

Размещение полиметаллических месторождений и глубинное строение земной коры Карело-Кольского региона

Галямов А.Л. , Волков А.В. , Лобанов К.В. 

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, alg@igem.ru

Аннотация. Рассмотрены закономерности размещения полиметаллических месторождений и их рудообразующих систем в Карело-Кольском регионе Балтийского щита в свете глобальной геофизической модели земной коры. В результате исследований выявлено, что позднеархейские зеленокаменные пояса (магматическая ультрабазитовая рудообразующая система с медно-никелевыми и другими месторождениями), в целом, приурочены к утоненной верхней коре. А месторождения колчеданно-полиметаллической и порфировой рудообразующих систем контролируются участками утолщения нижнего слоя и, соответствующего увеличения мощности земной коры.

Ключевые слова: Карелия, Кольский, медь, свинец, цинк, месторождение, модель земной коры, тектоно-магматическая активизация.

Location of polymetallic deposits and deep structure of the earth's crust in the Karelian-Kola region

Galyamov A.L. , Volkov A.V. , Lobanov K.V. 

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, alg@igem.ru

Abstract. The distribution regularities of polymetallic deposits and their ore-forming systems in the Karelian-Kola region of the Baltic Shield are considered in the light of the global geophysical model of the earth's crust. As a result of research, it was revealed that the Late Archean greenstone belts (magmatic ultrabasic ore-forming system with copper-nickel and other deposits), in general, are confined to the thinned upper crust. The deposits of pyrite-polymetallic and porphyry ore-forming systems are controlled by thickened lower crust layer and corresponding increase in the total thickness of the Earth's crust.

Keywords: Karelia, Kola, copper, lead, zinc, deposit, model of the earth's crust, tectonic-magmatic activation.

Введение

С докембрийскими толщами связан разнообразный комплекс полезных ископаемых: железных, марганцевых, хромовых, сульфидных никелевых, кобальтовых, медных, свинцово-цинковых и урановых руд. В докембрийских комплексах известны богатейшие залежи железистых кварцитов и джеспилитов. С докембрием связаны также месторождения алюминиевого сырья и марганцевых руд (Индия). Докембрийские конгломераты Витватерсранда вмещают крупнейшие месторождения золота, а многочисленные интрузии основных и ультраосновных пород в докембрийских щитах – крупные месторождения хрома, меди, никеля, кобальта и платиноидов.

Полиметаллические месторождения представлены стратифицированными медными и свинцово-цинковыми месторождениями. Минеральные системы, ответственные за их формирование функционировали во внутриплитных, конвергентных континентально-окраинных и задуговых рифтовых условиях.

Большинство полиметаллических месторождений в докембрийских карбонатных породах (MVT) обычно не отличаются большими ресурсами, но среди них известны единичные крупные месторождения – Брокен-Хилл, Маунт-Айза в Австралии, канадский Пайн-Пойнт, Горевское и Холднинское в России и др. (рис. 1).

В соседних с Карело-Кольским регионом странах – Финляндии, Швеции и Норвегии полиметаллические месторождения представлены, в основном, медно-никелевыми рудами, связанными

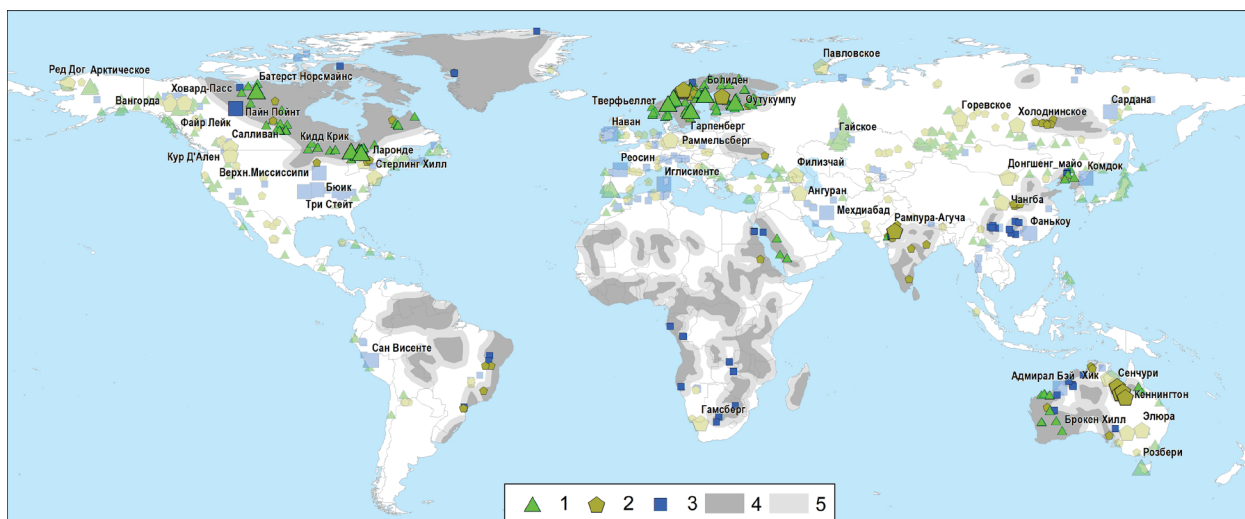


Рис. 1. Полиметаллические месторождения на древних щитах и в их обрамлении 200 км.

1–3 – месторождения: 1 – колчеданные в вулканогенных комплексах (VMS); 2 – колчеданные в терригенных и терригенно-карбонатных комплексах (SEDEX); 3 – полиметаллические в карбонатных комплексах (MVT); 4 – докембрийские выступы и 5 – их обрамление 200 км.

Fig. 1. The polymetallic deposits in the precambrian shields interior and their framing 200 km.

1–3 – ore deposits: 1 – VMS; 2 – SEDEX; 3 – MVT; 4 – Precambrian shields and 5 – their framing 200 km.

с расслоенными базитовыми интрузиями, колчеданными вулканогенными (VMS) и реже – колчеданными в углеродсодержащих терригенных комплексах (SEDEX).

В Финляндии и Швеции полиметаллические месторождения известны в протерозойских вулканогенных комплексах на архейском фундаменте, в полях развития раннесвекофенских гранитоидов. Колчеданные вулканогенные руды слагают разрабатываемые крупные месторождения Оутукумпу и Виханти, а также средние и малые месторождения: Хавери, Пахтавуома, Рииконски, Пихасалми, Савиа и др. По добыче меди и цинка Финляндия занимает одно из ведущих мест в Европе.

В рейтинге стран основных производителей свинца и цинка Швеция располагается после Китая, Австралии, США, Перу, Канады и Мексики. Основные разрабатываемые объекты – месторождения рудного района Болиден, а также месторождение Гарпенберг в рудном районе Бергслаген, на юге страны.

Наиболее значительные месторождения медно-колчеданных руд (VMS) Норвегии связаны с каледонскими вулканогенными формациями, экономическое значение имеют месторождения Льоккен, Тверфьеллет, Фосдален среди нескольких десятков средних объектов. Свинцово-цинковая минерализация в стране приурочена к песчаникам докембрийского и нижнекембрийского возраста и прослеживается вдоль восточного фаса каледонид. Здесь известны месторождения стратифицированных массивных сульфидных руд SEDEX типа, из которых наиболее крупные – разрабатываемые объекты Блейквассли и Муфьеллет, а также менее крупные – Сельели, Бьорнфелль, Фуглстранд, Гримсдален и др.

В России докембрийские щиты также характеризуются существенными рудообразующими ресурсами полиметаллов, размеры которых прямо связаны со степенью геологической изученности и опосредованности регионов. Кроме Балтийского щита (месторождения Западно-Рыбозеро, Корбозеро, Линдолампи, Маимярви, Войтское, Каиноя и др), в стране имеются Воронежский, Анабарский и Алданский щиты (Бурпала, Право-Ингамакитское и др), а также множество выступов (глыб) архей-протерозойского фундамента, где с метаморфизованными вулканогенными комплексами связаны колчеданные стратиформные проявления меди, свинца и цинка.

Колчеданные месторождения российской части Фенноскандинавского щита приурочены преимущественно к архейским зеленокаменным поясам Карелии. Руды по содержаниям Cu, Pb, Zn

не являются значимыми, вместе с тем характеризуют потенциальную перспективность выявления промышленного колчеданного оруденения Карельского региона (Иващенко и др., 2009). Такие месторождения пока известны только в пределах архейской Карельской гранит-зеленокаменной области (Хаутаваарское, Соанварское, Парандовское и др.).

Цель работы заключалась в изучении пространственных соотношений полиметаллических руд и особенностей глубинного строения рудовмещающих блоков земной коры в Карело-Кольском регионе для оценки перспектив выявления промышленно значимых месторождений.

Современные прогнозно-металлогенические исследования на основе космических технологий невозможны без анализа материалов дистанционного зондирования Земли, геологических, геотектонических, геохимических и других пространственных материалов, а также сведений по геологии месторождений полезных ископаемых (Волков и др., 2020).

В настоящей работе использовалась глобальная геофизическая модель земной коры CRUST1.0, составленная по результатам дистанционных гравитационных измерений из космоса в рамках проекта GOCE. Кроме того, применялись модели глубины поверхности Мохо, модель CRUST1.0 (Bassin et al., 2000; Bouman et al., 2015), модель плотности и термального режима верхней мантии (Cammarano et al., 2017).

Рудообразующие системы и полиметаллические месторождения Карело-Кольского региона

В структуре Балтийского щита выделяется Карело-Кольский домен, тектоно-магматическая активность которого известна с середины архея до конца палеопротерозоя (Кратц, 1963). В эти периоды формировались архейские тоналит-трондьемит-гранодиоритовые ассоциации, зеленокаменные пояса (Ранний докембрий, 2005) и накапливались палеопротерозойские рифтовые, островодужные и протоплатформенные комплексы.

Особенности металлогении зеленокаменных поясов лопийского цикла проявлены в преимущественно простом составе колчеданных руд, метаморфогенном характере преобразования вулканогенных колчеданных руд (Голубев и др., 2007). Колчеданные руды карельского цикла залегают в углеродсодержащих сланцах, а источниками металлов и серы колчеданных месторождений считаются вулканические и поствулканические процессы (Голубев, 2005).

Формирование месторождений определялось существованием разномасштабных минеральных (рудообразующих) систем. На территории Балтийского щита, как и на всей территории России, выделяются наиболее распространенные в мире эндогенные рудообразующие системы, как источники высокотехнологичных критических металлов (Бортников и др., 2016; Волков и др., 2022). Системы по характеру структуры и состава вмещающих комплексов и связи с интрузивным магматизмом можно объединить в две группы.

К первой относятся стратифицированные, служившие базовой средой рудоотложения, где действовали архейские, раннепротерозойские и рифейские системы: 1) колчеданно-вулканогенная и осадочно-вулканогенная (Cu-Zn и Cu-Zn-Pb месторождения) развивавшиеся в пределах островных вулканических поясов и сопряженных с ними рифтогенных прогибов и 2) осадочных бассейнов (миссисипский тип Zn-Pb-Ag, медистые песчаники (Cu-Co-Ag), несогласий (U), долинный (U) и др.), развивавшаяся в условиях платформ, их пассивных окраин и рифтогенеза. К этой же группе относится 3) магматическая базитовая и ультрабазитовая система (Cu-Ni-MPG и Fe-Cr месторождения в расслоенных основных и ультраосновных массивах). Это одна из наиболее крупных систем, связанная с расслоенными интрузиями в областях внутриплитного магматизма.

Вторая группа представлена интрузивными рудообразующими системами, действовавшими в периоды лопийского, карельского и рифейского циклов тектоно-магматической активности (ТМА). В состав этих систем входят: 4) скарново-порфировая и порфирово-эпитермальная (Cu-Mo-Au-порфировые, Pb-Zn-Ag и Au-Ag эпитермальные и Pb-Zn-Cu, Fe-Cu-Au скарновые месторождения); 5) орогенная, включая связанные с с восстановленными гранитоидами (Au-Bi, Sn-W,

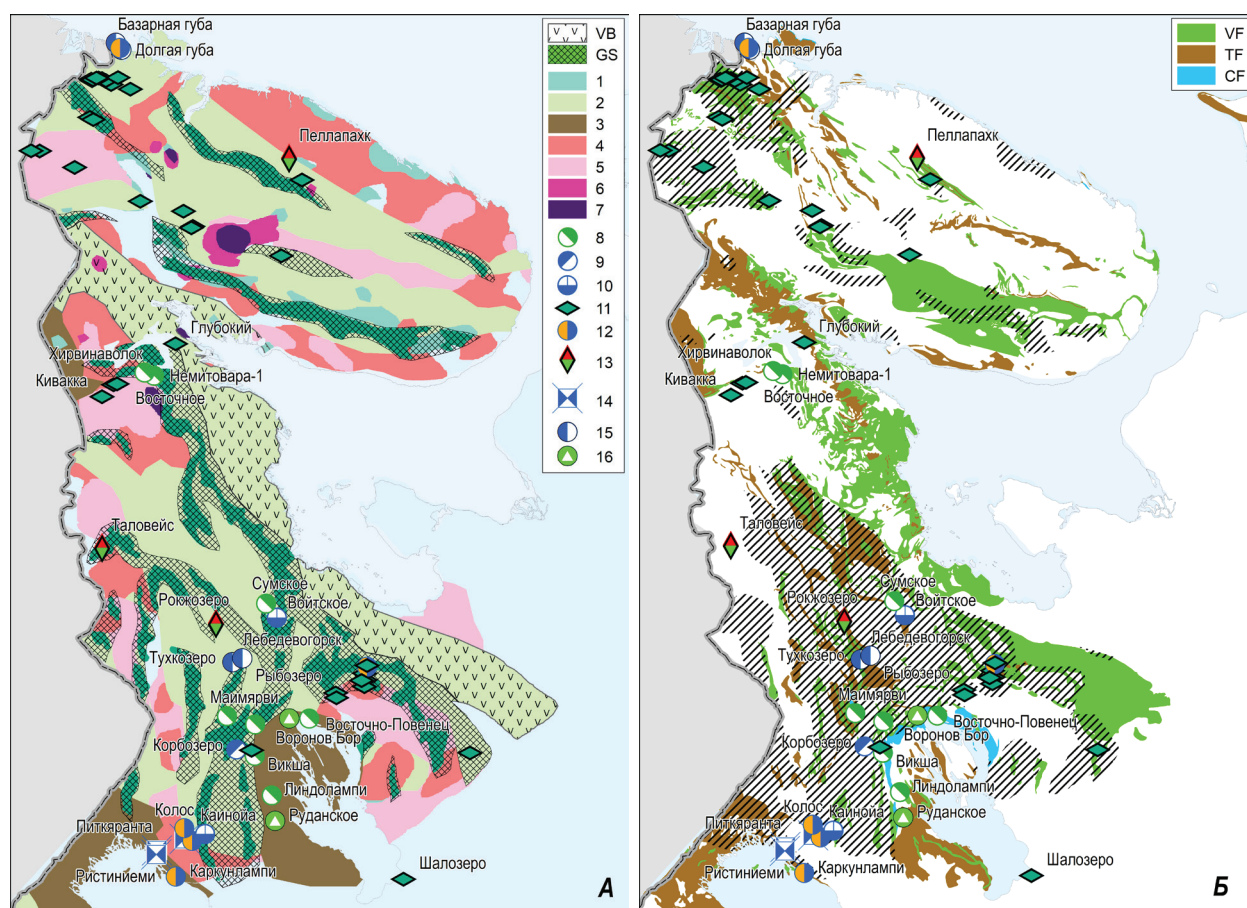


Рис. 2. А – Минеральные (рудообразующие) системы, вулканические и зеленокаменные пояса, составлено с использованием материалов (Геодинамическая карта..., 1995; Ранний докембрий..., 2005), Б – геологические формации и области совмещения (штриховка) ареалов минеральных систем лопийского и карельского периодов.

VB – вулканические пояса, GS – зеленокаменные пояса; Геологические формации: VF – вулканогенные, TF – терригенные, CF – карбонатные; Минеральные системы: 1 – колчеданно-вулканогенная и осадочно-вулканогенная, 2 – осадочных бассейнов, 3 – магматическая базитовая и ультрабазитовая, 4 – скарново-порфировая и порфирово-эпитермальная, 5 – орогенная, 6 – связанная со щелочными гранитами, 7 – система ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов; 8–16 – месторождения: 8 – медно-колчеданные в вулканогенных комплексах (VMS), 9 – колчеданно-полиметаллические в вулканогенных комплексах (VMS), 10 – колчеданно-полиметаллические в терригенных породах (SEDEX), 11 – медно-никелевые с МПГ, 12 – серебро-полиметаллические, 13 – медно-порфировые, 14 – скарново-полиметаллические, 15 – свинцово-цинковые жильные, 16 – медистых песчаников.

Fig. 2. A – Mineral (ore-forming) systems, volcanic and greenstone belts, Б – geological formations and areas of overlap (shading) of the areas of mineral systems of the Lopian and Karelian periods.

VB – volcanic belts, GS – greenstone belts; Geological formations: VF – volcanogenic, TF – terrigenous, CF – carbonate; Mineral systems: 1 – pyrite-volcanogenic and sedimentary-volcanogenic, 2 – sedimentary basins, 3 – magmatic basic and ultramafic, 4 – skarn-porphyritic and porphyritic-epithermal, 5 – orogenic, 6 – associated with alkaline granites, 7 – system of ultramafic-alkaline rocks and carbonatites; 8–16 – deposits: 8 – copper-pyrite in volcanogenic complexes (VMS), 9 – polymetallic-pyrite in volcanogenic complexes (VMS), 10 – polymetallic-pyrite in terrigenous rocks (SEDEX), 11 – copper-nickel with PGM, 12 – silver-polymetallic, 13 – copper-porphyry, 14 – skarn-polymetallic, 15 – lead-zinc veins, 16 – cuprous sandstones (red beds).

Мо-W жильно-штокверковые, Мо-W, В, флюорит-редкометалльные и Sn-W скарновые, Ta-Li-Sn-Be пегматитовые месторождения и др.); 6) система, связанная со щелочными гранитами (Nb, Ta, Zr, Be, REE-месторождения) и 7) система ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов (Nb, Ta, апатитовые, железорудные, REE- и U-Th-REE месторождения).

В Карело-Кольском регионе традиционно выделяются три цикла ТМА (Иванов и др., 2021). Лопийский тектоно-магматический цикл (3,3-2,5 млрд. лет), представлен беломорским плутоно-

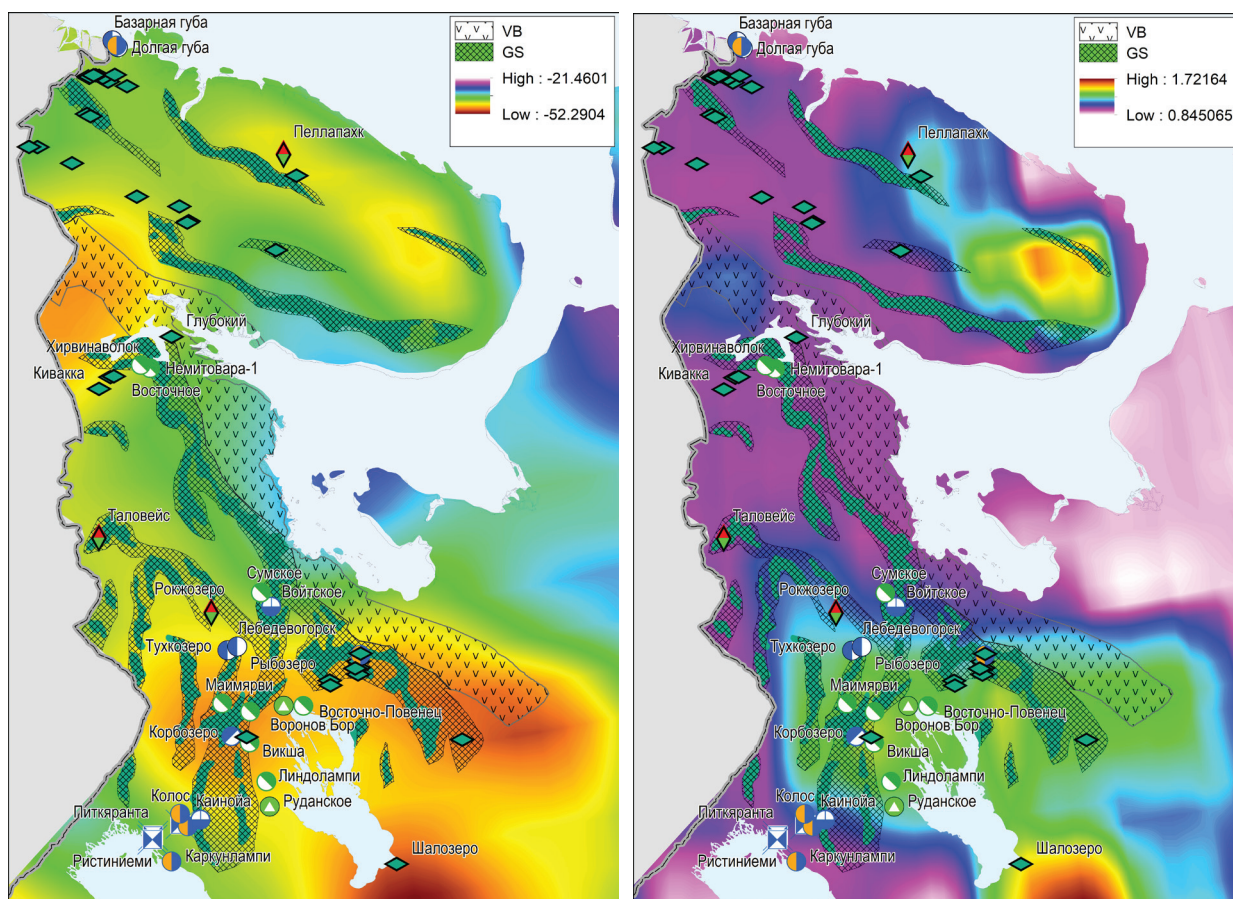


Рис. 3. А – Поверхность Мохо (глубина в км); Б – соотношение мощности нижней и средней коры (по материалам Laske, 2013). Остальные условные – см. рис. 2.

Fig. 3. A – Moho surface (depth in km), Б – ratio of the thickness of the lower and middle crust (based on Laske, 2013). Other legend items in Fig. 2.

метаморфическим комплексом, гипербазитами, перидотит-габбро-анортозитами и широко распространенными гранитоидами (Голубев и др., 2009). К периоду карельского тектоно-магматического цикла (2.5–1.95 млрд лет) привязан интрузивный магматизм в Южной Карелии и на северо-западе Кольского полуострова, где отмечается совмещение ареалов лопийского и карельского циклов. Продукты ТМА представлены основными, средними и кислыми интрузиями кратонного характера и мелкими базитовыми телами и пегматитовыми жилами (Голубев и др., 2009). С рифейским циклом связано отложение в обстановке рифтогенеза вулканогенно-осадочных трахибазальтовой, толеит-базальтовой, терригенной формаций, внедрение щелочно-ультраосновных интрузий, а также габброанортозит-рапакиви-гранитных тел на юге Карелии (Голубев и др., 2009).

Размещение стратифицированных и интрузивных минеральных (рудообразующих) систем в Карело-Кольском домене трассирует его общее распространение вулканогенных и зеленокаменных поясов (рис. 2 А). Пространственный анализ указывает на совмещение лопийских и карельских систем, в основном, в полях развития карелид (рис. 2 Б).

В Печенгском рудном районе, например, отмечается пространственное совмещение разнотипных рудообразующих систем (Лобанов и др., 2019), в числе которых выделяются магматическая базитовая и ультрабазитовая (Cu-Ni, МПГ), золотосодержащая порфирово-эпитермальная и система ультраосновных-щелочных пород (U), которые формировались при разных геотектонических режимах на карельском и свекофенском этапах развития.

В южной части Карельского сегмента полиметаллические месторождения связаны с колчеданной вулканогенной и осадочно-вулканогенной рудообразующими системами, образовавшимися в лопийских и карельских вулканических поясах на периферии палеопротерозойского проявления

мантийно-плюмового магматизма в Водлозерском террейне (Слабунов и др., 2022). Медистые песчаники – связаны с терригенными толщами рифейской пассивной окраины.

Глубинное строение земной коры и полиметаллические месторождения Карело-Кольского региона

Для континентальной земной коры, включая земную кору Балтийского щита, по результатам сейсмических исследований и изучения глубинных ксенолитов принята трехслойная модель консолидированной коры (CRUST1.0) со сложной слоисто-блоковой структурой (Bouman et al, 2015).

Глубинное строение земной коры Карело-Кольского домена сложное, приповерхностная структура земной коры часто проявлена в рельефе поверхности Мохо (рис. 3 А). Это особенно заметно в сравнении позиции ареалов позднеархейской и раннепротерозойской ТМА с глубокими участками поверхности Мохо.

В составе верхней коры, по данным Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), отмечены дацит-плагиоориодацитовые метавулканы и породы грауваккового состава – высокоглиноземистые гнейсы (Балаганский и др., 2012). Их формирование происходило в обстановках активной континентальной окраины. К породам средней коры отнесены комплекс биотитовых, биотитовых, гранат-биотитовых и глиноземистых гнейсов (метаандезиты).

Нижняя кора сложена неоархейскими базит-гипербазитовыми породами. В южной и северо-западной частях Карельского сегмента, а также в восточной части Кольского – отмечаются ее отчетливое утолщение и преобладание ее по мощности над средней корой (рис. 3 Б). Возможно, утолщение нижнего слоя связано с его разуплотнением и соответственным опусканием нижней сейсмической границы земной коры.

Пространственный анализ размещения полиметаллических месторождений в Карело-Кольском домене и сравнение геодинамических обстановок их формирования позволило выделить следующие закономерности.

Позднеархейские зеленокаменные пояса (магматическая ультрабазитовая рудообразующая система с медно-никелевыми месторождениями, в целом, приурочены к утоненной верхней коре, что не противоречит имеющимся данным (Балаганский и др., 2012).

Ареалы лопийских гранитоидных (порфировой и орогенной) рудообразующих систем с медно-порфировыми и медно-молибден-порфировыми, а также с серебро-полиметаллическими и скарновыми месторождениями и проявлениями, располагаются над наиболее утолщенной нижней корой (рис. 3 А). Это проявлено в размещении гранитоидов в Центрально-Карельском, Водлозерском, Беломорском, Мурманском и Кейвском террейнах. Возможно, такая приуроченность обусловлена формированием тоналит-трондьемит-гранодиоритовых (ТТГ) комплексов, которые считаются ключевым процессом в дифференциации древнейшей земной коры. Изотопные исследования показывают, что источники магм располагались исключительно в нижней коре (Kendrick et al., 2023).

Мезоархейские серии ТТГ по изотопным характеристикам соответствуют базитам нижней коры или ранним амфиболитам Водлозерского домена с возрастом около 3.24 млрд лет, а их образование связано с плавлением мафитов нижней коры под воздействием плюма (Чекулаев и др., 2021). Гранитоидные расплавы, по данным изотопии цирконов, могли формироваться в малоглубинных условиях в окислительной обстановке из базальтовой коры (Кузьмин и др., 2018) и, в целом, имеют мантийный генезис. Первичные расплавы ТТГ состава, вероятно, сформировались в равновесии с реститами из мантийных источников без примеси корового вещества (Морозова и др., 2011).

Неоархейские плутонические и магматические породы заметно отличаются по составу от мезоархейских (Чекулаев и др., 2021), формировавшихся в условиях плюма. При этом, изотопный состав Nd в гранитах в пределах Водлозерского домена указывает на древний коровый источник, подобный мезоархейским ТТГ породам (Чекулаев и др., 2020). Последнее соответствует представлениям об образовании зеленокаменных и вулканических поясов с колчеданными полиметаллическими рудами в условиях островных дуг активной континентальной окраины (Кожевников, 2000)

на фоне плюмовых процессов и множественных проявлений ТТГ магматизма. Стратифицированные комплексы (островодужные вулканические пояса и зоны рифтогенеза), вмещающие колчеданные и полиметаллические месторождения, располагаются над участками утолщения нижнего слоя и, соответственно увеличения мощности земной коры до 42 км и более (рис. 3 Б), например, в южной части Центрально-Карельского блока, в Водлозерском, а также частично в Имандра-Варзугской рифтовой зоне, Кейвском и Терском террейнах.

Можно предполагать, что лопийские и раннепротерозойские месторождения как колчеданно-полиметаллической, так и порфировой рудообразующих систем, контролируются активными магматическими очагами в нижнем слое земной коры, утолщавшегося в результате мантийного плюма и соответственного разуплотнения верхней мантии.

Приведенная в статье информация имеет практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки полиметаллических месторождений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 13.1902.21.0018, соглашение 075-15-2020-802).

Литература

1. Балаганский В.В., Ветрин В.Р., Морозова Л.Н. и др. Региональная геология и тектоника Кольского региона: краткий обзор, новые подходы и результаты // Вестник Кольского научного центра РАН. 2012. № 1(8). С. 13–20.
2. Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология рудных месторождений. 2016. № 2. С. 97–119.
3. Волков А.В., Галямов А.Л. Рудообразующие системы крупных месторождений высокотехнологичных металлов России: закономерности размещения, условия формирования, минерально-сырьевой потенциал // Разведка и охрана недр. 2022. № 12. С. 11–19. – DOI 10.53085/0034-026X_2022_12_11. – EDN DBOFCQ.
4. Волков А.В., Галямов А.Л., Белоусов П.Е., Вольфсон А.А. Применение космических технологий в металлогеническом анализе территории Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. 2020. № 2 (38). С. 77–85.
5. Геодинамическая карта России, масштаб: 1:10000000, серия: обзорные карты Российской Федерации масштаба 1:10 000 000, составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 1995 г.
6. Голубев А.И., Щипцов В.В. Геодинамика и минерагения Карелии // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения Северо-Запада России: мат. Всеросс. конф. Петрозаводск, 2007. С. 89–94.
7. Голубев А.И. Геодинамические режимы образования и рудогенеза углеродсодержащих формаций докембрия Фенноскандинавского щита // Металлогения древних и современных океанов. Т. 1. Миасс: УрО РАН, 2005. С. 31–37.
8. Голубев А.И., Щипцов В.В., Михайлов В.П. Основные минерагенические события Карельского региона (Восточная часть Фенноскандинавского щита) и их следствия // Минерагения докембрия: материалы Всероссийской конференции (Петрозаводск, 11–13 ноября 2010 г.). Петрозаводск. 2009. С. 51–55.
9. Иванов Н.М., Корсакова М.А., Дударева Г.А. Государственная геологическая карта РФ м-ба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Карельская. Лист Q-36-XXVII, XXVIII (Юма). Объяснительная записка // Мин-природы России, Роснедра, Карелнедра, ГГУП СФ «Минерал». Электрон. текстовые дан. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2021.
10. Ивашенко В.И., Голубев А.И. Колчеданное оруденение – перспективная базовая золоторудная формация Карельского региона // Геология и полезные ископаемые Карелии: Науч.изд. КНЦ РАН. Вып. 12. Петрозаводск. 2009. С. 5–11.
11. Кожевников В.Н. Архейские зеленокаменные пояса как аккреционные орогены. Петрозаводск. 2000. 223 с.
12. Кратц К.О. Геология карелид Карелии. М.-Л. 1963. 210 с.
13. Кузьмин М.И., Ярмолук В.В., Котов А.Б. Ранняя эволюция земли, начало ее геологической истории: как и когда появились гранитоидные магмы // Литосфера. 2018. Т. 18. № 5. С. 653–671. DOI 10.24930/1681-9004-2018-18-5-653-671. EDN WTWTAI.
14. Лобанов К.В., Чичеров М.В., Чижова И.А., Плотинская О.Ю., Горностаева Т.А., Шаров Н.В. Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (Арктическая зона России) // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3 (35). С. 107–122.

15. Морозова Л.Н., Баянова Т.Б., Серов П.А. Основные этапы гранитообразования в архее Северо-Востока Балтийского щита (на примере полигона Воче-Ламбина) // Литосфера. 2011. № 6. С. 14–26. EDN RCTYYZ.
16. Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
17. Слабунов А.И., Светов С.А., Степанова А.В., Медведев П.В., Полин А.К. Новая тектоническая карта Карелии: принципы построения и их реализация // Труды КарелНЦ РАН. 2022. № 5. С. 132–138.
18. Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Егорова Ю.С. Неоархейские граниты Карельской провинции: геологическое положение, геохимия, происхождение // Региональная геология и металлогения. 2020. № 81. С. 27–44. EDN UEOCBF.
19. Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Егорова Ю.С. Архейская тоналит-трондьемит-гранодиоритовая (ТТГ) ассоциация Карелии: этапы формирования, геохимия, происхождение // Proceedings of the Fersman Science Session GI KSC RAS. 2021. № 18. С. 409–413. – DOI 10.31241/FNS.2021.18.077. EDN CWWXNH.
20. Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America // EOS Trans AGU. 2000. V. 81. F 897. URL: <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
21. Bouman J., Ebbing J., Meekes S. et al. GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform. 2015. V. 35. P. 16–30.
22. Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere // Geophys. J. Int. 2017. V. 210. P. 56–72.
23. Garside M. Global lead reserves 2010-2022 // Lead reserves worldwide from 2010 to 2022. Feb 20. 2023. <https://www.statista.com/statistics/1156095/global-lead-reserves>.
24. ITC Trade Map, <https://www.trademap.org/Index.aspx>.
25. Kendrick J., Duguet M., Kirkland C.L., Liebmann J., Lin S. Anatomy of a craton: Isotopic heterogeneity across an Archean crustal cross-section // Precambrian Research. 2023
26. Laske G., Masters G., Ma Z., Pasyanos M.E. Update on CRUST1.0-A 1-degree global model of Earth's crust. Geophys. Res. Abstr. 2013. V. 15. EGU2013-2658.