя граница поверхности Мохо расположена на минимальной глубине 34—41 км. Основываясь на последних металлогенических данных, мы рассматриваем это поднятие Мохо как реликтовый мантийный плюм, который определял геологические события в палеопротерозое (рис. 4).

Анализ имеющихся сейсмических, геологических и петрофизических данных позволяет выделить три типа сейсмогеологических границ первого порядка: (1) основание древней континентальной коры Земли, (2) границу раздела нижних гомогенных и верхних гетерогенных слоев земной коры, (3) границу раз-

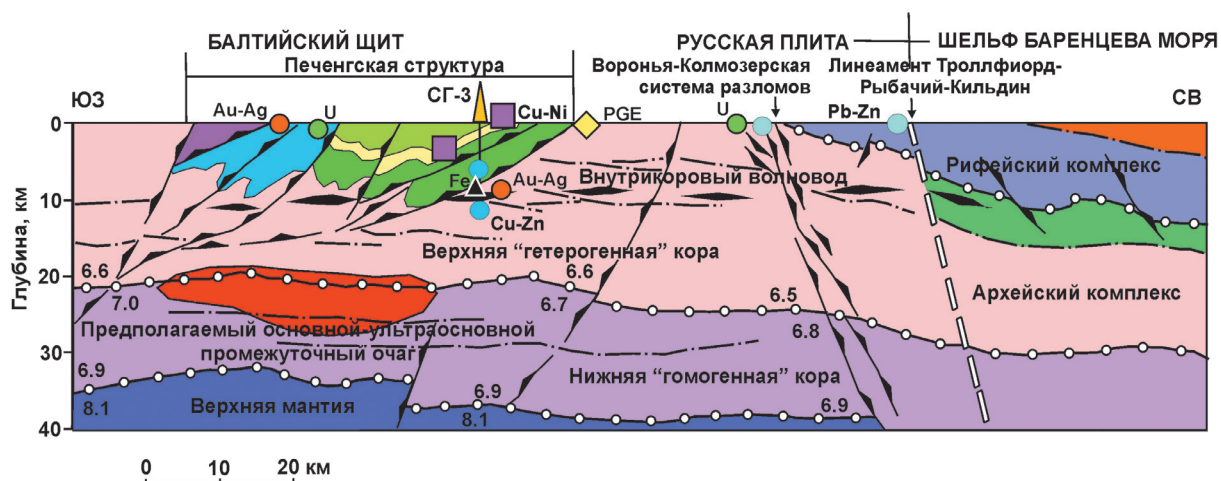


Рис. 4. Взаимосвязь между мантийными, коровыми и рудообразующими системами Печенгского рудного района [2—4]
Fig. 4. Relationship between the mantle, crust and ore-forming systems of the Pechenga ore district [2—4]

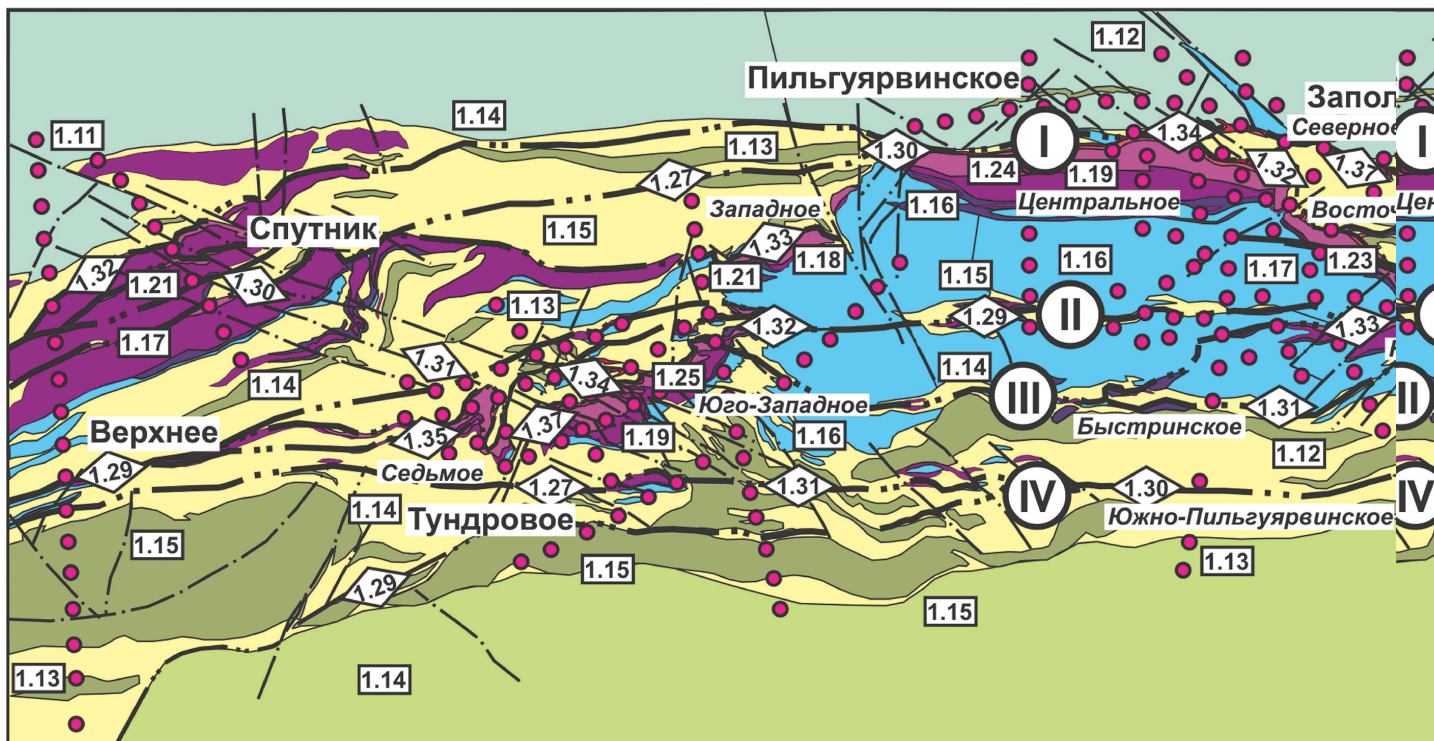


Рис. 5. Петрофизическая схема Восточного рудного узла Печенгского рудного поля: 1 — эпигенетические брекчиевидные, сплошные и богатые вкрапленные сульфидные медно-никелевые руды, 2 — вкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах, 3 — перидотиты, 4 — пироксениты, 5 — габбро, 6 — габбро-диабазы, 7 — породы Продуктивной туфогенно-осадочной толщи, 8 — вулканогенные породы пильгуярвинской свиты, 9 — вулканогенные породы колосийской свиты; 10–11 — разрывные тектонические нарушения: 10 — диагональные разломы, 11 — межпластовые тектонические зоны; 12 — места отбора ориентированных образцов и участки детальных структурно-петрофизических исследований; 13–14 — средние значения KAVp для пород: 13 — тектонических блоков, 14 — межпластовых тектонических зон; 15 — месторождения медно-никелевых руд, 16 — рудные тела сульфидных медно-никелевых руд

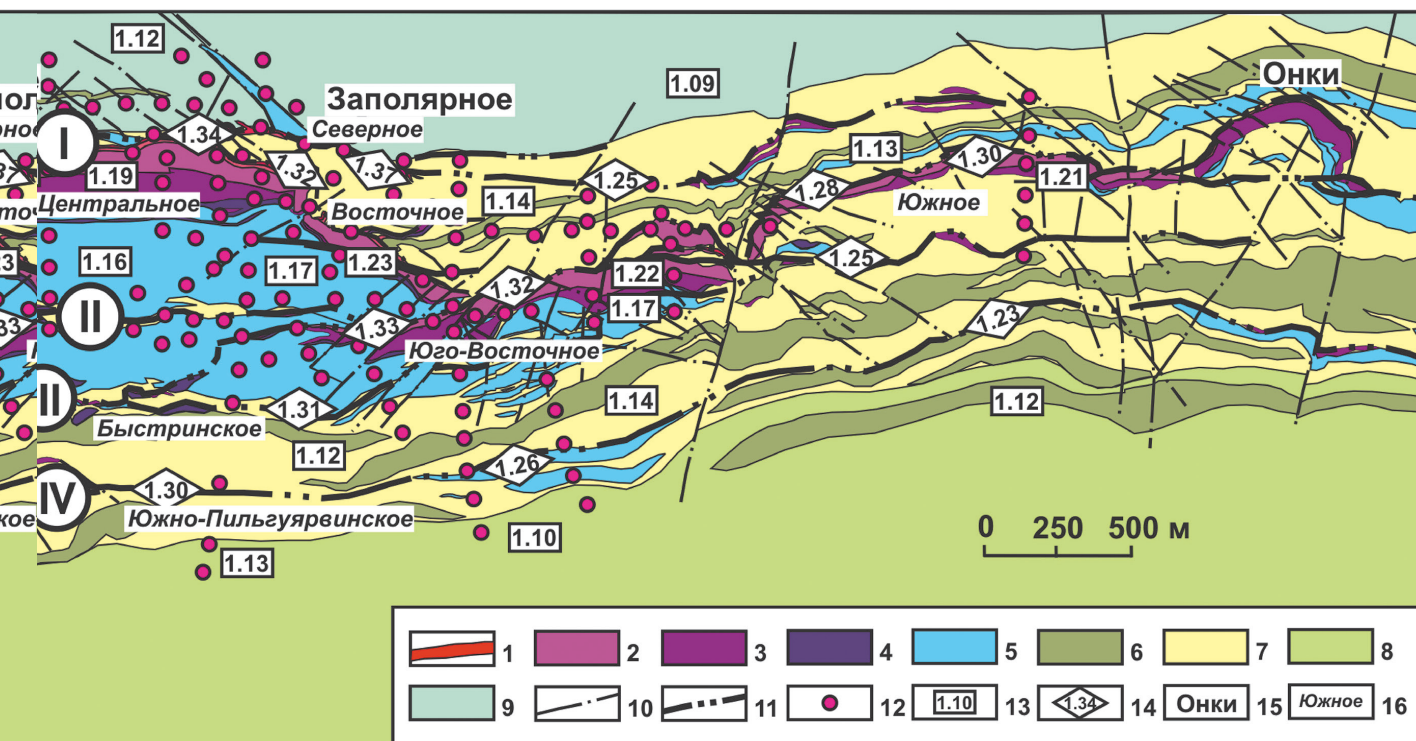
Fig. 5. Petrophysical scheme of the Eastern ore cluster of the Pechenga ore field: 1 — epigenetic brecciated, solid and rich disseminated sulfide copper-nickel ores, 2 — disseminated ores in serpentinized peridotites, 3 — peridotites, 4 — pyroxenites, 5 — gabbros, 6 — gabbro-diabase, 7 — rocks of the Productive tuffaceous-sedimentary strata, 8 — igneous rocks of the Pilguyarvi suite, 9 — igneous rocks of the Kolosjoki suite; 10–11 — discontinuous tectonic faults; 10 — diagonal faults, 11 — interlayer tectonic zones; 12 — oriented sampling sites and areas of detailed structural-petrophysical studies; 13–14 — average KAVp values for rocks: 13 — for tectonic blocks, 14 — for interlayer tectonic zones; 15 — deposits of copper-nickel ores, 16 — ore bodies of sulfide copper-nickel ores

дела докембрийского фундамента и неметаморфизованных рифейских пород. Все эти границы влияют на металлогеническое районирование Печенгского рудного района. Наибольшее значение имеют сейсмогеологические границы 1 и 3. Распределение рудных залежей карельского и свекофенского циклов коррелирует с границей 1, а низкотемпературная гидротермальная полиметаллическая минерализация, наложенная на карельские структуры, в целом приурочена к границе 3 [2].

Имеются достаточные доказательства того, что палеопротерозойские породы Печенгского рудного района испытывали тектонические деформации, сопровождавшиеся зональным метаморфизмом. Характерная особенность — воздействие низкотемпературного метаморфизма на габбро-верлитовые интрузии и ассоциированные с ними медно-никелевые месторождения [7]. Если предложенная интерпретация структуры Печенги как деформированного вул-

канического центра, ограниченного системами разломов, верна, то Печенгское Cu-Ni месторождение может быть отнесено к вулканоплутоническому типу и соответствующей рудообразующей системе мантийно-корового типа [4].

Никеленосный с ЭПГ раннепротерозойский массив горы Генеральская состоит из габбро-норитов и небольшого количества оливин-плагиоклазовых кумулатов. Его малосульфидная ЭПГ-минерализация представлена сульфоарсенидами. Обогащение пойкилитовых и такситовых вмещающих пород летучими минералами, обилие неравновесных ассоциаций, достаточно полное фракционирование ЭПГ, преобладание тяжелых и редких ЭПГ свидетельствуют о существовании спредингового центра, вероятно, связанного с горячей точкой или мантийным плюмом. В рамках глубинной модели предполагается, что северная часть Печенгской структуры (где сосредоточены Cu-Ni руды) пред-



ставляет собой срезанный фрагмент вулканической кальдеры, а ее южная часть — сочетание круто погружающейся чешуйчатой моноклинали с надвинутыми гранитоидными куполами. Вертикальная протяженность Печенгской структуры оценивается примерно в 10 км. Предполагалось также, что нынешний уровень эрозии Печенгского рудного района может рассматриваться как горизонтальное сечение мантийной рудообразующей системы центрального типа (см. рис. 4).

Медно-никелевые месторождения не только занимают определенное положение в палеопротерозойском вулканогенно-осадочном комплексе. Никеленосные габбро-верлитовые интрузии генетически связаны с ферропикритами пильгуярвинской свиты, перекрывающей Продуктивную толщу. В пределах северной оконечности три четверти никеленосных интрузий и Cu-Ni месторождений сосредоточены в пределах так называемого структурного рва, ориентированного поперек общего простирания Печенгской структуры [4]. Продуктивная толща также достигает максимальной толщины в структурном рве.

На первично-магматические особенности строения месторождения наложили существенный отпечаток тектонические нарушения, возникшие на коллизионном этапе. Среди них важную роль играют крутопадающие межпластовые тектонические зоны, к которым приурочено основное количество рудных тел. Всего в Восточном рудном узле Печенгского рудного поля выделяются четыре таких зоны (рис. 5).

Первая (Главная) зона проходит вдоль нижнего контакта материнского интрузива и контролирует

размещение богатых брекчиевидных и сплошных сульфидных руд в Центральном, Западном и Восточном рудных телах. Морфологически Главная зона выражена брекчированием и рассланцеванием оруденелых серпентинизированных перидотитов, местами — оруденелой тектонической брекчией и сплошными сульфидными рудами. Вторая — Верхняя межпластовая тектоническая зона простирается параллельно Главной в 200—500 м выше по разрезу. Она разбивает массив Пильгуярви на два крупных блока: Главный, в низах которого расположены Западное, Центральное и Восточное рудные тела, и Верхний, где с ней непосредственно связаны богатые руды. В пределах Юго-Восточного и Южного рудных тел зона выражена оруденелой тектонической брекчией, реже богатыми брекчиевидными и сплошными сульфидными рудами. Третья межпластовая тектоническая зона проходит параллельно двум первым в 300—400 м выше по разрезу над Юго-Восточным и Южным рудными телами и контролирует локализацию Быстринского месторождения. Четвертая межпластовая тектоническая зона пересечена в самых верхах продуктивной толщи, в 300—400 м от перекрывающих вулканитов. В ее пределах отмечаются только маломощные тела ультраосновных пород с локально проявленным оруденением. Таким образом, рудоносность этих зон уменьшается вверх по разрезу.

Значения петрофизических параметров пород в межпластовых тектонических зонах характеризуются наиболее высокими плотностью, пористостью и коэффициентом AV_p . Высокая плотность

объясняется наличием массивных и брекчиевидных руд в этих зонах, а пористость — тем, что породы интенсивно расланцованы и раздроблены. Высокие значения $KAVp$ (1,29—1,32) подтверждают, что породы в этих зонах формировались при интенсивных пластических деформациях. Богатые брекчиевидные руды, судя по их высокой анизотропии, являются составной частью межпластовых тектонических зон.

Было предпринято несколько попыток обнаружить Cu-Ni руды вдоль простирания Печенгской структуры в поясе Пасвик. Разведочными скважинами было вскрыто несколько габбро-верлитовых тел в нижней части Продуктивной толщи. Тела имеют те же петрологические характеристики, что и пильгуярвинские интрузии, но содержат только следы Ni и Cu.

Этот вывод позволяет связать печенгские Cu-Ni месторождения, подвергшиеся воздействию метаморфизма, с вулканогенно-плутоническими типами и дает новое представление об их положении, окружающей обстановке и происхождении. Обобщение структурных, петрологических, минералогических и геохимических данных позволяет предположить, что на верхних уровнях Cu-Ni рудообразующая система развивалась в два этапа: (1) внедрение мантийных габбро-верлитовых силлов в гетерогенную Продуктивную толщу, их дифференциация и образование магматических Cu-Ni руд; (2) сдвиговые деформации и метаморфизм габбро-верлитовых силлов и отложение ремобилизованных Cu-Ni руд в синметаморфических зонах сдвига [2; 7].

Формирование эпигенетических медно-никелевых рудных зон, связанных с синметаморфическими вторичными сдвиговыми деформациями, произошло в свекофенский тектономагматический цикл в результате переотложения первичных магматических сульфидов (1750 млн лет) [8]. Продуктивная толща по текстурно-структурным особенностям, минеральному составу и генезису руд схожа с теми образованиями, которые встречаются на поверхности, что доказывает выдержанность Cu-Ni минерализации вниз по разрезу не менее чем на 2,5 км.

Южно-Печенгская структурная зона включает рудопоявления Джеваннет (Норвегия), Пороярви, Шуони, Капля, Ансем, Весикьявр, Валунное, Брагинское и др. Наиболее высокие содержания золота (до 3,5 г/т) с повышенными концентрациями As, Sb, Bi установлены в хлорит-карбонатных, биотит-хлорит-карбонатных, углеродисто-карбонатных, углеродисто-хлоритовых и серицит-хлоритовых сланцах. Эта зона испытала преобразования в свекофенский период тектоно-магматической активизации и воздействие различных процессов: катаклаза, милонитизации, метасоматоза, диафореза и др., что определило развитие по всем типам вулканогенно-осадочных пород различных по составу метасоматитов.

В Печенгском районе в пределах Лицевского рудного поля обнаружено около 40 урановых рудопро-

явлений и выделяется пять типов и этапов урановой минерализации: ранняя TR-Th-U (2750—2650 млн лет), U минерализация в альбититовых метасоматитах (2200—2100 млн лет), Th-U в альбит-микроклиновых метасоматитах (1850—1750 млн лет), TR-P-U в терригенных породах венда (900—800 млн лет) и наиболее представительная U минерализация в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах (400—300 млн лет).

Наиболее ранние проявления урановой минерализации связаны с архейскими пегматоидными гранитами. Урановые аномалии участков связаны с кварц-полевошпатовыми жилами в мигматизированных и деформированных биотитовых, гранат-биотитовых и двуслюдяных гнейсах с прослоями амфиболитов. Максимальные содержания урана по двум участкам — до 0,4% и 0,2% соответственно. Температура образования этих гранитов и кварц-полевошпатовых метасоматитов находится в интервале 550—650°C.

Низкотемпературные свинцово-цинковые жилы, залегающие в архейских гнейсах и кристаллических сланцах, приурочены к зоне крупнейших разломов на границе Балтийского щита и шельфа Баренцева моря, а именно к омоложенной Воронья-Колмозерской системе разломов и линеamentу Троллфиорд-Рыбачий-Кильдин, который считается северо-восточной границей Русской плиты. В самом линеamente свинцово-цинковая минерализация обнаружена в неметаморфизованных рифейских песчаниках. Предполагается, что гидротермальная полиметаллическая минерализация в пространстве и во времени ассоциируется с проявлениями мощного рифтогенеза, который предварял и сопровождал формирование шельфовой плиты Баренцева моря, когда Печенгский рудный район находился в режиме пассивной континентальной окраины и испытал глубокопроникающие расколы древней континентальной земной коры. Эта минерализация наиболее близка к гидротермальной сульфидной минерализации, обнаруженной на глубоких горизонтах разреза Кольской сверхглубокой скважины в интервале 6,2—12,2 км. Она тяготеет к пограничной зоне Русской плиты и байкальского рифтогенного прогиба шельфа Баренцева моря.

Золотая минерализация в разрезе Кольской сверхглубокой скважины

В разрезе скважины СГ-3 рудная минерализация установлена на всем интервале в 12 км. В зависимости от сочетаний рудных элементов, форм их нахождения и минеральных парагенезисов в разрезе выделены шесть основных типов рудной минерализации: (1) сульфидная медно-никелевая и платино-металлическая, (2) сульфидная железная, (3) оксидная железная, (4) оксидная железо-титановая, (5) сульфидная медно-цинковая и (6) самородная золотая. Первые четыре типа коррелировали по минеральному составу, вмещающим породам и происхождению

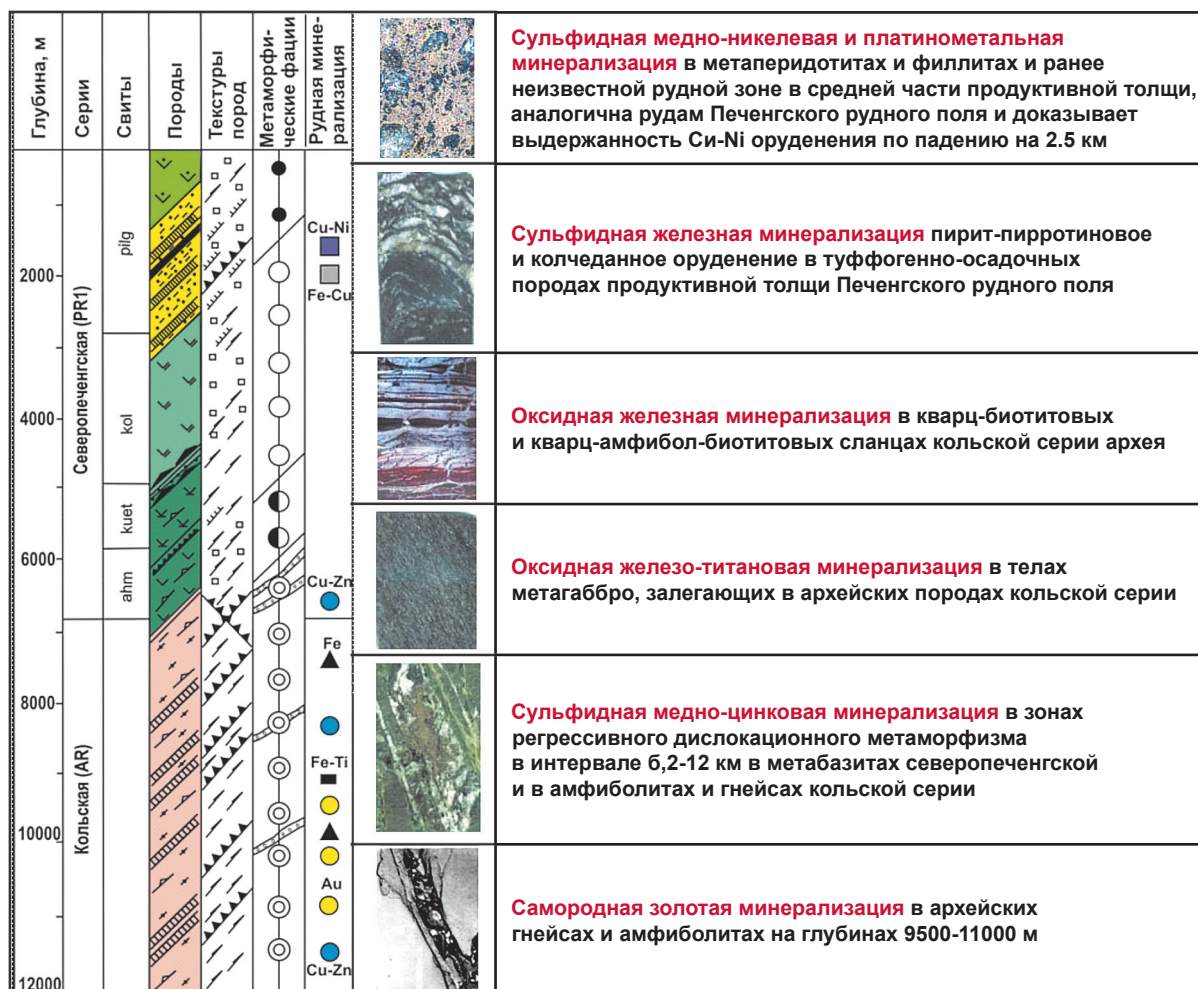


Рис. 6. Вертикальная рудная зональность в разрезе Кольской сверхглубокой скважины [7]

Fig. 6. Vertical ore zonation in the Kola super-deep well section [7]

с рудной минерализацией, расположенной в протерозойской Печенгской структуре и ее архейском обрамлении. Положение последних двух типов осталось неясным (рис. 6) [7].

В связи с обнаружением Au-Ag минерализации в разрезе СГ-3 и на поверхности в породах южно-печенгской серии была установлена генетическая связь между золоторудной минерализацией и магматическими метасоматическими процессами [7].

Неожиданным результатом изучения СГ-3 стало открытие повышенных содержаний золота в интервале 9500—11 000 м, сложенном амфиболитами и гнейсами архейского возраста (2,6—2,8 млрд лет), метаморфизованными в условиях амфиболитовой фации при 500—650°C и 3,5—6 кбар [8]. Оно было обнаружено с помощью нейтронно-активационного анализа и подтверждено результатами минералогических исследований. В интервале 410 м содержания золота превышают 0,1 г/т, а местами достигают 1—6,7 г/т. В шлифах из керна обнаружены мельчайшие выделения самородного золота, представленного (размером до 10 мкм) чешуйками

и зернами неправильной формы в биотите, роговой обманке, плагиоклазе [9]. Иногда чешуйки золота располагаются по спайности биотита. Золото не образует сростаний с другими рудными минералами и содержит до 26% серебра.

Верхняя граница золотоносного интервала совпадает с крупным разломом (интервал 9500—9700 м), который проявлен в кернах скважины резким переходом от пологозалегающих биотит-амфиболитовых гнейсов к крутопадающим железистым кварцитам, горнблэндитам, тальк-тремолит-флогопитовым сланцам и дайкообразному телу среднепротерозойских порфировидных гранитов лицо-арагубского комплекса (1,76 млрд лет) (рис. 7). Золотая минерализация пространственно совпадает с зонами регрессивных изменений, что говорит о ее структурном контроле [9].

Детальные минералогические исследования проводились в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН с помощью сканирующей аналитической электронной микроскопии (микроскоп JSM-5610LV + ЭДС

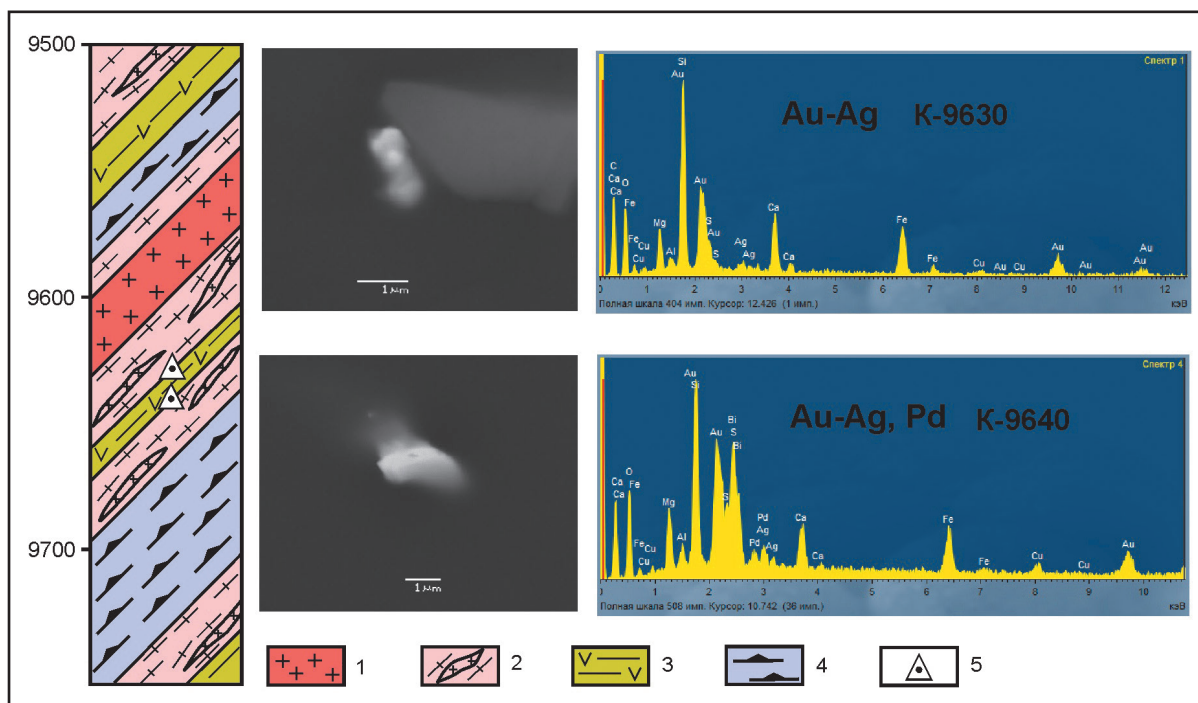


Рис. 7. Сканирующая электронная микроскопия золотой минерализации в зоне глубинного разлома 9500–9700 м: 1 – средне-зернистые граниты, 2 – гнейсы с прослоями мигматитов, 3 – рассланцеванные амфиболиты, 4 – бластокатаклазиты, 5 – образцы керна (K-9630, K-9640)

Fig. 7. Scanning electron microscopy of gold mineralization in the deep fault zone of 9500–9700 m: 1 – medium-grained granites, 2 – gneisses with migmatite interlayers, 3 – schist amphibolites, 4 – blastocataclasites, 5 – core samples (K-9630, K-9640)

INCA-450). Поиск золотосодержащих включений проводился в режиме отраженных электронов.

В образце с глубины K-9630 м обнаружены частицы золота с серебром, палладием и висмутом размером в несколько микрон в ассоциации с халькопиритом в диопсидовой матрице. В образцах с глубины K-10167 м найдены частицы золота размером до 10 мкм с содержанием серебра до 12 масс. %, которые фиксировались по трещинам в роговой обманке. Впервые установлено наличие золота в сульфидах.

На глубоких горизонтах СГ-3 в породах кольской серии зафиксированы проявления регрессивного дислокационного метаморфизма. Обычно это согласные со сланцеватостью зоны (мощностью 10–15 м) катаклаза и трещиноватости гнейсов и амфиболитов, в которых олигоклаз, высокоглиноземистая роговая обманка, биотит, гранат и другие минералы амфиболитовой фации замещаются альбитом, эпидотом, актинолитом, хлоритом, пренитом, серицитом, калишпатом. Судя по минеральным парагенезисам, даже на максимальных глубинах регрессивный метаморфизм происходил при температуре порядка 300°C, отвечающей границе между пренит-пумпеллиитовой и зеленосланцевой фациями. В зоне глубинного разлома вблизи милонитового шва, проходящего по контакту амфиболитов и мигматитов, последние катаклазированы и рассечены тонкими трещинами, выполненными пренитом, вторичным кварцем, карбонатом, хлоритом, серицитом.

Измененные мигматиты содержат вкрапленность халькопирита.

Сопоставление золоторудной минерализации в зонах дислокационного метаморфизма с данными по поверхности в Южно-Печенгской структуре показало возможность ее формирования в диапазоне от 1842 ± 9 до 1928 ± 12 млн лет по Rb/Sr геохронометру [10].

Вопрос о положении золотого оруденения в разрезе СГ-3 в общей последовательности эндогенных процессов остается открытым. Возможны три варианта: (1) перераспределение золота при метаморфизме за счет первичных концентраций во вмещающих породах, (2) избирательное осаждение на периферии зон регрессивных изменений и гидротермальной сульфидной минерализации, (3) отложение из восстановительных флюидов глубинного происхождения.

Малосульфидное платинометалльное оруденение в дифференцированных интрузивах Печенгского рудного поля

Хотя Печенгский рудный район принадлежит к числу наиболее изученных территорий северо-восточной части Балтийского щита, где в течение 50 лет разрабатываются крупные сульфидные медно-никелевые месторождения, приуроченные к раннепротерозойским габбро-верлитовым интрузивам, детальное изучение малосульфидной минерализа-

ции в габброидных частях этих расслоенных массивов с особым вниманием к платинометалльному оруденению ранее не проводилось.

Как отмечалось выше, на основе разработанной интегральной геодинамической модели глубинного строения Печенгский рудный район трактуется как горизонтальное сечение мантийной рудообразующей системы центрального типа. Согласно той же модели богатые сульфидные руды Печенгского рудного поля образовались на коллизионном этапе развития карелид и контролируются зонами рассланцевания пород Продуктивной толщи. Эти зоны обладают максимальной анизотропией по упругим свойствам.

Сопоставление структурно-петрологических и петрофизических данных для таких зон межпластовых разрывных нарушений в разрезе СГ-3 и на поверхности в пределах Восточного рудного узла Печенгского рудного поля позволило проследить все четыре зоны и приуроченные к ним интрузивы и эпигенетические руды до глубины 2,5 км (рис. 8). Такая выдержанная по простиранию протяженность рудных тел объясняется исходным горизонтальным залеганием никеленосных основных-ультраосновных силлов, что является аналогичным залеганию габбро-верлитовых дифференцированных интрузивов в Норильском рудном районе [5].

Дальнейшее преобразование никеленосных дифференцированных габбро-верлитовых интрузивов Печенгского рудного поля с последующей их деформацией в обстановке сжатия и чешуйчатых перемещений тектонических блоков по зонам межпластовых разрывных нарушений происходило в условиях метаморфизма зеленосланцевой фации ($T = 350\text{—}450^\circ\text{C}$, $P = 0,2\text{—}0,3$ МПа) с ремобилизацией рудного вещества. Об этом свидетельствуют: (1) тектонический характер контактов большинства габбро-верлитовых интрузивов как со стороны лежащего и висячего бока, так и по простиранию; (2) наклонное залегание первичной расслоенности интрузивов, границ вкрапленных руд и слоистости вмещающих осадочных пород; (3) отсутствие прямой корреляции между мощностью интрузивов и мощностью сульфидных медно-никелевых руд; (4) более интенсивное развитие в продуктивной толще согласных зон рассланцевания по сравнению с другими свитами; (5) максимальные значения коэффициента объемной анизотропии V_p в согласных зонах рассланцевания и богатых эпигенетических брекчиевидных сульфидных медно-никелевых рудах.

Таким образом, этот рудный район с никеленосными дифференцированными интрузивами Печенгского рудного поля по своему формированию является палеоаналогом Норильского рудного района, но претерпевшим тектоно-метаморфические преобразования. В Норильском районе выявлены горизонты малосульфидного платинометалльного оруденения в габбро-верлитовых расслоенных интрузивах с высоким содержанием платиноидов, представляющих

собой самостоятельный тип магматических рудных месторождений. Это и обуславливает необходимость поиска и детального изучения данного типа оруденения в Печенгском рудном поле.

Габброидная часть Пильгуярвинского массива была исследована скважинами в интервале от поверхности до 1000 м. Установлено, что в габбровой части дифференцированных интрузивов месторождений имеется бедная малосульфидная минерализация с содержанием платиноидов от 0,005 до 0,01 г/т, что имеет меньшие значения, чем в богатых медно-никелевых рудах Печенгского рудного поля и в габбро норильских интрузивов. При этом в данной части интрузивов было обнаружено повышенное содержание золота до 0,2 г/т.

В сульфидных медно-никелевых рудах Печенгского рудного поля основные черты их платиноносности определяются специфическими особенностями поведения платиновых металлов на магматическом и гидротермально-метаморфическом этапах рудообразования. Всего выделено восемь этапов формирования и преобразования медно-никелевых руд в интервале от 2000 до 340 млн лет. Важным доказательством многоэтапности рудоотложения наряду с текстурно-парагенетическими признаками служат вариации равновесного распределения никеля в сосуществующих сульфидах [11].

Распределение платиновых металлов отражает их накопление при увеличении общей сульфидонасыщенности во всех типах руд с сохранившимися чертами первичной магматической природы. При метаморфическом преобразовании первичных руд наблюдается локально незакономерное перераспределение платиновых металлов и нарушение пропорциональности накопления цветных и благородных металлов. Ведущий тип состояний платиновых металлов в рудах — это сульфоарсениды никеля и кобальта ряда кобальтин — герсдорфит, содержащие платину, родий, иридий и осмий с неравномерным их распределением между отдельными метакристаллами. Отмечено присутствие платиновых металлов в некоторых редких сульфидах (шандит) и арсенидах (маухерит) (рис. 9). Типоморфные для сульфидных медно-никелевых месторождений минералы платиновых металлов — интерметаллиды, теллуриды, теллуrowисмутиды, арсениды и др. — встречены в месторождениях Восточного рудного узла Печенги.

Формирование платиноносных сульфоарсенидов происходит за счет освобождения платиноидов из твердых растворов в магматических сульфидах при их метаморфическом переотложении.

Температурные условия стабильности платиноносных сульфоарсенидов оценены по устойчивости сосуществующей гидротермально-метаморфической ассоциации тальк-тремолит-кальцит. Относительно низкая растворимость платиновых металлов в сульфоарсенидах никеля и кобальта связывается с их формированием в условиях зеленосланцевой

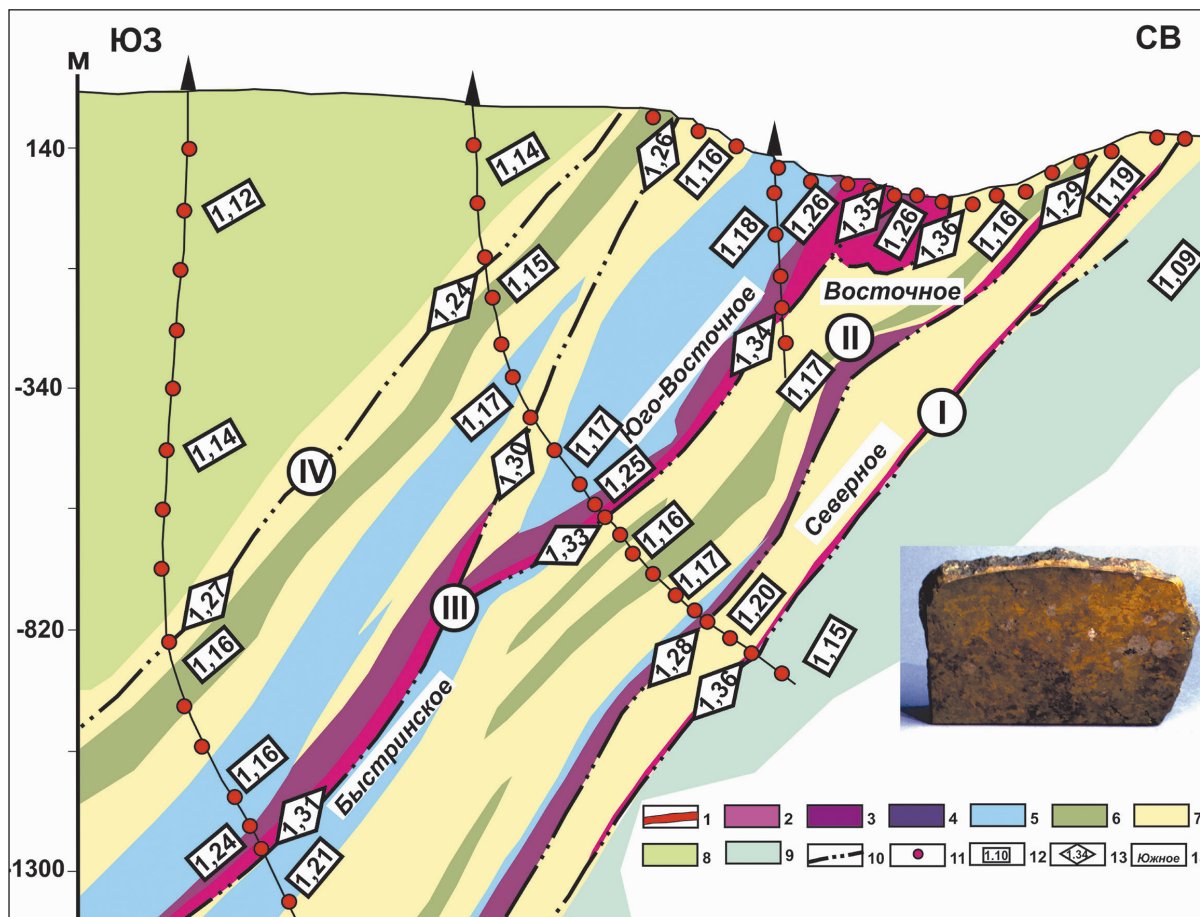


Рис. 8. Петрофизическая схема по профилю через Восточный рудный узел Печенгского рудного поля [5; 11]: 1 – эпигенетические брекчиевидные, сплошные и богатые вкрапленные сульфидные медно-никелевые руды, 2 – вкрапленные руды в серпентинизированных перидотитах, 3 – перидотиты, 4 – пироксениты, 5 – габбро, 6 – габбро-диабазы, 7 – породы Продуктивной туфогенно-осадочной толщи, 8 – вулканогенные породы пильгуйярвинской свиты, 9 – вулканогенные породы колосйокской свиты, 10 – межпластовые синметаморфические тектонические зоны (I–IV), 11 – места отбора ориентированных образцов и участки детальных структурно-петрофизических исследований; 12–13 – средние значения KAVp для пород: 12 – тектонических блоков, 13 – межпластовых тектонических зон; 14 – рудные тела сульфидных медно-никелевых руд

Fig. 8. Petrophysical scheme along the profile through the Eastern ore cluster of the Pechenga ore field [5; 11]: 1 – epigenetic brecciated, solid and rich disseminated sulfide copper-nickel ores, 2 – disseminated ores in serpentinized peridotites, 3 – peridotites, 4 – pyroxenites, 5 – gabbros, 6 – gabbro-diabase, 7 – rocks of the Productive tuffaceous-sedimentary strata, 8 – igneous rocks of the Pilgjarvi suite, 9 – igneous rocks of the Kolosjoki suite, 10 – interlayer synmetamorphic tectonic zones (I–IV), 11 – oriented sampling sites and areas of detailed structural-petrophysical studies; 12–13 – average KAVp values for rocks: 12 – for tectonic blocks, 13 – for interlayer tectonic zones; 14 – ore bodies of sulfide copper-nickel ores

метаморфизма, который претерпели дифференцированные габбро-верлитовые интрузии Печенгского рудного поля.

Выводы

Рудообразующие системы Печенгского рудного района (арктическая зона России) известны крупными месторождениями медно-никелевых руд и месторождений и рудопроявлений Pt, U, Au, Pb, Zn. Существуют три совмещенные системы: ЭПГ плутонические, Cu-Ni вулканогенно-плутонические и U флюидно-метасоматические руды, которые были сформированы при различных геотектонических условиях в карельском и свекофенском (2,4–1,6 млрд лет) циклах. Процессы тектономагматиче-

ской активизации, обусловленные формированием шельфа Баренцева моря, привели к трансформации этих рудных месторождений и формированию гидротермальной Pb-Zn минерализации, Au-Ag минерализации в СГ-3 и в южнопеченгской структурной зоне.

Согласно интегральной геодинамической модели Печенгского рудного района никеленосные габбро-верлитовые интрузии в основном формировались как силлы и занимали субгоризонтальное положение, как и рудоносные интрузивы Норильского района. Руды Печенгского рудного района образовались на стадии коллизионного развития свекофенского цикла и контролировались сдвиговыми зонами в Продуктивной толще.

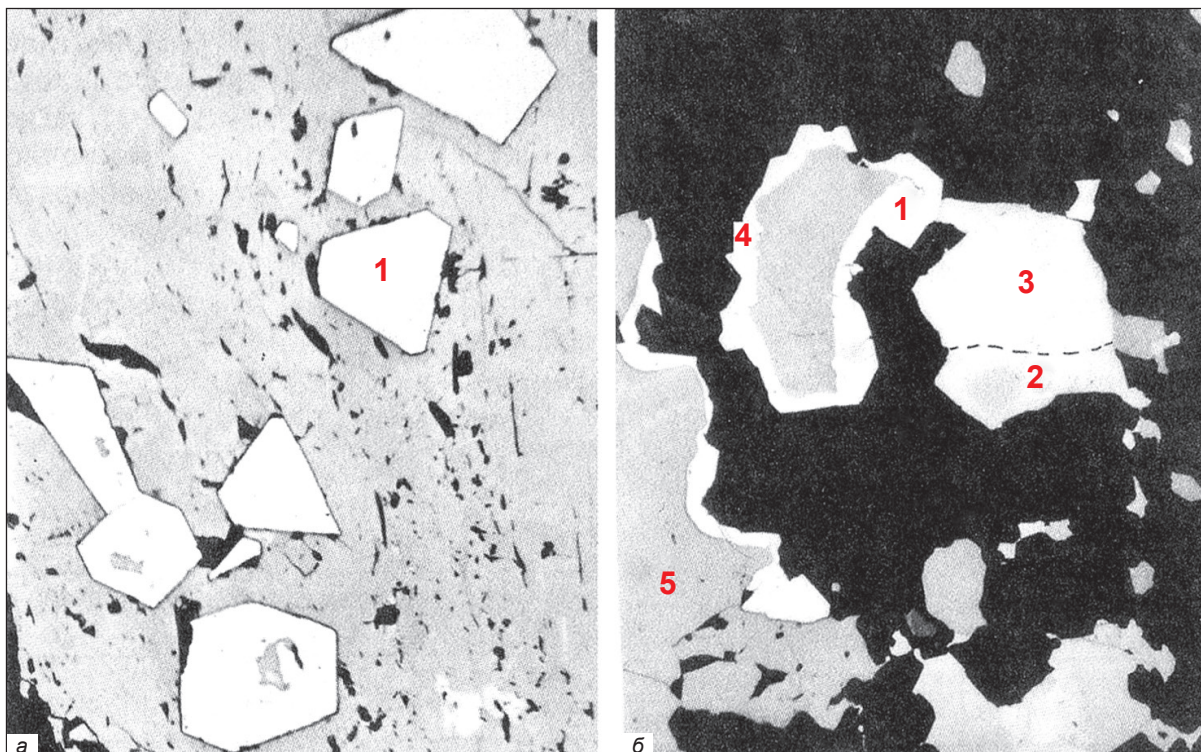


Рис. 9. Морфология выделений никелистого кобальтина (а1), никелина (б2) и маухерита (б3) в рудах Печенги. Основная масса — пирротин (серое) и силикат (черное) [11]
 Fig. 9. The morphology of nickel cobaltite (a1), niccolite (b2) and maucherite (b3) precipitates in Pechenga ores. The bulk of pyrrhotite (gray) and silicate (black) [11]

Эпигенетические Cu-Ni руды находятся во вторичных сдвиговых зонах, гидротермальные руды U и Au — в свекофенской области тектономагматической активации Фенноскандинавского щита.

В течение многих лет главное внимание в Печенгском рудном районе уделялось месторождениям сульфидных медно-никелевых руд, образовавшимся в течение карельского цикла. Принципиальную новизну исследований по проекту определяет то обстоятельство, что в Печенгском рудном поле тип малосульфидного платинометалльного оруденения до сих пор детально не изучался и горизонты его распространения в пределах разрабатываемых никеленосных интрузивов не определялись, хотя проводилось изучение платиновых минералов в богатых медно-никелевых рудах.

Опыт изучения месторождений в Норильском рудном районе показал, что формирование этого типа оруденения, локализованного в критических зонах интрузивов, связано с аномальным строением и специфическим составом рудовмещающих габброидов и обусловлено эволюцией единой рудно-магматической системы.

Проведенные в Печенгском рудном районе исследования с использованием данных по СГ-3 и поверхности на месторождениях Печенгского рудного поля, с детальной структурно-петрологической, минералогической, геохимической и петрофизической характеристикой особенностей формирования малосульфид-

ного платинометалльного оруденения в дифференцированных габбро-верлитовых интрузивах показали, что эти месторождения не имеют полных аналогов с месторождениями Норильского рудного района.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-70001.

Литература

1. Казанский В. И., Кузнецов О. Л., Кузнецов А. В. и др. Глубинное строение и геодинамика Печенгского рудного района: опыт исследования Кольской сверхглубокой скважины // Геология руд. месторождений. — 1994. — Т. 36, № 6. — С. 500—519.
2. Лобанов К. В., Казанский В. И., Кузнецов А. В., Жариков А. В. Интегральная геодинамическая модель Печенгского рудного района на основе корреляции геологических, петрологических и петрофизических данных по Кольской сверхглубокой скважине и опорному профилю на поверхности // Современные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии / ИГЕМ РАН. — М., 2010. — С. 258—300.
3. Kazansky V. I., Lobanov K. V., Isanina E. V., Sharov N. V. The Paleoproterozoic Pechenga Cu-Ni ore field (Fennoscandian Shield): a fault-bound volcanic center // Izvestiya Earth Sciences section Russian academy of Natural Sciences 33 International Geological Congress. — 2008. — № 17: Special Iss. — P. 43—46.

4. Lobanov K. V., Kazansky V. I. The mantle-crustal ore-forming Cu-Ni system of the Pechenga ore district (Fennoscandia shield) // Proceedings of 6 European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems EUREGEO. — 2009. — Vol. 2. — P. 201—205.
5. Казанский В. И., Лобанов К. В. Структурно-геофизическая позиция, глубинное строение и условия локализации уникального Печенгского рудного поля (Балтийский щит) // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования / ИГЕМ РАН. — М., 2004. — С. 187—205.
6. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н. В. Шарова, Ф. П. Митрофанова, М. Л. Вербы, К. Гиллена. — Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2005. — 318 с.
7. Лобанов К. В., Казанский В. И., Чичеров М. В. Золотая минерализация в разрезе Кольской сверхглубокой скважины и на поверхности в Печенгском рудном районе // Материалы международной конференции «Золото Фенноскандинавского щита». Петрозаводск 1—5.10.2013 / Карел. НЦ РАН. — Петрозаводск, 2013. — С. 121—125.
8. Козловский Е. А., Губерман Д. М., Казанский В. И. Рудоносность глубинных зон древней континентальной земной коры (по материалам Кольской сверхглубокой скважины) // Совет. геология. — 1988. — № 9. — С. 3—11.
9. Казанский В. И., Новгородова М. И., Смирнов Ю. П., Боронихин В. А. Необычные минеральные ассоциации на нижних горизонтах Кольской сверхглубокой скважины // Геология руд. месторождений. — 1989. — Т. 31, № 6. — С. 75—82.
10. Калинин А. А., Баянова Т. Б., Лялина Л. М. и др. Проявления золота Южно-Печенгской структурной зоны: новые изотопно-геохимические данные // Материалы Всероссийской (с международным участием) конференции «Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах» / КНЦ РАН. — Апатиты, 2013. — С. 69—71.
11. Горбунов Г. Н., Астафьев Ю. А., Гончаров Ю. В. и др. Медно-никелевые месторождения Печенги / Отв. ред. Н. П. Лаверов. — М.: ГЕОС, 1999. — 236 с.

Информация об авторах

Лобанов Константин Валентинович, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: lobanov@igem.ru.

Чичеров Михаил Владимирович, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: chicher@igem.ru.

Шаров Николай Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (185910, Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: sharov@krc.karelia.ru.

Чижова Ирина Александровна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tchijova@igem.ru.

Горностаева Татьяна Александровна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tagorn@igem.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Лобанов К. В., Чичеров М. В., Чижова И. А. и др. Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (Арктическая зона России) // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 107—122. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-107-122.

DEPTH STRUCTURE AND ORE-FORMING SYSTEMS OF THE PECHENGA ORE REGION (RUSSIAN ARCTIC ZONE)

Lobanov K. V., Chicherov M. V., Chizhova I. A., Gornostaeva T. A.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (Moscow, Russian Federation)

Sharov N. V.

Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

The article was received on February 26, 2019

Abstract

The integral depth model of the Pechenga ore region was created via computer simulation on the basis of the results of geophysical studies and ultra-deep drilling. The integral depth model simulates the Pechenga ore region as a horizontal section of a mantle volcano-plutonic ore-forming system of the central type. The model defines the North wing of the Pechenga structure as a volcanic caldera fragment, and its southern part describes as a scaly monocline, combined with the domes of rheomorphic granitoids. Subsequently, they underwent intense compression and metamorphism. Then, in conditions of stretching, steeply dipping zones of cataclasites and retrograde metamorphism were formed. Thus, the Pechenga Cu-Ni deposit can be referred to the volcano-plutonic type and the corresponding ore-forming system of the mantle-crust type.

Using geophysical methods, the Vp/Vs anomaly at a depth of 20–25 km and the rise of the Moho boundary, reaching a maximum height of 34 km under the Pechenga structure, were identified. This can be interpreted as a relic mantle plume that determined geological events in the Paleoproterozoic.

The compilation of structural, petrological, mineralogical and geochemical data suggests that at the upper levels of the Cu-Ni ore-forming system was evolving in two stages: 1) the introduction mantle gabbro-wehrlite sills in heterogeneous Productive strata, their differentiation and the formation of magmatic Cu-Ni ores; 2) shear deformations and metamorphism of gabbro-wehrlite sills and the deposition of remobilized Cu-Ni ores in the synmetamorphic shear zones.

Drilling and studies of the SG-3 well have proven high saturation of the Precambrian crust with a variety of ore mineralization cross the whole section, including gold ore one in the range of 9800–11000 meters. The gold mineralization spatially coincides with the zones of regressive changes, which indicates its structural control. The question of the gold mineralization position in the SG-3 section in the overall sequence of endogenous processes remains debatable.

Based on the integral geodynamic model of the deep structure of the Pechenga ore region, a new interpretation of the deposits' localization is proposed. According to these views, the Pechenga ore field with nickel-bearing intrusions is a paleo-analogue of the Norilsk ore region, but has undergone intensive tectonic-metamorphic transformations. Given that the horizons of low-sulfide PGE mineralization in gabbro-wehrlite stratified intrusions were identified in the Norilsk area, an attempt was made to study the same mineralization in the Pechenga ore region.

Keywords: *The Arctic zone, the Pechenga ore region, copper-nickel deposits, gold mineralization, platinum group metals, Kola super-deep well, seismic studies.*

The work was done with the financial support of the RFBR project No. 18-05-70001 and Program No. 55 of the Presidium of the Russian Academy of Sciences "The Arctic — the scientific foundations of new technologies for development, preservation and development".

References

1. Kazanskii V. I., Kuznetsov O. L., Kuznetsov A. V. *et al.* Glubinnoe stroenie i geodinamika Pechenskogo rudnogo raiona: opyt issledovaniya Kol'skoi sverkhglubokoi skvazhiny. [Deep structure and geodynamics of the Pechenga ore district: the experience of study of the Kola superdeep borehole]. *Geologiya rud. mestorozhdenii*, 1994, vol. 36, no. 6, pp. 500—519. (In Russian).
2. Lobanov K. V., Kazanskii V. I., Kuznetsov A. V., Zharikov A. V. Integral'naya geodinamicheskaya model' Pechenskogo rudnogo raiona na osnove korrelyatsii geologicheskikh, petrologicheskikh i petrofizicheskikh daniykh po Kol'skoi sverkhglubokoi skvazhine i opornomu profilu na poverkhnosti. [Integrated geodynamic model of Pechenga ore region on the basis of correlation of geological, petrological and petrophysical data on Kola superdeep borehole and reference profile on the surface]. *Sovremennye problemy rudnoi geologii, petrologii, mineralogii i geokhimii*. IGEM RAN. Moscow, 2010, pp. 258—300. (In Russian).

3. Kazansky V. I., Lobanov K. V., Isanina E. V., Sharov N. V. The Paleoproterozoic Pechenga Cu-Ni ore field (Fennoscandian Shield): a fault-bound volcanic center. *Izvestiya Earth Sciences section Russian academy of Natural Sciences 33 International Geological Congress*, 2008, no. 17: Special Iss., pp. 43—46.
4. Lobanov K. V., Kazansky V. I. The mantle-crustal ore-forming Cu-Ni system of the Pechenga ore district (Fennoscandian shield). *Proceedings of 6 European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems EUREGEO*, 2009, vol. 2, pp. 201—205.
5. Kazanskii V. I., Lobanov K. V. Strukturno-geofizicheskaya pozitsiya, glubinnoe stroenie i usloviya lokalizatsii unikal'nogo Pechengskogo rudnogo polya (Baltiiskii shchit). [Structural and geophysical position, deep structure and localization conditions of the unique Pechenga ore field (Baltic shield)]. *Krupnye i superkrupnye mestorozhdeniya: zakonomernosti razmeshcheniya i usloviya obrazovaniya*. IGEM RAN. Moscow, 2004, pp. 187—205. (In Russian).
6. Stroenie litosfery rossiiskoi chasti Barents-regiona. [Structure of the lithosphere of the Russian part of the Barents region]. Pod red. N. V. Sharova, F. P. Mitrofanova, M. L. Verby, K. Gillena. Moscow, Petrozavodsk: Karel. nauch. tsentr RAN, 2005, 318 p. (In Russian).
7. Lobanov K. V., Kazanskii V. I., Chicherov M. V. Zolotaya mineralizatsiya v razreze Kol'skoi sverkhglubokoi skvazhiny i na poverkhnosti v Pechengskom rudnom raione. [Gold mineralization in the section of the Kola superdeep borehole and on the surface of the Pechenga ore district]. *Materialy mezhdunarodnoi konfer-*

- entsii "Zoloto Fennoskandinavskogo shchita"*. Petrozavodsk 1—5.10.2013. Karel. NTs RAN. Petrozavodsk, 2013, pp. 121—125. (In Russian).
8. Kozlovskii E. A., Guberman D. M., Kazanskii V. I. Rudonosnost' glubinnykh zon drevnei kontinental'noi zemnoi kory (po materialam Kol'skoi sverkhglubokoi skvazhiny). [The orebearing of the deep zones of the ancient continental crust (based on the materials of the Kola superdeep borehole)]. *Sovet. geologiya*, 1988, no. 9, pp. 3—11. (In Russian).
9. Kazanskii V. I., Novgorodova M. I., Smirnov Yu. P., Boronikhin V. A. Neobychnye mineral'nye assotsiatsii na nizhnikh gorizontakh Kol'skoi sverkhglubokoi skvazhiny. [Unusual mineral associations on the lower horizons of the Kola superdeep borehole]. *Geologiya rud. mestorozhdenii*, 1989, vol. 31, no. 6, pp. 75—82. (In Russian).
10. Kalinin A. A., Bayanova T. B., Lyalina L. M., Serov P. A., Elizarov D. V. Proyavleniya zolota Yuzhno-Pechengskoi strukturnoi zony: novye izotopno-geokhimicheskie dannye. [Manifestations of gold in the South Pechenga structural zone: new isotope-geochemical data]. *Materialy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) konferentsii "Geologiya i geokhronologiya porodoobrazuyushchikh i rudnykh protsessov v kristallicheskiykh shchitakh"*. KNTs RAN. Apatity, 2013, pp. 69—71. (In Russian).
11. Gorbunov G. N., Astaf'ev Yu. A., Goncharov Yu. V., Korchagin A. U., Neradovskii Yu. N., Smol'kin V. F., Sokolov S. V., Sharov N. V., Yakovlev Yu. N. Medno-nikelevye mestorozhdeniya Pechengi. [Copper-nickel deposits of the Pechenga]. *Otv. red. N. P. Laverov*. Moscow, GEOS, 1999, 236 p. (In Russian).

Information about the authors

Lobanov Konstantin Valentinovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Corresponding Member of RAS, Chief Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: lobanov@igem.ru.

Chicherov Mikhail Vladimirovich, Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: chicher@igem.ru.

Sharov Nikolay Vladimirovich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Geophysics Laboratory, Federal Research Centre, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences Institute of Geology (11, Pushkinskaya St., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia, 185910), e-mail: sharov@krc.karelia.ru.

Chizhova Irina Alexandrovna, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tchijova@igem.ru.

Gornostaeva Tatiana Alexandrovna, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetny per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tagorn@igem.ru.

Bibliographic description

Lobanov K. V., Chicherov M. V., Chizhova I. A., Gornostaeva T. A., Sharov N. V. Depth structure and ore-forming systems of the Pechenga ore region (Russian Arctic Zone). *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 3 (35), pp. 107—122. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-107-122. (In Russian).

© Lobanov K. V., Chicherov M. V., Chizhova I. A., Gornostaeva T. A., Sharov N. V., 2019