

ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗЕМНОЙ КОРЫ, ГЕДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ОТКРЫТИЯ Pb-Zn МЕСТОРОЖДЕНИЙ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

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

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

Статья поступила в редакцию 24 июня 2020 г.

Рассмотрены результаты сравнительного металлогенического ГИС-анализа на основе данных GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer), который позволяет использовать элементы глубинного строения земной коры в качестве глобальных признаков в прогнозно-поисковых моделях Pb-Zn месторождений. В результате ГИС-анализа выделены основные глобальные признаки: пространственное размещение месторождений MVT-типа совпадает с поднятиями (астеносферными) поверхности Мохо, эти месторождения приурочены к среднетемпературной области верхней мантии и контролируются глубокими прогибами осадочного слоя коры, выделяемого по сейсмическим скоростям; месторождения VMS типа, располагаясь преимущественно на маломощной осадочной коре, соотносятся с умеренными мощностями нижней коры; SEDEX месторождения, занимая промежуточное положение между MVT и VMS, контролируются маломощной и/или умеренно мощной осадочной корой в ареалах развития рифтов. Использование этих глобальных признаков в прогнозно-поисковых моделях позволило выделить в Арктической зоне России новые перспективные площади для прогнозирования и поисков Pb-Zn месторождений.

Ключевые слова: Арктическая зона России, земная кора, глубинное строение, тектоническая обстановка, месторождение, MVT, SEDEX, VMS, свинец, цинк, модель, прогноз, поиски.

Введение

Свинцово-цинковые месторождения Арктической зоны — один из важнейших источников стратегических металлов [1]. В отечественной литературе, как и в зарубежных классификациях, Pb-Zn месторождения подразделяются на три главных типа — колчеданные в вулканогенных и терригенно-вулканогенных комплексах (Volcanic Massive Sulphide — VMS), колчеданные в углеродистых терригенных и терригенно-карбонатных комплексах (Sedimentary Exhalative — SEDEX) и стратиформные Pb-Zn в карбонатных комплексах (Mississippi Valley Type — MVT). Для перечисленных типов месторождений характерны стратиформная морфология рудных залежей и сходный минеральный состав руд. Кроме того, известны Pb-Zn месторождения и рудопроявления

скарнового, связанного с карбонатитами и эпитепимального в терригенных толщах типов (рис. 1).

Россия, несмотря на существенно меньшее количество Pb-Zn объектов в Арктической зоне, по плотности их распределения практически не уступает западным странам (см. рис. 1). Вместе с тем заметно отставание России по запасам и прогнозным ресурсам этих металлов [1]. Это в первую очередь связано с неполной геологической изученностью арктических регионов, когда оценка запасов и прогнозных ресурсов объектов рудной минерализации сильно отстает от темпов их открытия.

Существующие геолого-генетические и прогнозно-поисковые модели Pb-Zn месторождений — результат длительного накопления и анализа материалов в ходе мировых и отечественных исследований, однако, несмотря на это, их применение на практике не обеспечивает достаточно надежного прогноза.

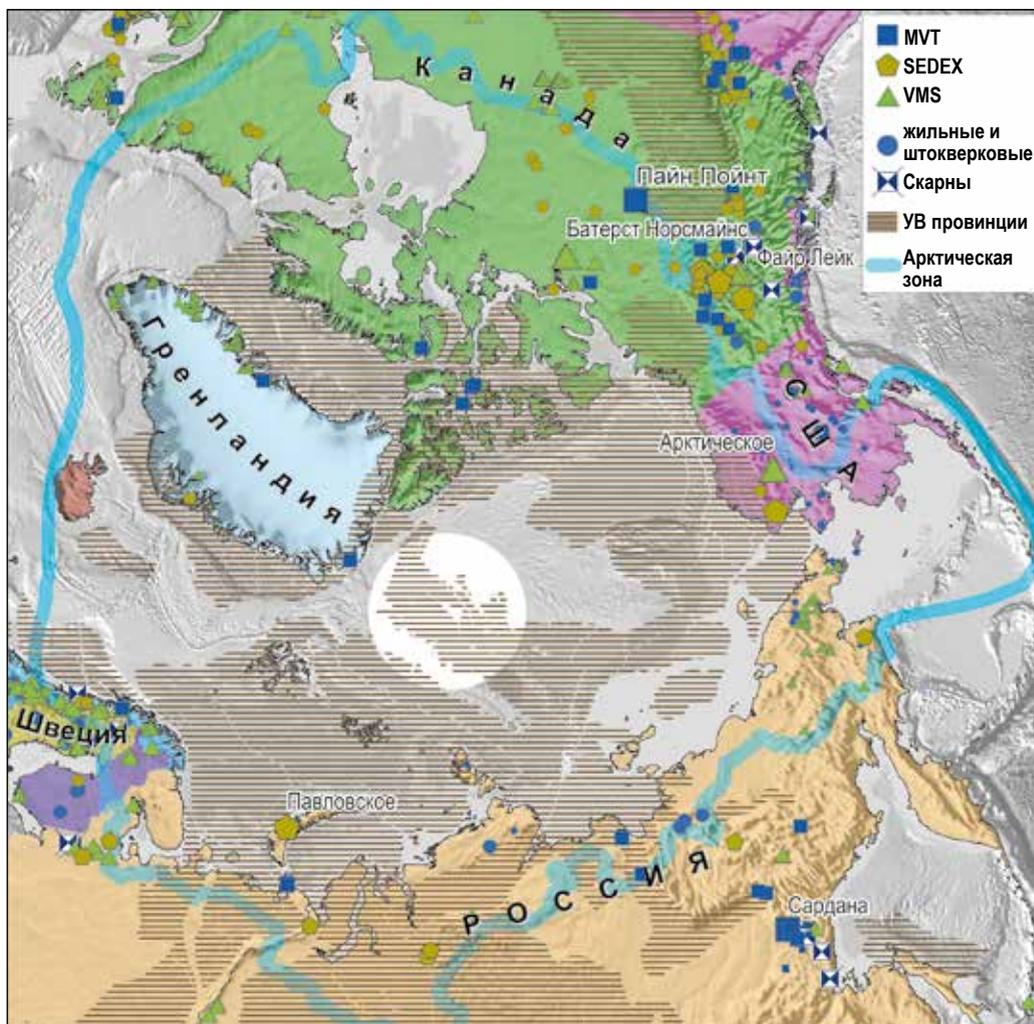


Рис. 1. Размещение Pb-Zn месторождений MVT, SEDEX, VMS и других типов в Циркумарктическом поясе
 Fig. 1. Distribution of Pb-Zn deposits of MVT-, SEDEX- and VMS- and other types in the Circum-Arctic belt

Поэтому важная задача, на решение которой направлена настоящая статья, заключается в реновации известных прогнозно-поисковых моделей на основе новых поисковых критериев и признаков.

Данная публикация продолжает серию статей, посвященных минеральным ресурсам Арктики, подготовленных в ходе проведения исследований в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН).

Методика исследований

Современные прогнозно-металлогенические построения на основе космических технологий невозможны без подготовки ГИС-проекта, сочетающего материалы дистанционного зондирования Земли и базу данных (БД) месторождений полезных ископаемых [2]. При ГИС-анализе применяются известные методические приемы, заложенные в аналитический аппарат картографических математико-аналитических систем, а также разработанные авторами новые методические подходы.

В результате миссии GOCE (2009—2013 гг.) составлена новая глобальная гравитационная карта Земли [3]. Кроме того, более точно определена форма планеты, измерены сила тяготения в различных регионах и плотность земной коры. Создаваемые модели земной коры на основе сейсмических данных и разрезов были согласованы с наблюдаемым GOCE гравитационным полем. Проект GEMMA, также финансируемый Европейским космическим агентством (ESA), выполнил оценку границы между земной корой и мантией (Мохо) на основе полученных GOCE данных [3]. Космический аппарат GOCE массой 1 т был выведен с российского космодрома Плесецк ракетой-носителем «Рокот» на низкую околоземную солнечно-синхронную орбиту 17 марта 2009 г. GOCE — спутник ESA, сочетающий гравиразведку и GPS-трекинг для определения среднего гравитационного поля Земли с беспрецедентными точностью и пространственным разрешением [4]. Для обеспечения максимально возможной точности измерений была выбрана весьма низкая орбита — 260 км над поверхностью Земли.

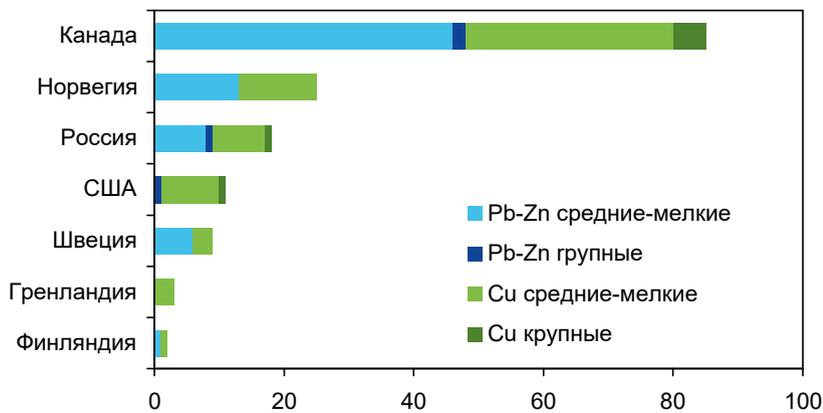


Рис. 2. Количество медных и свинцово-цинковых месторождений в странах Арктики по данным пространственно-статистического ГИС-анализа
Fig. 2. The number of the copper and lead-zinc ore deposits in Arctic countries according to spatial GIS analysis

Для объяснения закономерностей размещения и особенностей формирования месторождений различных формационных типов нами впервые применены современные глобальные модели глубинного строения земной коры, созданные на основе данных GOCE, модели глубины поверхности Мохо, мощности и строения осадочного чехла, модель CRUST1.0, унаследованная из модели CRUST2.0 [5; 6], модель плотности и термального режима верхней мантии [7]. Типы коры определяются в зависимости от возраста фундамента или тектонических условий, а остальные элементы осадочных слоев в основном соответствует модели [8]. В пределах осадочного слоя при его мощности около 20 км отмечаются сравнительно низкие сейсмические скорости. По скачкообразным изменениям сейсмических скоростей с глубиной в осадочном слое были выделены три горизонта (сверху вниз): мощностью 2 км, 5 км и третий, наиболее мощный, расположенный ниже 7 км [6; 8].

База данных Pb-Zn месторождений и рудопроявлений Арктики

В ходе работы над статьей был подготовлен ГИС-проект, включающий картографический материал, созданный на основе гравитационных данных спутника GOCE, и БД отечественных и зарубежных Pb-Zn месторождений и рудопроявлений. Пространственно-статистический ГИС-анализ БД показал, что в Циркумарктическом поясе (см. рис. 1) размещается более 110 Pb-Zn месторождений и проявлений. Количество MVT и SEDEX объектов в сравнении с глобальным распространением составляет около 10—11%, а VMS — около 20% (рис. 2). Подавляющее их число отмечается в Западной полушарии (Канаде и Гренландии).

Здесь известны такие крупные объекты, как Ред Дог, месторождения бассейна Селвин (Ховард Пасс), Пайн-Пойнт, месторождения Скандинавии

(Mofjellet, Bleikvassli), Гренландии (Black Angel, Citronen), Канады (Macmillan Pass, Prairie Creek, Bear-Twit и др.) и США (месторождения Аляски).

В российской Арктике по сравнению с зарубежными регионами значительно меньше Pb-Zn месторождений и проявлений, среди которых кроме Павловского (архипелаг Новая Земля) около двух десятков объектов (Менгенилер, Арагочан, Дальнее и Агаукан) расположены в пределах Республики Саха (Якутия). Остальные рассредоточены в Мурманской (Базарное, Долгое) и Архангельской (Раздельное) областях, в Ямало-Ненецком автономном округе (Са-

урейское, Нижнеталотинское), а также на Таймыре (Партизанское, Триестринское и др.) и Чукотке (Угрюмое) (рис. 3).

Руды типа SEDEX на архипелаге Новая Земля вскрыты в девонских терригенно-карбонатных комплексах (Павловское); на острове Вайгач и в хребте Пай-Хой (Полярный Урал) они залегают в ордовик-силурийских карбонатных комплексах. Также известен Войтский Pb-Zn объект в карбонатных комплексах протерозоя в Республике Карелия. Месторождения MVT на северо-восточной окраине Сибирской платформы (Якутия) контролируются вендской субплатформенной карбонатной формацией (Менгенилер и др.).

В результате ГИС-анализа на территории Арктической зоны России было выделено несколько потенциально перспективных рудных районов с известными и предполагаемыми полиметаллическими (Pb, Zn, Cu, Ag) месторождениями и рудопроявлениями: Вайгачский, Амдерминский, Саурейский, Таймырский и Майницкий (см. рис. 3).

Геофизическая модель земной коры Арктики

Различия в строении земной коры широко изучались и систематизировались по мощности и соотношениям слоев коры [9 и др.], выделены особенности строения континентальной коры, исследовались пространственные соотношения между типами коры и геоструктурами. По арктическому бассейну [10] показана изменчивость внутреннего строения земной коры и установлен ее континентальный тип, сокращенный по мощности.

Геофизическими методами в структуре земной коры устанавливаются типовые соотношения выделяемых слоев (рис. 4), которые во многом сходны с систематикой предшественников [9]. Отметим, что кора по соотношению мощностей слоев типового разреза не разделялась на океаническую и конти-



Рис. 3. Перспективные (Pb, Cu, Zn, Ag) рудные районы Арктической зоны России (АЗРФ – Арктическая зона Российской Федерации, ППРР – потенциально перспективные рудные районы)

Fig. 3. Promising (Pb, Cu, Zn, Ag) ore regions in the Russian Arctic (АЗРФ – Arctic Zone of the Russian Federation, ППРР – potentially promising ore areas)

нентальную. Одна из особенностей — прямая зависимость мощности коры от возраста геологических формаций (рис. 5а). При этом областям развития формаций пассивной континентальной окраины соответствует наиболее мощная осадочная кора, а выступают архей-протерозойских комплексов — максимальная глубина Мохо.

По соотношению горизонтов в осадочной коре и слоев консолидированной коры в глобальном пла-

не можно выделить семь типов разреза (см. рис. 4а). Блоки коры с разрезом I типа распространены на более чем 75% земной поверхности. В ее строении присутствуют все три слоя и незначительный по мощности верхний горизонт осадочной коры. Общая мощность варьирует от 6 км (океаны) и до 100 км (континенты). В Арктике по соотношениям слоев коры также отмечаются все типы разрезов кроме последнего — VII (см. рис. 4а).

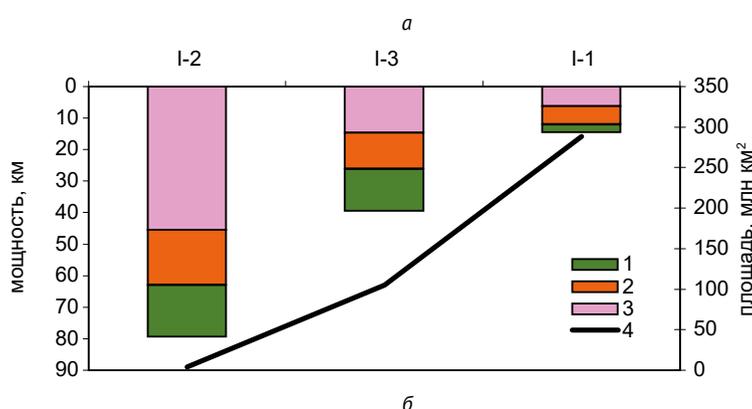
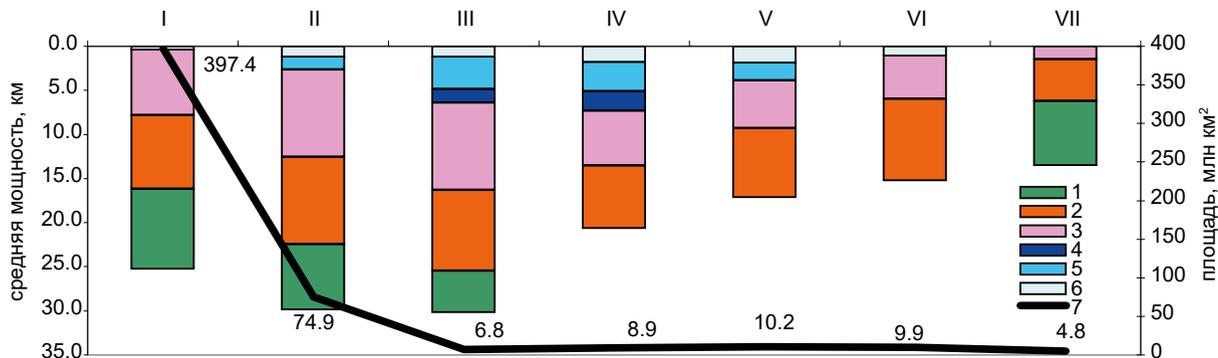


Рис. 4. Типовые разрезы земной коры I–VII (а), разделение разрезов типа I на подтипы I-1, I-2 и I-3 (б). Консолидированная кора: 1 – нижняя (базальтовая), 2 – средняя (гранитная), 3 – верхняя (метаморфическая). Горизонты осадочного слоя коры: 4 – нижний, 5 – средний, 6 – верхний; 7 – площадь распространения типовых разрезов коры

Fig. 4. Typical sections of the Earth's crust I–VII (a), subdivision of sections of type I into subtypes I-1, I-2 and I-3 (b). Consolidated crust: 1 – lower (basalt), 2 – middle (granite), upper (metamorphic). The horizons of the crust sedimentary layer: 4 – lower, 5 – middle, 6 – upper; 7 – distribution area of the crust typical sections

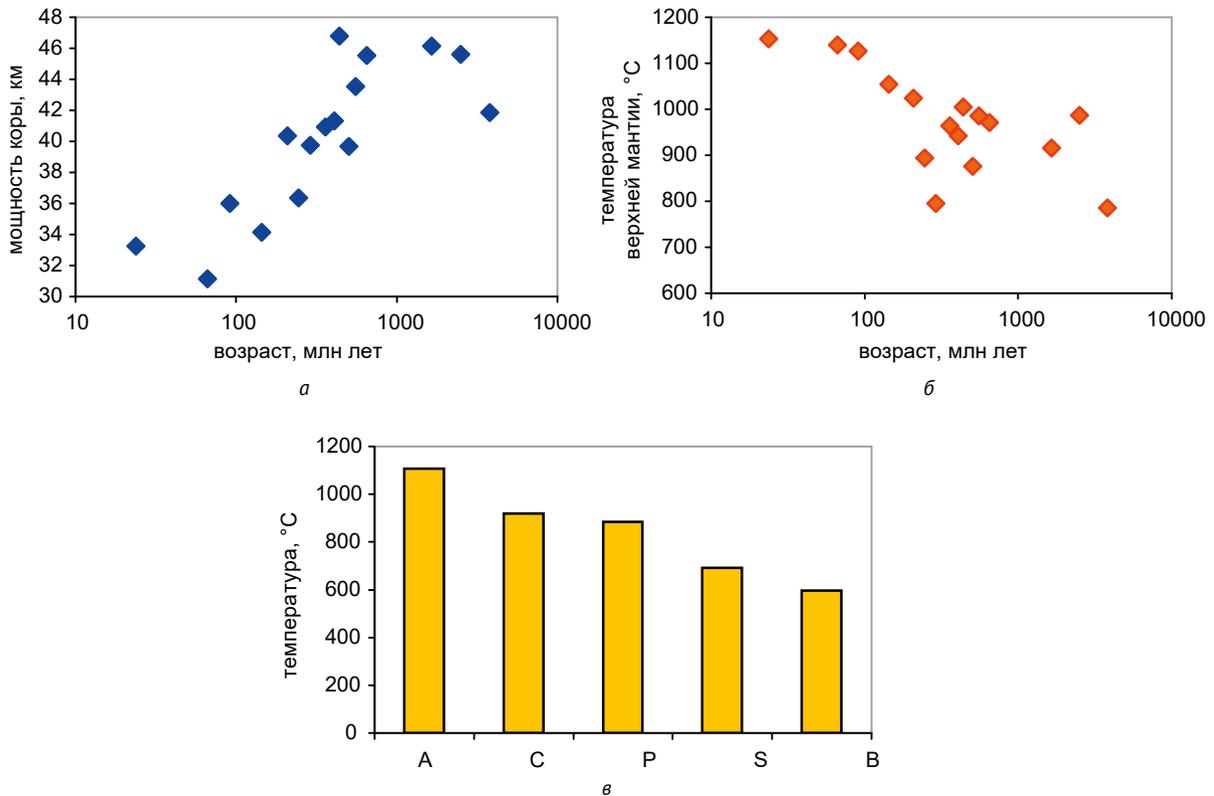


Рис. 5. Пространственные соотношения возраста геологических формаций и мощности консолидированной коры (а), возраста формаций (б) и их геодинамических обстановок (в) и термального режима верхней мантии. Геодинамические режимы: А – активная окраина, Р – пассивная окраина, С – коллизия, В – докембрийский фундамент, S – ареалы платформенного чехла
 Fig. 5. Spatial relationships between the age of geological formations and the thickness of the consolidated crust (a), age of formations (б), their geodynamic conditions (в) and the thermal state of the upper mantle. Geodynamic modes: А – active margin, P – passive margin, C – collision, B – Precambrian basement, S – platform sediments

Другая особенность заключается в том, что нижняя «базальтовая» кора в некоторых областях практически не выражена в геофизическом разрезе. ГИС-анализ показывает, что древние формационные комплексы слагают кору увеличенной мощности (до 50 км) в отличие от коры мощностью менее 35 км, сложенной кайнозойскими толщами, причем наиболее молодые формации (мезо-кайнозойские) соотносятся с блоками верхней мантии с увеличенной до 1100–1200 °C температурой (рис. 5б). Здесь также часто сосредоточены ареалы мезо-кайнозойского интрузивного магматизма; более древние проявления магматизма пространственно тяготеют к более мощной коре и менее нагретой верхней мантии.

С термальным состоянием верхней мантии также увязываются области различных геодинамических режимов развития геологических формаций. Наибольшая температура мантии (1000–1400 °C) пространственно сопоставляется с участками активной континентальной окраины и связанными с ней коллизионными зонами. Минимальные температуры (вплоть до 400 °C) отмечаются под платформами и выступами докембрийского основания (рис. 5в).

По характеру распределения и мощности этот тип коры условно разделяется на три подтипа (см. рис. 4б). Значительная часть коры первого подтипа охватывает весь мировой океан (270 млн км²), ее мощность не превышает 20 км и скорее всего она является океанической (см. рис. 4б). Кора второго подтипа, имеющая наибольшую мощность (до 110 км) и сравнительно малое площадное развитие (около 4 млн км²), соответствует орогенным областям Тибета, Анд и складчатым поясам (Загрос в Иране и др.). В Арктике этот подтип практически отсутствует.

Остальные площади (более 120 млн км²), отнесенные к коре третьего подтипа, мощность которой условно варьирует от 20 до 60 км, остаются нерасчлененными. Здесь территории охватывают выступы докембрийского фундамента (Балтийский, Алданский, Канадский и другие щиты) и подвижные пояса — активные континентальные окраины (Северо-Восточная Евразия, Кордильеры, Анды и др.). Наиболее широко проявлены ареалы мезозойского и позднепалеозойского гранитоидного магматизма, по площади суммарно превышающие 1,5 млн км². В Арктике этот подтип преобладает по площади (почти 15 млн км²) при средней мощности 35 км. По

сейсмическим, геологическим и петрофизическим данным на Кольском полуострове выделяют четыре слоя коры: нижний гомогенный, средний гетерогенный, докембрийский фундамент и неметаморфизованные рифейские породы [11].

Второй тип разреза также характеризуется наличием всех трех слоев консолидированной коры, а также сравнительно мощными двумя верхними горизонтами осадочной коры (см. рис. 4а). Этот тип пространственно сопоставляется с крупными кратонами, включая фланговые области внутриплитного магматизма, и другими малоподвижными террейнами (Восточно-Европейская и Сибирская платформы, Западно-Сибирская плита, Северо-Американская, Южно-Американская и Африкано-Аравийская платформы). Кора этого типа в составе осадочного слоя включает мощные и широкие по площади платформенные отложения, а ее мощность изменяется от 7 до 95 км, магматизм широко проявлен в виде триасового внутриплитного вулканизма, а в складчатом обрамлении платформ — в крупных ареалах мезозойской тектоно-магматической активизации. Эти соотношения сохраняются и для Арктической зоны, общая площадь коры составляет около 8 млн км², наибольшая часть ее поверхности относится к пассивной континентальной окраине. На активных участках континентальной окраины и в коллизионных зонах магматические ареалы, большей частью связанные с триасовыми интрузиями, занимают примерно 250 тыс. км².

Третий тип разреза мощностью 11—70 км имеет сходное с разрезом второго типа строение, разница заключается в большей завершенности и повышенной мощности осадочного слоя (см. рис. 4а). Ареалы коры этого типа в первую очередь соотносятся с широко развитым раннемезозойским внутриплитным магматизмом и в пределах платформ, и в их пассивных окраинах (Восточная Гренландия, Сибирская трапповая провинция и др.), а также участками кайнозойского и современного вулканизма (Вилуйская впадина, Камчатка). В Арктическом пространстве кора охватывает немногим более 1 млн км², где преобладают комплексы пассивной окраины и зон, осложненных коллизионными процессами и проявлениями, в основном раннемезозойского магматизма.

Четвертый, пятый и шестой типы разреза составляют группу, характеризующуюся практически невыраженным нижним (базальтовым) слоем консолидированной коры (см. рис. 4а).

Четвертый тип разреза при мощности до 35 км характеризуется полным строением и наибольшей мощностью (до 15 км) осадочного чехла и охватывает крупные нефтегазоносные бассейны (Мексиканский залив, Саудовская Аравия, Норвежское и Карское моря, Западная Сибирь и др.), а также отмечается в бассейнах Средиземного, Черного и Каспийского морей. В арктическом регионе кора соотносится с нефтегазоносными Баренцевоморской,

Карской провинциями, Свердрупским и Северо-Аляскинским бассейнами.

Пятый тип коры мощностью от 7 до 45 км пространственно соотносится с переходной корой в пределах современных шельфов пассивной континентальной окраины (фланги Свальбардской плиты, впадина Бофорта в Канаде). Это относится также к островодужным системам активных окраин (Алеутский, Охотский и Сахалинский блоки, Пиренейский и Болеарский средиземноморские бассейны). В Арктической зоне этот тип представлен слабо.

Шестой тип отличается малой мощностью осадочного слоя, представленного только верхним горизонтом. Общая мощность разреза весьма изменчива (от 5 до 45 км), и, по-видимому, кора является переходной от континента к океану и развита в зонах субдукции, в том числе в пределах Тихоокеанского пояса и Карибского бассейна.

Седьмой тип разреза имеет мощность от 7 до 20 км, в его строении при наличии «гранитного» и «базальтового» слоев очень слабо выражен верхний (метаморфический) слой консолидированной коры, а осадочный слой практически отсутствует (см. рис. 4а). Этот тип коры встречается лишь в крупных зонах срединно-океанических хребтов Индийского океана.

В Арктической зоне земная кора представлена первыми шестью типами разрезов (см. рис. 4а). Ареалы коры различных типов и формационные комплексы различной геодинамической природы показаны на карте Циркум-Арктики (рис. 6а и 6б). На основе ГИС-анализа выявляется отчетливая прямая связь между мощностью земной коры, ее структурой и различными по возрасту и геодинамической природе геологических формаций, при этом мезокайнозойские структуры в северном полушарии слагают кору с весьма изменчивой мощностью. Обратная связь в целом намечается между возрастом формаций и температурой верхней мантии, под структурами, возраст которых моложе триаса, где мантия разогрета больше, чем под древней корой. Следовательно, можно предположить, что разогрев верхней мантии под мезозойскими структурами (Тихоокеанский рудный пояс) сохраняется еще с мезозоя, поскольку мантия под корой этого возраста имеет температуру, близкую к максимальной (около 1200—1300°C). Под палеозойской и докембрийской корой мантия отличается минимальными значениями температуры вплоть до 400°C (в районе Анабарского щита).

Развитие прогнозно-поисковых моделей Pb-Zn месторождений

В состав типовых геолого-поисковых моделей свинцово-цинковых месторождений входят региональные и локальные признаки [12]. Они характеризуют геодинамические обстановки и фациальные особенности формирования рудовмещающих толщ, а также их тектонические дислокации, общие мине-

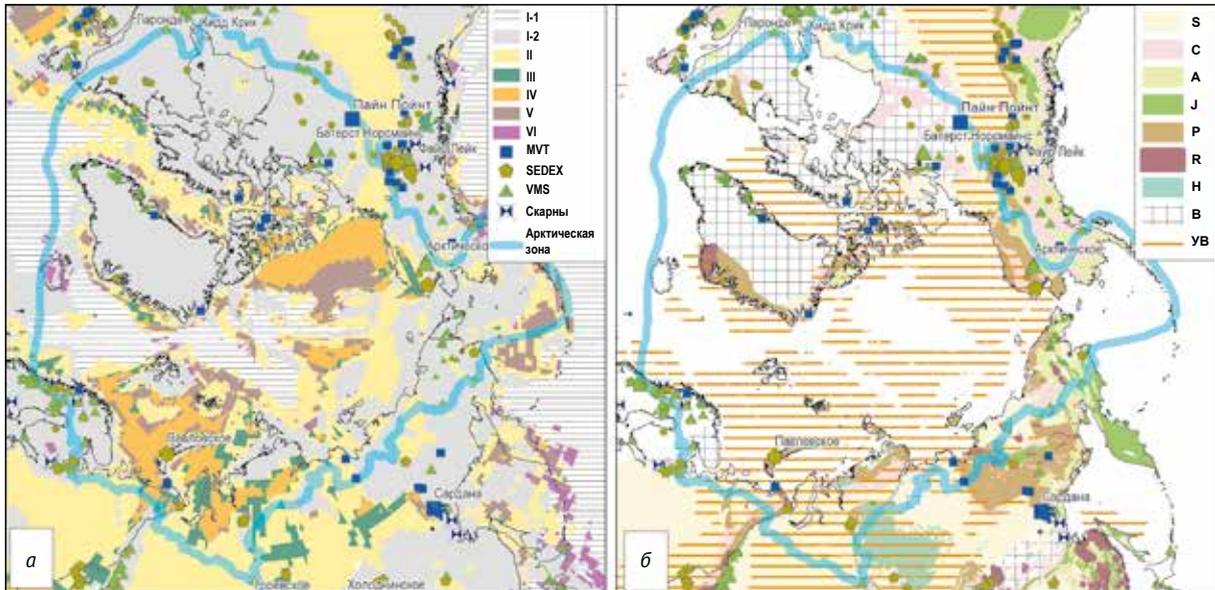


Рис. 6. Распространения ареалов типового строения земной коры (а) и тектоническая схема (б) в Циркумполярной области: I – нерасчлененные области, II – кратоны и малоподвижные области, III – ареалы внутриплитного магматизма, IV – зоны субдукции, V – рифтогенные структуры, VI – нефтегазоносные бассейны. Формационные комплексы: S – чехол, C – коллизионные зоны, A – активная континентальная окраина, J – островодужные комплексы, P – пассивные континентальные окраины, R – рифтогенные структуры, H – области внутриплитного магматизма, B – комплексы докембрийского основания
 Fig. 6. Distribution of areas of the typical crust structure (a) and tectonic pattern (b) in the Circum-Polar region: I – undivided areas, II – cratons and stiff (sedentary) areas, III – areas of intraplate magmatism, IV – subduction zones, V – rift-genic structures, VI – oil & gas basins. Geodynamic modes: S – platform sediments, C – collision zones, A – active continental margin, J – island-arc complexes, P – passive continental margins, R – rift-genic structures, H – areas of intraplate magmatism, B – complexes of the Precambrian basement

ралогео-геохимические особенности пород, отражающие их взаимодействие с рудоносными флюидами, и геофизические поля, характеризующие состояние геологического и рудного пространства. Для целей регионального прогноза важно выделять именно глобальные признаки рудоносности, в качестве которых выступают общие особенности рудовмещающих формаций, геодинамические и тектоно-магматические обстановки их образования [13], которые в совокупности определяют состояние земной коры, включая ее осадочный слой.

В результате ГИС-анализа выделены глобальные признаки, на основе которых получили дальнейшее развитие прогнозно-поисковые модели Pb-Zn месторождений. Анализ показал, что у месторождений SEDEX и MVT много общего. Во-первых, пространственная связь с мощными разрезами осадочного слоя земной коры, MVT залегают в карбонатных толщах интракратонных и перикратонных прогибов, пространственно тяготеют к крупным осадочным бассейнам, а SEDEX — в задуговых бассейнах, связанных с рифтогенными структурами пассивной окраины. Во-вторых, геодинамические обстановки формирования этих типов месторождений сопровождаются проявлениями углеводородов (Южное Верхоянье, Туора-Сис, Хараулах в Якутии, Пайхой-Новоземельский бассейн, бассейн Сельвин в Канаде). Кроме того, месторождения SEDEX и MVT ча-

сто приурочены к глубоким прогибам (около 2 км) верхнего и среднего горизонтов осадочной коры (рис. 7а). Такое размещение месторождений, а также изотопные данные указывает на рудовмещающие толщи как наиболее вероятный источник рудоносных флюидов [14]. Однако в отличие от SEDEX руды MVT содержат много радиогенного Pb, например месторождение Мидконтинент (США) [14].

Существуют представления, что месторождения SEDEX и VMS залегают в близких геодинамических обстановках, связанных с вулканизмом [12]. Вторые приурочены преимущественно к активным областям вулканической деятельности и тектоно-магматической активизации на утоненной коре и к периферии крупных седиментационных прогибов. Именно в таких участках консолидированная кора и нижний «базальтовый» слой в ее составе имеют уменьшенную мощность (рис. 7б) и соответственно максимальную близость к разогретой до 1100—1300°C верхней мантии. Эта закономерность — одна из глобальных особенностей размещения руд VMS.

Месторождения SEDEX, напротив, рассредоточены в терригенно-карбонатных комплексах на коре с мощностью «базальтового» слоя — 10—15 км (см. рис. 7б). Месторождения MVT занимают промежуточное положение между SEDEX и VMS — в ареалах распространения субплатформенных комплексов и формаций пассивной континентальной окраины.

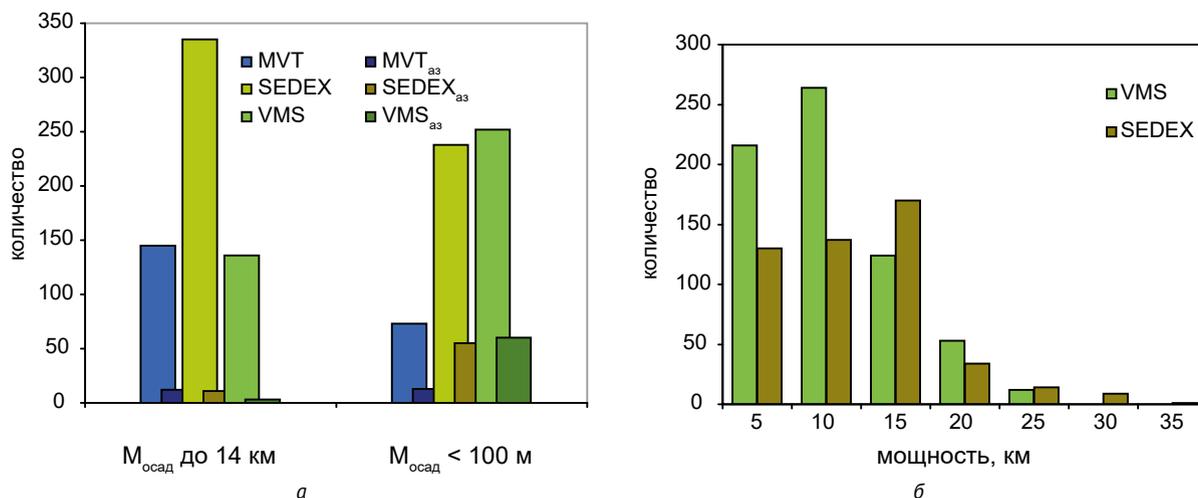


Рис. 7. Пространственные соотношения месторождений MVT, SEDEX и VMS типов в мире и Арктической зоне (аз) с изменчивостью толщины осадочной коры (а) и мощностью нижнего «базальтового» слоя консолидированной коры (б)
 Fig. 7. Spatial relationships of deposits of MVT-, SEDEX- and VMS-types in the world and in the Arctic zone (az) with the variability of sedimentary crust thickness (a) and thickness of the lower “basalt” layer of consolidated crust (b)

В пределах выступов докембрийского основания, как показывает ГИС-анализ, в строении коры отмечаются два типовых разреза. Первый характеризуется полным или частичным отсутствием нижнего «базальтового» слоя. Например, в Гренландии кора с таким строением установлена в Нагсугтонском орогенном поясе, сформированном в рифее (1,91—1,77 млрд лет). В Канаде этот тип отмечается в пределах зоны Капейсейсинг (центральная часть кратона Сьюпириор), а в России — на восточном фланге Алданского щита в районе Пограничной (Хингано-Охотской) трансрегиональной гравитационной ступени [15]. Второй тип разреза слагает основные территории Балтийского, Канадского, Алданского и других щитов. Здесь толщина нижней коры составляет 15—30 км. Возраст орогенеза в этих блоках варьирует в широких пределах от кеноранской (2,7—2,5 млрд лет) до каледонской эпохи.

В локализации VMS и SEDEX в докембрийских комплексах отмечается особенность — ареалы их распространения ограничиваются мощностью земной коры в 40—45 км, иногда до 60 км. Свинцово-цинковые жилы, например в Печенгском рудном районе, залегают в метаморфизованных рифейских песчаниках пассивной континентальной окраины и архейских гнейсах и кристаллических сланцах фундамента и ассоциируются с проявлениями рифтогенеза при формировании шельфовой плиты Баренцева моря [11]. При этом максимальная высота границы Мохо здесь (34 км) рассматривается как реликтовый мантийный плюм. VMS объекты в этих условиях также тяготеют к участкам с минимальной толщиной нижнего «базальтового» слоя, с первым типом разреза (см. рис. 4а).

Анализ показывает, что наиболее мощная консолидированная кора (30 км и более, см. рис. 6), отне-

сенная к подтипу 1-1, распространена в орогенных поясах — Кордильеры, Анды, Северо-Восточные территории Канады, скандинавские регионы, вулканоплутонические пояса и ассоциации (Урало-Монгольский, Охотско-Чукотский, Восточные Саяны и др.). VMS и SEDEX объекты в этих регионах сосредоточены на умеренно мощной консолидированной коре (30—40 км). Магматические дуги, вмещающие VMS месторождения и порфириновые объекты, по современным представлениям контролируются наложенными аккреционными и постаккреционными структурами активных континентальных окраин [16]. В результате исследований установлено, что здесь на аккреционном этапе на коре средней мощностью 30—35 км в наибольшей близости с маломощным (8—9 км) «гранитным» слоем, контаминировавшим аккреционные комплексы, возникали порфириновые объекты. Причем в наложенных зонах орогенеза толщина первых двух слоев несколько увеличена (до 20—22 км суммарно).

Полученные в результате ГИС-анализа новые глобальные прогнозно-поисковые признаки Pb-Zn месторождений представлены в табл. 1.

Заключение

Таким образом, за счет дополнительных признаков прогнозно-поисковые модели Pb-Zn месторождений получили дальнейшее развитие. Выполненные исследования позволили составить оригинальную прогнозно-металлогеническую карту Pb-Zn месторождений в Арктике (рис. 8). На территории Арктической зоны России наиболее перспективные площади располагаются в восточном обрамлении Сибирской платформы, в Верхояно-Колымской области, на Чукотке и Полярном Урале. Отметим, что выделение перспективных площадей существенно зависит от детализации используемых при про-

Таблица 1. Прогнозные глобальные критерии и признаки MVT, SEDEX и VMS месторождений

| Критерий | MVT | SEDEX | VMS |
|--|--|---|---|
| Геодинамические обстановки | Перикратонные прогибы, пассивная континентальная окраина. На периферии рифтогенных структур | Пассивная континентальная окраина, в пределах и на периферии рифтов и надрифтовых прогибов, на периферии активной окраины | Активная континентальная окраина, магматические дуги (вулcano-плутонические пояса и ассоциации), коллизийные структуры (аккреция, орогенез) |
| Осадочный чехол земной коры | В пределах осадочных бассейнов, углеводородных провинций, приуроченность к локальным прогибам верхнего горизонта осадочного слоя земной коры | В пределах осадочных бассейнов, углеводородных провинций | |
| Соотношения с магматическими образованиями | Весьма ограничено | Магматические комплексы рифтогенной природы | Вулcano-плутонические пояса и ассоциации |
| Тип и подтипы разреза коры * | I.3; II | I.3; II; V | I.3; V |
| Консолидированная кора | 35—40 км | 30—40 км | 25—45 км |
| Средняя кора | 10 км | 10 км | 6—10 км |
| Нижняя кора | 13—16 км | 9—15 км | 5—10 км |

* См. рис. 4.

прогнозно-металлогенических построениях тематических слоев, совмещении поисковых параметров, которые и определяют достоверность прогнозной карты.

Дальнейшее совершенствование прогнозно-поисковых моделей тесно связано с решением возрастных проблем продуктивных стадий рудоотложения, выделением основных рудообразующих систем и их пространственно-временных границ, с проблемой полигенности и полихронности рудообразующих процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-70001 «Изучение геологических и геодинамических обстановок формирования крупных месторождений стратегических металлов Арктической зоны России: выводы для прогнозирования и поисков новых месторождений»).

Литература

1. Бортников Н. С., Лобанов К. В., Волков А. В. и др. Арктические ресурсы цветных и благородных металлов в глобальной перспективе // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 1 (17). — С. 38—46.
2. 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-77-85.

3. Reguzzoni M., Sampietro D. GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform. — 2015. — Vol. 35. — P. 31—43.
4. Ключков А. А. Новая эра в изучении гравитационного поля Земли // Науч. тр. ин-та астрономии РАН. — 2018. — Т. 2. — С. 20—25.
5. Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America // EOS Trans AGU. — 2000. — 81. — F897. — URL: <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
6. Bouman J., Ebbing J., Meekes S. et al. GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform. — 2015. — Vol. 35. — P. 16—30.
7. Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere // Geophys. J. Int. — 2017. — Vol. 210. — P. 56—72.
8. Laske G., Masters G. A Global Digital Map of Sediment Thickness // EOS Trans AGU. — 1997. — 78. — F483.
9. Белоусов В. В., Павленкова Н. И. Типы земной коры Европы и Северной Атлантики // Геотектоника. — 1989. — № 3. — С. 3—14.
10. Кашубин С. Н., Павленкова Н. И., Петров О. В. и др. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Регион. геология и металлогения. — 2013. — № 55. — С. 5—20.
11. Лобанов К. В., Чичеров М. В., Чижова И. А. и др. Глубинное строение и рудообразующие системы.

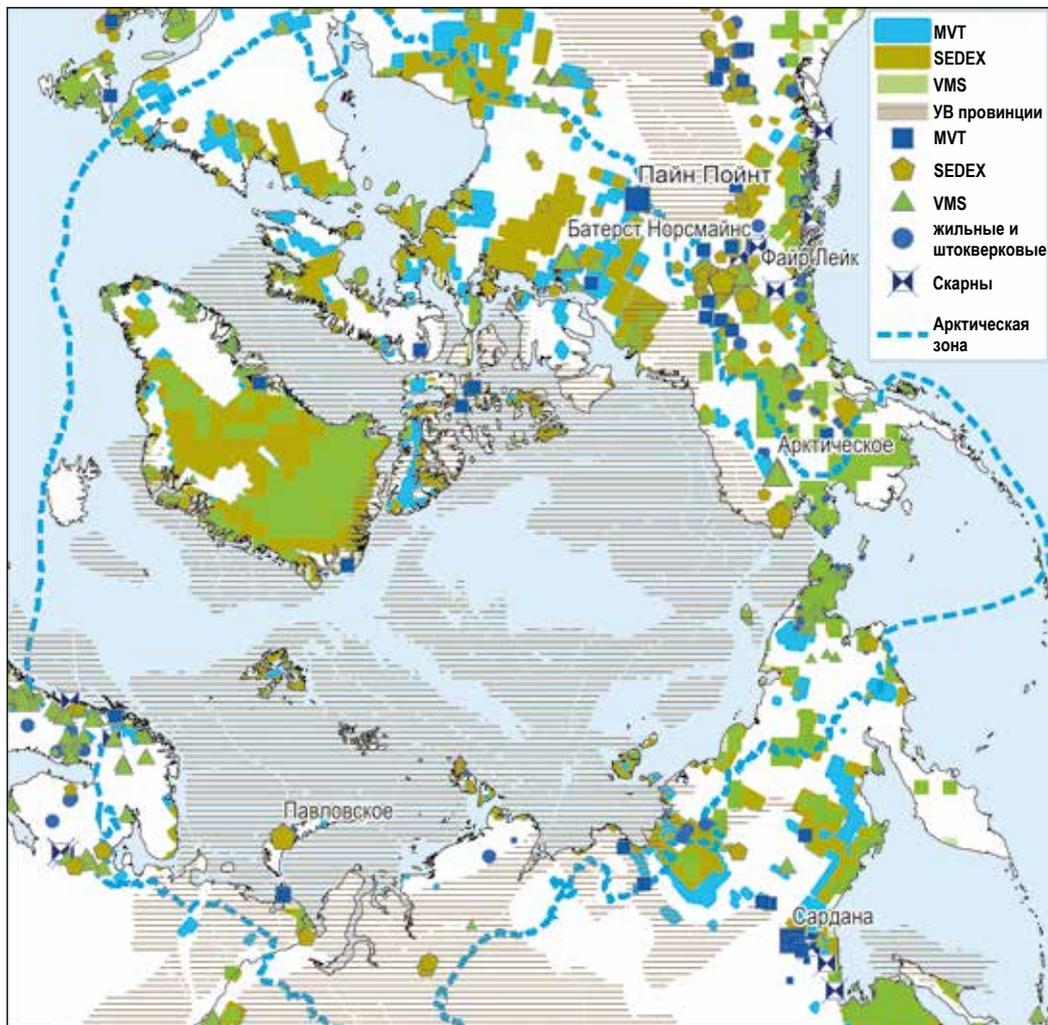


Рис. 8. Схематическая прогнозная карта Pb-Zn месторождений в Арктике
Fig. 8. Schematic forecast map of Pb-Zn deposits in the Arctic

мы 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.

12. Ручкин Г. В., Конкин В. Д., Кудрявцева Н. Г. Металлогенические ряды месторождений цветных и благородных металлов в основных геотектонических обстановках // Руды и металлы. — 1997. — № 4. — С. 30.

13. Конкин В. Д., Донец А. И., Ручкин Г. В. Минералогическо-геохимические типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых

месторождений в карбонатных толщах // Отечеств. геология. — 2018. — № 4. — С. 52—62. — DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10005.

14. Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. — [S. I.]: Springer Netherlands, 2009. — 1252 p.

15. Диденко А. И., Малышев Ю. Ф., Саксин Б. Г. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии. — Владивосток: Дальнаука, 2010. — 232 с.

16. Волков А. В., Сидоров А. А., Старостин В. И. Металлогения вулканогенных поясов и зон активизации. — М.: МАКС-ПРЕСС, 2014. — 356 с.

Информация об авторах

Галямов Андрей Львович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: alg@igem.ru.

Волков Александр Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tma2105@mail.ru.

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.

Библиографическое описание данной статьи

Галямов А. Л., Волков А. В., Лобанов К. В. Геофизическая модель земной коры, геодинамические обстановки и перспективы открытия Pb-Zn месторождений в российской Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 87—98. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-87-98.

GEOPHYSICAL MODEL OF THE EARTH'S CRUST, GEODYNAMIC CONDITIONS AND PROSPECTS FOR THE DISCOVERY OF Pb-Zn DEPOSITS IN THE RUSSIAN ARCTIC

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

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

The article was received on 24 June, 2020

Abstract

The article discusses the results of a comparative metallogenic GIS analysis based on GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) data that allows the use of elements of the deep crust structure as global features in forecast and prospecting models of Pb-Zn deposits. Through the GIS analysis the authors have identified the main global features: the spatial distribution of MVT-type deposits coincides with the asthenospheric uplifts of the MOHO discontinuity; deposits are confined to the medium-temperature region of the upper mantle and are controlled by deep deflections of the crust sedimentary layer, identified by seismic velocities; the VMS-type deposits, located mainly on a thin sedimentary crust, correlate with moderate thickness of the lower crust; the SEDEX-type deposits, which occupy an intermediate position between MVT and VMS, are controlled by thin and/or moderately thick sedimentary crust in the areas of rift development. The use of these global features in forecast and prospecting models is to identify new promising areas in the Russian Arctic zone for predicting new Pb-Zn deposits.

Keywords: Arctic zone of Russia, crust, deep structure, tectonic environment, deposit, MVT, SEDEX, VMS, lead, zinc, model, forecast, prospecting.

This work was financially supported by the Russian Federal Property Fund (Grant No. 18-05-70001 “Studying the geological and geodynamic conditions of the formation of large strategic metal deposits in the Arctic zone of Russia: conclusions for forecasting and prospecting for new deposits”).

References

1. Bortnikov N. S., Lobanov K. V., Volkov A. V., Galyamov A. L., Murashov K. Yu. Arkticheskie resursy tsvetnykh i blagorodnykh metallov v global'noi perspective. [Arctic resources of nonferrous and noble metals in global prospects]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2015, no. 1 (17), pp. 38—46. (In Russian).
2. Volkov A. V., Galyamov A. L., Belousov P. E., Vol'fon A. A. Primenenie kosmicheskikh tekhnologii v metallogenicheskom analize territorii Arkticheskoi zony Rossii. [Application of space technologies in metallogenetic analysis of the territory of the Arctic zone of Russia]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2020, no. 2 (38), pp. 77—85. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-77-85. (In Russian).
3. Reguzzoni M., Sampietro D. GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform*, 2015, vol. 35, pp. 31—43.
4. Klyuikov A. A. Novaya era v izuchenii gravitatsionnogo polya Zemli. [A new era in the study of the Earth's gravitational field]. *Nauch. tr. in-ta astronomii RAN*, 2018, vol. 2, pp. 20—25. (In Russian).
5. Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America. *EOS Trans AGU*, 2000, 81, F897. Available at: <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
6. Bouman J., Ebbing J., Meekes S. et al. GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform*, 2015, vol. 35, pp. 16—30.
7. Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere. *Geophys. J. Int.*, 2017, vol. 210, pp. 56—72.
8. Laske G., Masters G. A Global Digital Map of Sediment Thickness. *EOS Trans AGU*. — 1997. — 78. — F483.
9. Belousov V. V., Pavlenkova N. I. Tipy zemnoi kory Evropy i Severnoi Atlantiki. [Types of the Earth's crust of

Europe and the North Atlantic]. *Geotektonika*, 1989, no. 3, pp. 3—14. (In Russian).

10. *Kashubin S. N., Pavlenkova N. I., Petrov O. V., Mil'shtein E. D., Shokal'skii S. P., Erinchek Yu. M.* Tipy zemnoi kory Tsirkumpolyarnoi Arktiki. [Types of the Earth's crust of the Circumpolar Arctic]. *Region. geologiya i metallogeniya*, 2013, no. 55, pp. 5—20. (In Russian).

11. *Lobanov K. V., Chicherov M. V., Chizhova I. A., Gornostaeva T. A., Sharov N. V.* Glubinnoe stroenie i rudobrazuyushchie sistemy Pechengskogo rudnogo raiona (Arkticheskaya zona Rossii). [Depth structure and ore-forming systems of the Pechenga ore region (Russian Arctic Zone)]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 3 (35), pp. 107—122. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-107-122. (In Russian).

12. *Ruchkin G. V., Konkin V. D., Kudryavtseva N. G.* Metallogenicheskie ryady mestorozhdenii tsvetnykh i blagorodnykh metallov v osnovnykh geotektonicheskikh obstanovkakh. [Metallogenic series of deposits of non-ferrous and noble metals in the main geotectonic

environments]. *Rudy i metally*, 1997, no. 4, pp. 30. (In Russian).

13. *Konkin V. D., Donets A. I., Ruchkin G. V.* Mineralogiko-geokhimicheskie tipy i regional'nye geologicheskie osobennosti stratiformnykh svintsovo-tsinkovykh mestorozhdenii v karbonatnykh tolshchakh. [Mineralogical and geochemical types and regional geological features of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata]. *Otechestv. geologiya*, 2018, no. 4, pp. 52—62. DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10005. (In Russian).

14. *Pirajno F.* Hydrothermal Processes and Mineral Systems. [S. I.], Springer Netherlands, 2009, 1252 p.

15. *Didenko A. I., Malyshev Yu. F., Saksin B. G.* Glubinnoe stroenie i metallogeniya Vostochnoi Azii. [Deep structure and metallogeny of East Asia]. *Vladivostok, Dal'nauka*, 2010, 232 p. (In Russian).

16. *Volkov A. V., Sidorov A. A., Starostin V. I.* Metallogeniya vulkanogennykh poyasov i zon aktivizatsii. [Metallogeny of volcanogenic belts and zones of activation]. *Moscow, MAKS-PRESS*, 2014, 356 p. (In Russian).

Information about the authors

Galyamov Andrey Lvovich, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: alg@igem.ru.

Volkov Alexander Vladimirovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tma2105@mail.ru.

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

Bibliographic description

Volkov A. V., Galyamov A. L., Lobanov K. V. Geophysical model of the Earth's crust, geodynamic conditions and prospects for the discovery of Pb-Zn deposits in the Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 3 (39), pp. 87—98. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-87-98. (In Russian).

© Galyamov A. L., Volkov A. V., Lobanov K. V., 2020