

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ГРАВИТАЦИОННЫМ ДАННЫМ СПУТНИКА GOCE И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В ОБРАМЛЕНИИ СИБИРСКОЙ И ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМ

© 2023 г. А. Л. Галямов^а*, А. В. Волков^а, К. В. Лобанов^а, К. Ю. Мурашов^а

^аФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Москва, Россия

*E-mail: a-galyamov@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2022 г.

Впервые результаты современных исследований земной коры на основе гравитационных данных спутника GOCE применены для сравнительного металлогенического анализа геодинамических обстановок формирования полиметаллических месторождений в складчатом обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ. Показано, что месторождения SEDEX типа чаще размещаются в земной коре с преимущественным развитием нижнего “базальтового” слоя. Колчеданные медные и свинцово-цинковые месторождения (VMS), а также некоторые проявления SEDEX типа встречаются в надсубдукционных островодужных и аккреционных обстановках на коре с преимущественным развитием среднего “гранитного” слоя. Pb–Zn руды MVT-типа локализованы в глубоких перикратонных осадочных нефтегазоносных бассейнах на шельфе и континентальном склоне, без пространственной связи со стратификацией земной коры. Ag-полиметаллическое оруденение Таймыра и Западного Верхоянья приурочены к глубоким перикратонным рифтогенным прогибам на пассивной континентальной окраине, обладают сходством рудовмещающей среды и могут быть объединены в единый серебро-полиметаллический Таймыро-Западно-Верхоянский пояс. Полученные результаты подтверждают перспективность Pb–Zn месторождений Центрального и Восточного Таймыра, а также Саурейского рудного района (Полярный Урал) и необходимость их дальнейших исследований.

Ключевые слова: литосфера, земная кора, Сибирская, Восточно-Европейская, платформа, медь, цинк, свинец, серебро, руда, месторождение, SEDEX, MVT, VMS

DOI: 10.31857/S0205961423010049, EDN: MLTXIF

ВВЕДЕНИЕ

Свинцово-цинковые месторождения, широко распространенные в мире, являются одним из важнейших источников стратегических металлов. Они обычно являются крупными или уникальными промышленными объектами. В этих месторождениях заключена значительная часть всех запасов и ресурсов свинца и цинка, а также высокие концентрации критических металлов — Ag, Pb, Zn, Te, Sc, Sr, Ga, Bi, Cd, In, Se, Re, Ge, REE (Бортников и др., 2016; Галямов и др., 2021).

В мире известны крупные и суперкрупные месторождения — Ред Дог, Грин-Крик (Аляска, США), Селвин, Ховард Пасс, Пайн-Пойнт (Канада), Брокен-Хилл, Мак-Артур Ривер (Австралия), а также Салливан, Кидд-Крик, Фаро, Брансвик в Канаде, Цитронен в Гренландии, Рио-Тинто в Испании, Фалун в Швеции, Ангуран в Иране и многие другие (рис. 1).

Основу мировой минерально-сырьевой базы свинца и цинка составляют колчеданно-полиметаллические месторождения в терригенных и карбонатно-терригенных формациях (SEDEX), колчеданно-полиметаллические в вулканогенных формациях (VMS) и свинцово-цинковые в карбонатных формациях (MVT). Основная часть мировых запасов приходится на месторождения типа SEDEX, запасы месторождений типов MVT и VMS составляют около 20% каждый (Дергачев и др., 2008). При этом более 40% месторождений и около половины ресурсов руды приходится, в основном, на объекты типа SEDEX в докембрийских породах.

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

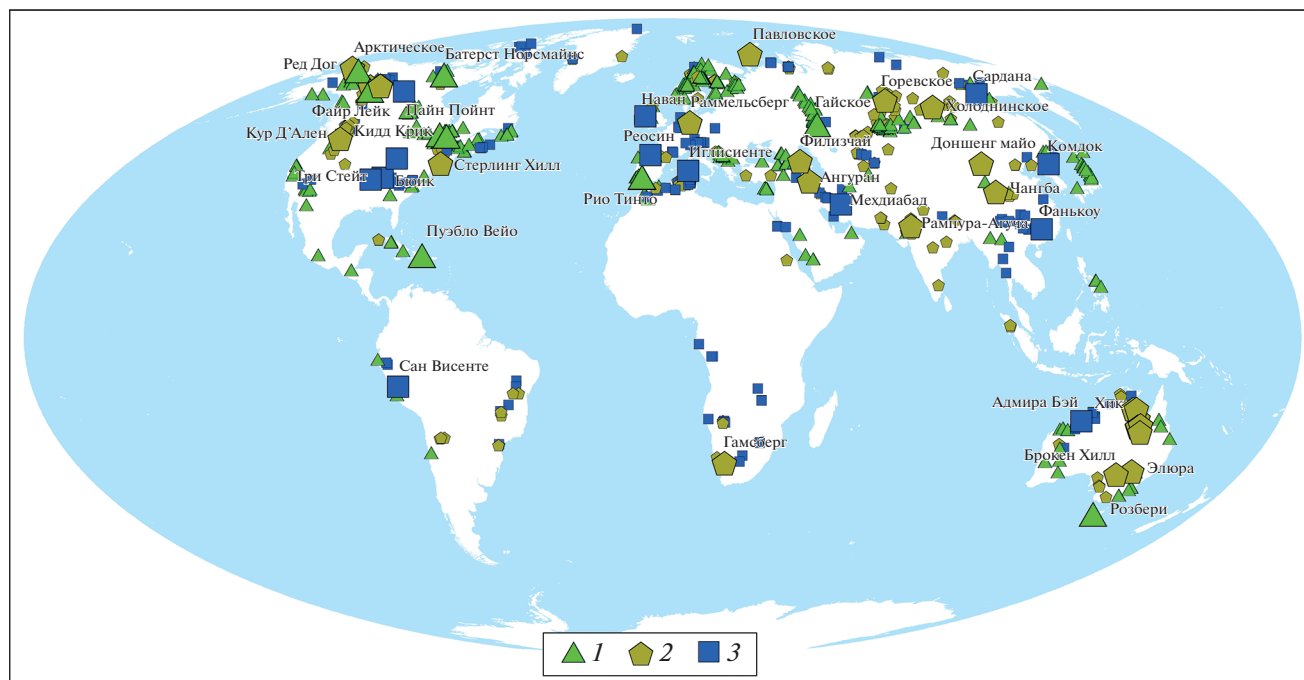


Рис. 1. Полиметаллические месторождения мира.

1 – колчеданные в вулканогенных породах (VMS), 2 – колчеданные в терригенных породах (SEDEX), 3 – стратиформные свинцово-цинковые в карбонатных породах (MVT).

месторождениям полезных ископаемых (Волков и др., 2020). Для этого использовалась глобальная геофизическая модель земной коры модель CRUST1.0, составленная по результатам дистанционных гравитационных измерений из космоса в рамках проекта GOCE.

Цель работы состоит в изучении пространственных соотношений полиметаллических руд и особенностей глубинного строения рудовмещающих блоков земной коры в обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ, а также в пределах пояса Тетис с использованием современных глобальных моделей земной коры и представлений о ее геодинамическом развитии.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ CRUST1.0

В настоящее время накоплен огромный материал по глубинным сейсмическим исследованиям земной коры методами ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование) и МОБ–ОГТ (метод отраженных волн – общей глубинной точки). Метод ГСЗ позволяет определять мощность земной коры, выделять в ее толще сейсмические границы, глубинные разломы и многое другое.

В России в конце прошлого века сейсмическое изучение проводилось в 35 профилях, а также в нескольких профилях МОГТ. Вместе с тем, несмотря на обилие публикаций вдоль локальных

профилей, глобальные обобщения сейсмических материалов ГСЗ и МОБ–ОГТ, полученных на континентах Земли, в настоящее время отсутствуют. Это, зачастую связано с неравномерностью расположения профилей или неравномерностью сети измерений, что препятствует созданию достаточно достоверных крупных площадных и объемных обобщений.

Одной из мощных современных систем дистанционных данных о земной коре, базирующихся на измерениях по равномерной сети, являются результаты космических гравиметрических измерений по проекту GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer). 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 Европейского космического агентства (ESA), сочетающий гравиразведку и GPS-трекинг для определения среднего гравитационного поля Земли с беспрецедентными точностью и пространственным разрешением (Клюйков, 2018). Для обеспечения максимально возможной точности измерений была выбрана весьма низкая орбита – 260 км над поверхностью Земли.

По результатам миссии GOCE была более детально определена форма планеты, измерены сила тяготения в различных регионах и плотность земной коры, была составлена новая глобальная

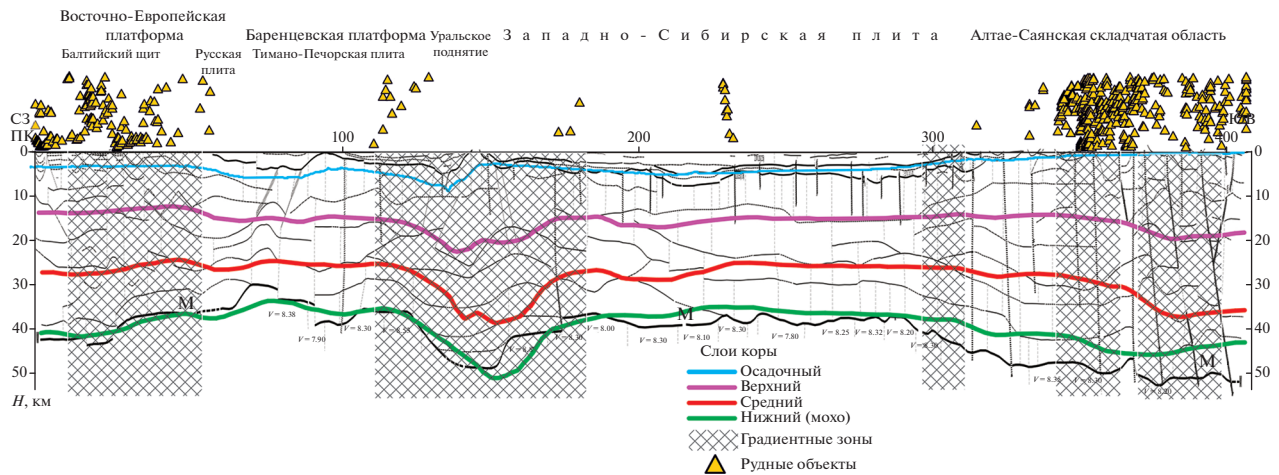


Рис. 2. Размещение месторождений в участках локального утолщения земной коры (модель CRUST1.0 – границы слоев показаны цветными линиями) в створе (200 км) профиля ГСЗ “Мурманск-Кызыл” (по материалам (Егоров, 2015)).

гравитационная карта Земли. Предельное разрешение гравиметрии GOCE составляет 50 км, в целом по многим параметрам разрешение – 100 км. Но аппаратура GOCE дала возможность измерять значения поля по равномерной сети, что позволило построить глобальные модели сейсмоповерхностей, а дополнительные параметры – реологическую модель верхней мантии до глубины 100 км.

Таким образом, полученные гравиметрические данные стимулировали развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии (GEMMA1.0, CRUST1.0), способствовавших пониманию металлогенической специализации крупных рудных районов и провинций. Проект GEMMA (GOCE Exploitation for Moho Modeling and Applications), также финансируемый ESA, на основе полученных GOCE данных выполнил оценку границы между земной корой и мантией (Мохо) (Reguzzoni et al, 2015).

Глобальная модель CRUST1.0 опирается на равномерную одноградусную сеть и является наиболее полной и объединяет данные о глубине Мохо, трехслойного осадочного чехла, а также верхнего, среднего и нижнего слоев консолидированной коры (Laske et al., 2013). Эта модель использовалась нами для объяснения пространственных закономерностей размещения полиметаллических месторождений в структуре земной коры. Кроме того, была использована модель плотности и термального режима верхней мантии (Cammagano et al., 2017).

Для определения степени достоверности модели CRUST1.0 была проведена ее сравнение с глубинами Мохо на трех произвольно выбранных профилях ГСЗ (рис. 2). Сравнение показало, что сходимость глобальной модели с материалами профилей составляет 75–90%, на основании чего

сделан вывод о возможности применения глобальной модели для качественного пространственного анализа.

По данным глубинной модели общая мощность земной коры на континентах колеблется от 16 до 72 км. На около 95% площади всех континентов толщина континентальной коры варьирует в интервале 22–57 км.

Осадочный чехол образует самый верхний слой земной коры (Laske, 2013). Его мощность варьирует от нуля на щитах до более 20 км в глубоких осадочных бассейнах. Породы осадочного чехла часто метаморфизованы и сейсмически неотличимы от кристаллических пород фундамента. Во многих регионах метаморфизованные палеозойские отложения включены в состав верхней кристаллической коры. Верхний горизонт, мощностью до 2 км, представленный наименее плотными и слабо метаморфизованными осадочными комплексами, имеет наиболее широкое распространение (более 500 млн км²), занимая огромные океанические пространства. Его комплексы слагают отдельные глубокие прогибы, приуроченные к нефтегазоносным областям (например, Северо-Тунгусская и Катангская на восточном фесе Сибирской платформы). В целом, в океанических и континентальных осадках этого горизонта гораздо слабее проявлена углеводородная специализация (Map of undiscovered..., 2012).

Нефтегазоносные формации чаще всего приурочены к наиболее глубоким частям осадочной коры, к ареалам развития толщ среднего и нижнего горизонтов. Средний горизонт, мощностью до 4 км, обладает сравнительно меньшим распространением (около 100 млн км²) и охватывает многие углеводородные провинции (Аравийский полуостров, Южная Америка, Западная Сибирь и др.) и их обрамление. Нижний горизонт осадочного

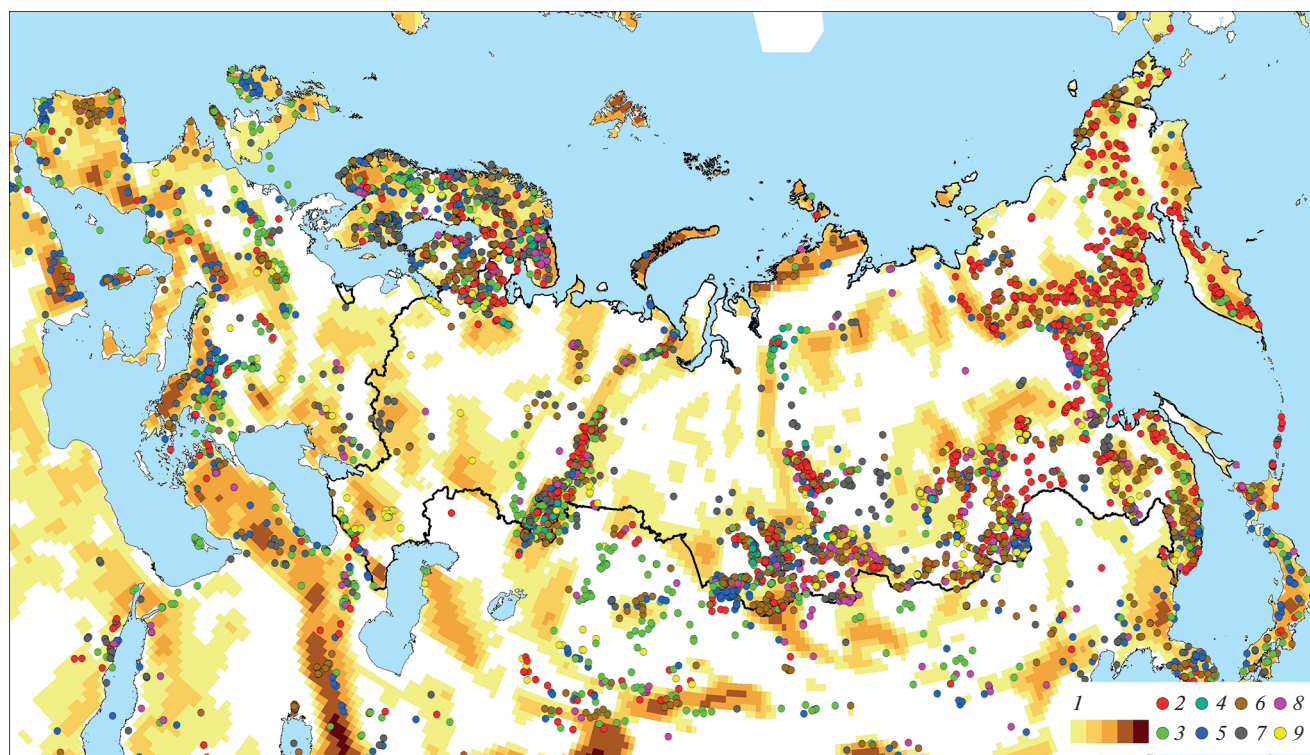


Рис. 3. Локальные утолщения земной коры (1) и размещение рудных месторождений благородных (2), цветных (3 – Cu, 4 – Cu–Ni, 5 – Pb–Zn, 6 – Sn, W и др.) черных (7), редких (8) и радиоактивных (9) металлов (с использованием материалов (Laske, 2013)).

слоя литосферы, менее всего распространенный в мире (менее 20 млн км²), сложен наиболее мощными комплексами (свыше 14 км), к которым приурочены центральные участки крупных углеводородных провинций мира.

Консолидированная кора, согласно модели CRUST1.0, состоит из трех слоев. Верхний и средний слои континентальной коры сложены, главным образом, метаморфическими комплексами, гнейсами, гранитами и гранодиоритами. Граница между верхним “метаморфическим” и средним “гранитным” слоями – часто условная и проходит по разделу скоростей около 6.3 км/с. Нижняя “базальтовая” кора, как считается, сложена породами амфиболитовой фации, хотя не исключено, что нижняя кора может по составу относиться к андезитам и дацитам (Bradley et al., 2015).

Сейсмологические и геолого-геофизические исследования показали, что нижний, средний и верхний слои консолидированной коры невыдержанны по мощности. Деформация слоев коры выражена в виде контрастных выступов и погружений поверхности Мохо, аномальные раздувы и утонения нижней и средней коры. Среди таких глубинных областей выделяются разноранговые и разнотипные по механизму образования геодинамические таксоны. Они связаны с мантийными процессами, с одной стороны, и тектоническими

горизонтальными движениями при взаимодействии литосферных плит и террейнов. Мантийные процессы, являясь триггером геодинамической обстановки в приповерхностной области коры, вызывают в последней новейшие деформации, выраженные поднятиями, прогибами и флексурами.

На сейсмических профилях, в частности, на рис. 2, также отмечается местами резкая изменчивость толщины слоев земной коры. Утолщения, являющиеся структурами второго и более высоких порядков, отражаются на картах в виде полос и отдельных областей (рис. 3), выявляемых путем последовательных расчетов средних значений в скользящем окне. Локальные области увеличенной мощности, проявленные в структуре Мохо, отчетливо распространены по всему миру, часто имеют линейные очертания и, скорее всего, подчеркивают характер взаимодействия плит. Утолщение коры, отраженное в сейсмическом разрезе, показывает только общее *увеличение ее плотностного объема за счет разуплотнения верхней мантии*, вследствие трансформации ее вещества в результате тех или иных процессов.

Локальные утолщения земной коры и ее слоев характеризуются различной степенью изменчивости. Резкая изменчивость часто объясняется блоковым строением разреза, особенностями

рифтогенеза и другими тектоническими и реологическими причинами и выявляется по резкому изменению уклона поверхности Мохо.

Общая пространственная статистика показывает, что в пределах зон локального утолщения коры размещается более половины всех мировых месторождений и проявлений благородных, цветных, редких, черных и радиоактивных металлов (рис. 3). На рис. 2 отчетливо видно, что рудные месторождения в створе профиля, шириной 200 км располагаются преимущественно в участках локального утолщения земной коры и ее слоев, формировавшихся в определенных геодинамических обстановках. Похожая тенденция наблюдается и в приуроченности месторождений к зонам резкой изменчивости мощности коры (рис. 2). Изучение этой закономерности также является задачей исследования.

МОДЕЛЬ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И Pb–Zn МЕСТОРОЖДЕНИЯ СКЛАДЧАТОГО ОБРАМЛЕНИЯ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Сибирская платформа, в целом, характеризуется увеличенной мощностью земной коры (рис. 4). Осадочные и вулканические толщи с проявлениями интенсивного внутриплитного магматизма формируют чехол суммарной мощностью 15–20 км (Егоров, 2015). Структура фундамента Сибирской платформы представлена мегаблоками разной мощности и межблоковыми мегазонами (рис. 4). Наиболее мощные из блоков отмечаются в южном обрамлении кратона – в Восточно-Саянском и Алдано-Становом регионах. В составе мегаблоков фундамента преобладают архейские комплексы метаморфитов гранулитовой и амфиболитовой фаций и вскрываются на дневной поверхности Анабарского и Алдано-Станового щитов. Межблоковые мегазоны (сутуры) заполнены раннепротерозойскими комплексами ювенольной коры (Егоров, 2015).

В строении обрамления платформы выделяются Енисейская, Байкальская, Верхояно-Колымская и Таймырская складчатые области, различные по глубинному строению и соотношениям осадочной и консолидированной коры. Представляется, что эти различия также имели существенное влияние на масштаб и обстановки полиметаллического рудообразования.

Енисейский Кряж. На Енисейском Кряже колчеданные VMS-проявления и колчеданно-полиметаллические SEDEX-проявления пространственно приурочены к утолщенным блокам средней “гранитизированной” коры (рис. 5, б). Раздвиг среднего слоя, скорее всего, связан с аккрецией островных дуг, расслоением призмы и подъемом фельзитового материала в среднюю кору (Bradley

et al., 2015). Возможно, это связано с переходом пассивной континентальной окраины в активную, когда в период 760–720 млн лет формировались коллизионные и постколлизионные гранитоиды, а также с образованием вслед за этим островных дуг в Исаковской и Предивинской зонах (Верниковский и др., 2009). В Исаковской островодужной зоне располагаются медно-колчеданные проявления (Исаковское, Верхне-Кутукасское, Хариузихинское и др.), залегающие в карбонатно-терригенно-вулканогенных толщах.

Одновременно с формированием островных дуг на пассивной континентальной окраине формировались задуговые бассейны и окраинно-континентальные рифтогенные прогибы (Верниковский и др., 2009) с эксгальационными колчеданно-полиметаллическими месторождениями (Горевское, Меркурихинское, Морянихинское, Токминское, Линейное, Зыряновское). Относительно возраста рудной минерализации Горевского месторождения нет единого мнения: учитывая, что руды сформировались, по крайней мере, в период диагенеза, то их возраст соответствует позднерифейскому возрасту вмещающих пород. С другой стороны, данные изотопии свинца секущих гранитов указывают 950–870 млн лет и моложе, тем самым обозначая верхний предел возраста оруденения около 600 млн лет (Стримжа, 2017).

Байкальская складчатая область. В Ленской провинции отмечается приуроченность SEDEX руд к участкам с резко редуцированной и изменчивой мощностью среднего “гранитного” слоя и участкам с утолщенным нижним “базальтовым” слоем (рис. 4, 5, б, 5, в). Это находит свое отражение в мощном базитовом магматизме раннепротерозойского интракратонного рифтогенеза и последующем формировании в среднем рифее (1.6–1.7 млрд лет) коллизионного Аkitканского вулканоплутонического пояса (Мельникова, 2012).

В рифейский период сыннырское рифтообразование на шельфе сопровождалось активизацией мантийных плюмов (Эрнст и др., 2009) и внедрением в Олоkitский прогиб ультрабазитов Йоко-Довыренского комплекса (728 ± 3.4 млн лет) с сульфидной платиноносной Cu–Ni минерализацией (Арискин и др., 2013). В глубоководных и застойных условиях формировались продуктивные рудные ассоциации колчеданно-полиметаллических месторождений (Холоднинское, Овгольское и др.).

Входящие в состав Байкальской системы месторождения барит-флюорит-свинцово-цинкового типа (Таборное, Хибелен, Луговое) не затронуты, в отличие от холоднинских руд, динамометаморфическими изменениями, имеют эпигенетическое происхождение и залегают в средне-позднерифейских терригенно-карбонатных толщах с органогенны-

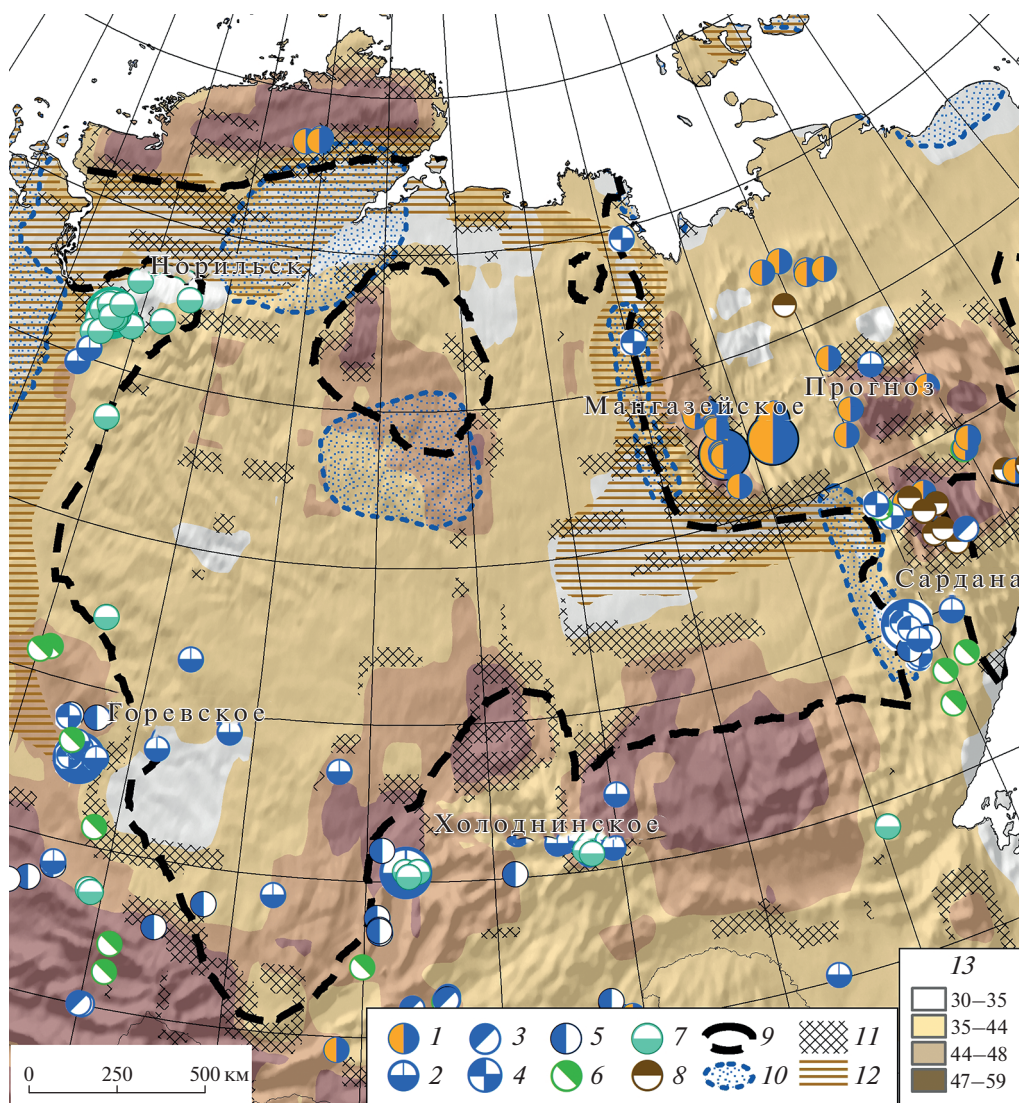


Рис. 4. Размещение полиметаллических месторождений и мощность земной коры в обрамлении Сибирской платформы (по материалам (Laske, 2013)).

1–7 – Типы месторождений: 1 – серебро-полиметаллический, 2 – колчеданно-полиметаллический в терригенных породах, 3 – свинцово-цинковый вулканогенно-карбонатный стратиформный, 4 – свинцово-цинковый стратиформный в карбонатных породах, 5 – свинцово-цинковый жильный, 6 – медно-колчеданный в вулканогенно-осадочных породах, 7 – медно-никелевый платиноносный, 8 – олово-серебро-полиметаллический. 9 – Сибирская платформа, 10 – прогибы осадочной коры; 11 – ареалы изменчивости консолидированной коры, 12 – нефтегазоносные провинции, 13 общая мощность коры (км).

ми постройками и горизонтами битуминозных известняков (Конкин и др., 2018). Рудные тела линзообразной формы содержат вкрапленные и вкрапленно-прожилковые руды. В составе руд главные минералы – сфалерит, галенит, флюорит, кварц, редкие – халькопирит, блеклая руда и буланжерит. В рудах в небольших количествах установлены серебро, олово, вольфрам, мышьяк и висмут.

Приленский металлогенический пояс. Выделяется в пределах Верхоянского складчато-надвигового пояса, формировавшегося с венда по ранний

мезозой на пассивной окраине Сибирского кратона. В состав Приленского пояса включают также стратифицированные серебро-полиметаллические (Мангазейское) и жильные золото-серебряные (Кысылтас) месторождения (Парфенов и др., 2001). Для пояса характерна стратиформная минерализация различного типа и возраста.

Стратиформные свинцово-цинковые месторождения и проявления (MVT и его аналоги) в карбонатных формациях (рис. 4), согласно глобальной модели земной коры приурочены к бор-

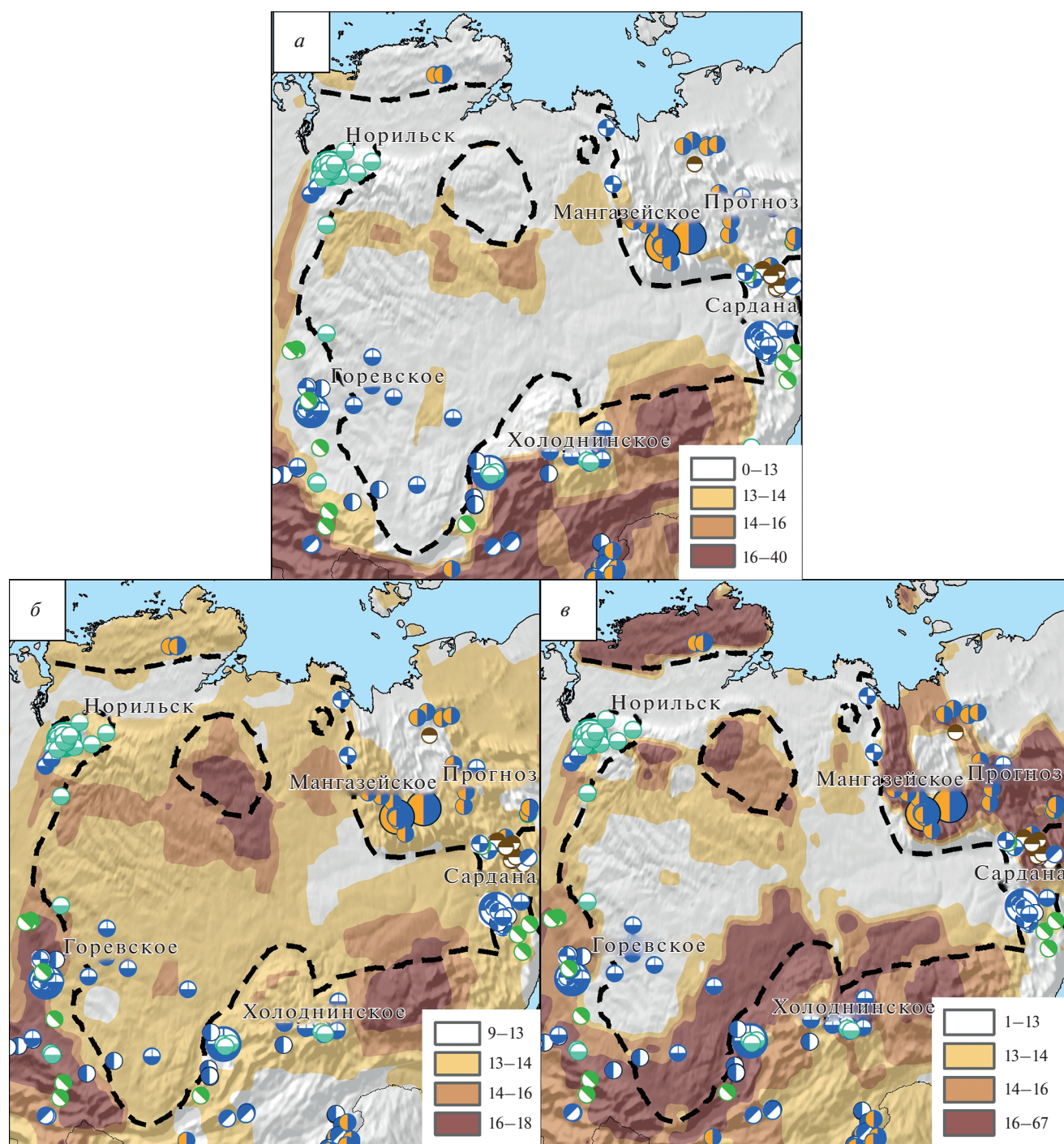


Рис. 5. Позиция полиметаллических месторождений обрамления Сибирской платформы и вариация мощности слоев консолидированной коры (Laske, 2013): *а* – верхнего “метаморфического”, *б* – среднего “гранитового”, *в* – нижнего “базальтового” слоев. Значения мощности представлены в км. Ост. усл. обозн. см рис. 4.

там астеносферных поднятий (Галямов и др., 2020).

Размещение руд MVT-типа, в составе крупных нефтегазоносных бассейнов (Лено-Вилуйская провинция), контролируется аномально глубокими перикратонными прогибами чехла платформы, сло-

женными мощными позднепротерозойскими терригенно-известково-доломитовыми комплексами пассивной континентальной окраины. В этот же период формировались рифтогенные комплексы соседнего Улахан-Бамского региона (Дымович и др., 2012).

Месторождения MVT типа (Сардана, Уруй и Перевальное, проявления Чагдинское, Покосное, Эсэлээхское и Прогнозное, объекты Лугун-Пуханильской группы) распределены в широкой полосе северо-западного простирания, где вендские рудовмещающие доломиты фациально сменяются известняками. Аналогичные проявления стратиформной Pb–Zn минерализации (Менгенилер, Агакукан, Тирехтяхское, Арагочан, Дальнее) распределены в Орулганском и Туора-Сисском поясах, обрамляющем северо-восточный край Сибирской платформы (рис. 4). Пояса сложены рифейскими терригенно-карбонатными толщами и рудовмещающими вендскими доломитами, формировались, как пассивная окраина после неопротерозойского этапа рифтообразования. Возраст MVT-руд обрамления Сибирской платформы недостаточно изучен. О сингенетичном возрасте минерализации могут указывать реликтовые структуры и текстуры руд ранних ассоциаций. Эпигенетический облик руд и вмещающих доломитов связывается с герцинским орогенезом и дистальным воздействием коллизионного магматизма.

Западно-Верхоянская металлогеническая зона. Входит в состав Приленского пояса (Тычинский и др., 1984), являясь частью Верхояно-Колымской покровно-складчатой области. В обстановке растяжения и рифтогенеза со среднего ордовика накапливались платформенные лагунные, авандельтовые отложения Предверхоянского краевого прогиба и позднепалеозойско-раннемезозойские шельфовые отложения верхоянского терригенного комплекса общей мощностью 10–12 км (Некрасов, 2011).

Серебро-полиметаллические месторождения Западно-Верхоянского сектора Верхоянского складчатого-надвигового пояса, представляющие иной тип полиметаллической минерализации, размещаются к востоку от астеносферных поднятий и перикратонных прогибов (рис. 4). Сектор располагается над утолщенной нижней “базальтовой” корой, над участками ее резко изменчивой мощности (рис. 5, в).

Мощный прогиб земной коры Западного Верхоянья формировался за счет локального утолщения нижнего слоя коры, возможно вследствие его расслоения (Pirajno, 2009). В районе Хандыгского блока в строении земной коры отмечается раздвиг нижней коры, что может объясняться длительным воздействием верхней мантии (Гошко и др., 2014). Активность базитового магматизма отразилась в триасе во внедрении межпластовых тел долеритов и образовании покровных базальтов. В обстановке растяжения и рифтогенеза, начиная со среднего ордовика, накапливались платформенные и шельфовые отложения верхоянского

терригенного комплекса общей мощностью 10–12 км (Некрасов, 2017).

В настоящее время большинство исследователей связывает размещение серебро-полиметаллических месторождений Западного Верхоянья (Мангазейского, Прогноз, Кимпиче и др.) с аккреционно-коллизийными событиями, которые обусловили на позднеколлизийном этапе перераспределение сереброносной минерализации ранних стадий в проливаемые зоны разрывных нарушений и трещиноватости (Некрасов, 2017). Месторождения образовались 113–82 млн лет назад (Гамянин и др., 1998). Рудные тела месторождений представлены линзовидными жилами зон рассланцевания, прожилково-штокверковыми зонами вкупольных структурах, жилами и прожилковыми зонами, минерализованными зонами дробления.

По составу минеральных ассоциаций эти месторождения образуют практически непрерывный ряд: Sn–Ag-содержащие – Sn–Ag-полиметаллические – Ag-полиметаллические – Ag–Sb (Некрасов, 2017). По минеральному и химическому составу руд, по морфологии рудных тел эти месторождения сходны с серебро-полиметаллическими проявлениями Таймыроозерского рудного района, выделенного в Южно-Таймырской зоне (Дымович и др., 2012).

Таймырская складчатая область

Геодинамическое развитие Таймырского региона также схоже с аккреционно-коллизийным формированием Западно-Верхоянского сектора. Центральная Таймырская зона полуострова, выступая в качестве Главной сuture между Сибирским кратоном и Свальбардской плитой, сложена аккреционными комплексами (Верниковский и др., 2009). Наличие энсиматической островной дуги и офиолитов свидетельствует о наличии в зоне позднедокембрийской коры океанского типа. Вплоть до венда здесь также развивалась островная дуга с тыловой рифовой грядой, сопровождаемая формированием задугового окраинного бассейна, а Южно-Таймырская зона с венда формировалась в режиме пассивной континентальной окраины (Самыгин, 2018).

Серебро-полиметаллические месторождения Таймыроозерского района представлены кварц-карбонатными жилами, штокверковыми зонами и брекчиями в среднекаменноугольно-пермских терригенных толщах и туфах позднепермского и раннетриасового возраста (Проскурнин и др., 2013). В составе сплошных и прожилково-гнездовых руд с содержаниями серебра 300–800 г/т наблюдаются серебросодержащие галенит, сфалерит и блеклая руда, а также пирит, халькопирит, марказит и пирротин; отмечаются повышенные содержания олова. Сравнение таймырского и за-

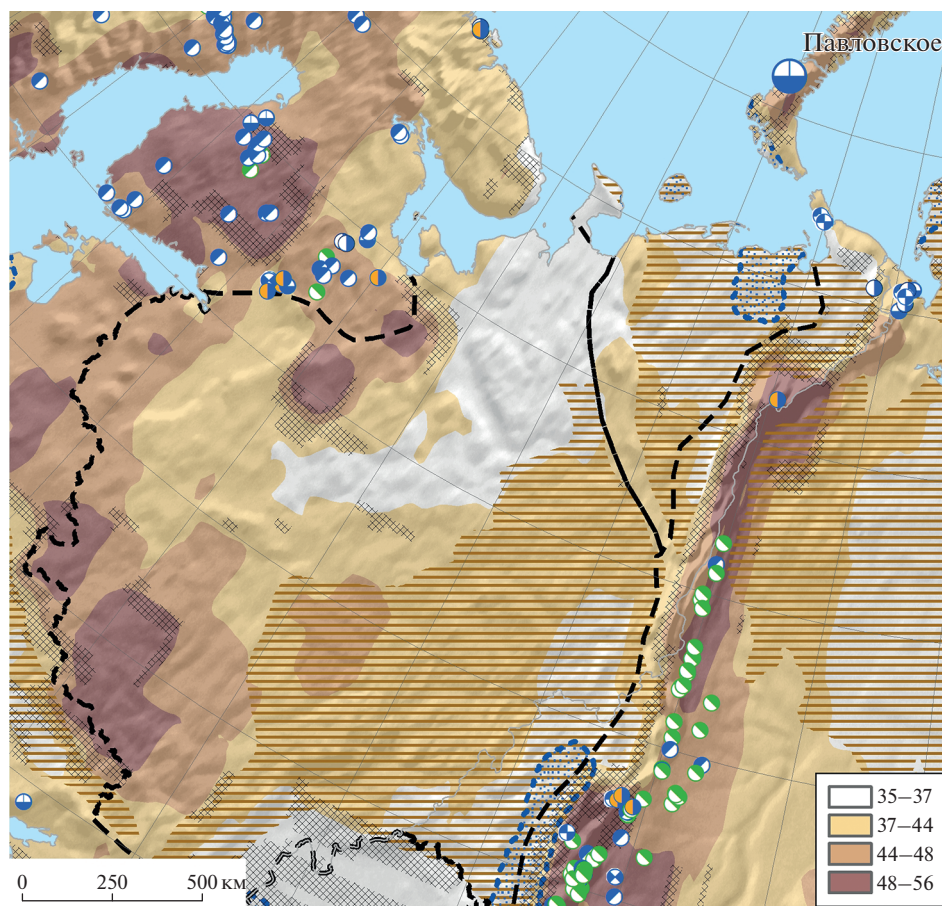


Рис. 6. Размещение полиметаллических месторождений и мощность земной коры (в км) в обрамлении Восточно-Европейской платформы (по материалам (Laske, 2013)). Усл. обозн. см. рис. 4.

падно-верхоянских серебро-полиметаллических объектов показывает, что в составе руд присутствует гораздо большее количество сульфидов свинца, цинка и меди. Наряду с проявлениями медно-никелевой минерализации и щелочного магматизма, это может быть связано с близостью магматических очагов Центрально-Арктического порфинового пояса.

ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКАЯ ПЛАТФОРМА

Восточно-Европейская платформа имеет консолидированную кору мощностью от 30 до 60 км (рис. 6). В составе ее фундамента также выделяются архейские мегаблоки, разделяющиеся межблоковыми зонами раннепротерозойского заложения (Егоров, 2015). На глубинных разрезах ГСЗ выделяются вулканогенно-осадочные комплексы в составе рифейских рифтогенных зон (авлакогенов) и ареалы раннепротерозойских осадочных толщ, а также крутопадающие раннепротерозойские проводящие сутурные зоны.

В складчатом обрамлении Восточно-Европейской платформы среди разновозрастных складча-

то-надвиговых ансамблей выделяют каледониды Балтийского щита, позднедокембрийские складчатые шарьяжи Тимано-Печорской складчатой области, позднепалеозойскую Уральскую складчатую систему.

В обрамлении Восточно-Европейской платформы стратиформные свинцово-цинковые месторождения — в палеозойских комплексах острова Вайгач и Пайхой-Новоземельского региона связаны, а колчеданно-полиметаллические руды — в структурах Урала, на границе с Балтийским щитом полиметаллические руды размещаются преимущественно в аралах зеленокаменных поясов Центральной Карелии. В чехле платформы полиметаллические месторождения имеют слабое экономическое значение.

Уральская складчатая область (УСО). В состав позднепалеозойского мегаорогена аккреционной природы, входят деформированные в результате коллизии блоки окраин кратонов и палеомикроплит и сутурные швы, сложенные островодужными и океаническими комплексами (Егоров, 2004). При структурно-формационном райони-

ровании УСО традиционно определяются протяженные зоны, различные по строению и составу вещественных комплексов.

В строении Урала среди структур внутренней зоны, являющихся деформированным обрамлением Восточно-Европейской платформы, выделяются Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральская и Центрально-Уральская мегазоны. Предуральский прогиб сложен пермскими молассами и рифами, вмещающими нефтегазовые месторождения. В Западно-Уральской складчатой мегазоне распространены шельфовые и склоновые осадки пассивной континентальной окраины, а также надвинутые с востока шарьяжные аллохтоны, состоящие из океанических и островодужных комплексов. Центрально-Уральская мегазона характеризуется выступами докембрийского фундамента и располагается на земной коре повышенной мощности (рис. 6), над участками мощного верхнего “метаморфического” слоя (рис. 7, а).

Полоса повышенной мощности земной коры, протягивающаяся вдоль уральских структур, расширяется на восток, под Тагило-Магнитогорскую, Восточно-Уральскую и, частично, Зауральскую мегазоны (рис. 6), что косвенно коррелирует с восточным субдукционным погружением (Пучков, 2010). Тагило-Магнитогорская мегазона отделена от структур внешней зоны уралид Главным Уральским разломом, в ее пределах развиты палеозойские океанические и субдукционные островодужные комплексы (Пучков, 2010) с многочисленными медно-колчеданными (VMS) и колчеданно-полиметаллическими (SEDEX) месторождениями (Меднорудянское, Чернушинское, Николо-Подгорное, Никитинское, Башмаковское, Ново-Фроловское, Шемурское, Тарньерское, Краснотуринское, Ишеримское, Левихинское, Красногвардейское, Валенторское и др.).

Увеличенная общая мощность коры здесь связана с утолщением среднего “гранитового” слоя коры (рис. 7, б), что соотносится со значительными объемами аккреционных блоков Восточно-Уральской мегазоны, в составе которых преобладают фрагменты докембрийского основания и субдукционных островных и магматических дуг (Пучков, 2010). В комплексах мегазоны распространены колчеданные (Еленовское, Исимбайское, Касаргинское, Пыжминск-Ключевское, Зеленодольское, Биргильдинское, Ягузакское, Сафьяновское, Султановское и др.), а также эпитеральные серебро-полиметаллические месторождения (Николаевское, Осиновское, Западно-Карагайлинское и др.).

На Полярном Урале вскрываются докембрийские комплексы Центрально-Уральской мегазоны, где земная кора отличается увеличенными объемами “метаморфического” и аномально мощным “гранитовым” слоями (рис. 7, а, 7, б).

Здесь известны стратиформные свинцово-цинковые месторождения (Саурейское, Лекын-Тальбейское, Талотинское, Брусничное, Хаара и др.). Руды этого типа залегают в терригенно-карбонатных отложениях - в карбонатных алевролитах и песчаных известняках, переслаивающихся с карбонатными алевросланцами и филлитами.

Пайхой-Новоземельская и Полярно-Уральская складчатые системы, являясь киммерийской северо-западной частью Урало-Монгольского пояса, соединяют Пайхой, о. Вайгач, арх. Новая Земля и Полярный Урал. Единство пайхоид и уралид подчеркивается единой динамической системой, постепенной сменой шарьяжно-надвиговой динамики в полярных областях на транспрессионную в южных (Пучков, 2010). Здесь представлены разновозрастные комплексы всего палеозоя, сложенные морскими, вулканогенными и вулканогенно-осадочными формациями. На юге и западе раннекиммерийские комплексы перекрыты мезозойским осадочным чехлом Тимано-Печорской и Баренцевской плит. Геофизические данные свидетельствуют, что сочленение этих плит со складчатой системой происходит через структуры краевого прогиба и зону фронтальных надвигов.

На материковой части территории Пайхой-Новоземельской зоны крупные свинцово-цинковые месторождения пока не выявлены. Известны десятки проявлений флюорит-полиметаллической минерализации (Крестовское, Водопадное и др.). Имеется среднее свинцово-цинковое Буреданское месторождение флюорит-полиметаллического типа. Все эти проявления свинцово-цинковой минерализации распределены в полосе локально увеличенной мощности среднего и верхнего слоев земной коры. Общая мощность коры здесь составляет 32–42 км (рис. 6), в основном, за счет верхнего “метаморфического” (~15 км) и среднего “гранитового” (менее 12 км) слоев коры (рис. 7, а, 7, б), что отличается от полярного сегмента УСО, где толщина среднего “гранитового” слоя коры превышает 17 км, при той же мощности земной коры.

Общая мощность земной коры о. Вайгач варьирует около 38 км, за счет толщины верхнего “метаморфического” и среднего “гранитового” слоев (рис. 7, а, 7, б). В силурийских и ранне-девонских карбонатных толщах острова известны стратиформные свинцово-цинковые месторождения Вайгачского флюорит-полиметаллического рудного района (Раздельное, Пайготинское, Талата-Сале, Красное).

Севернее на Южном острове арх. Новая Земля в Саханинском флюорит-полиметаллическом рудном районе, выявлены десятки проявлений прожилково-вкрапленных флюорит-полиметаллических руд. Этот район является продолжением

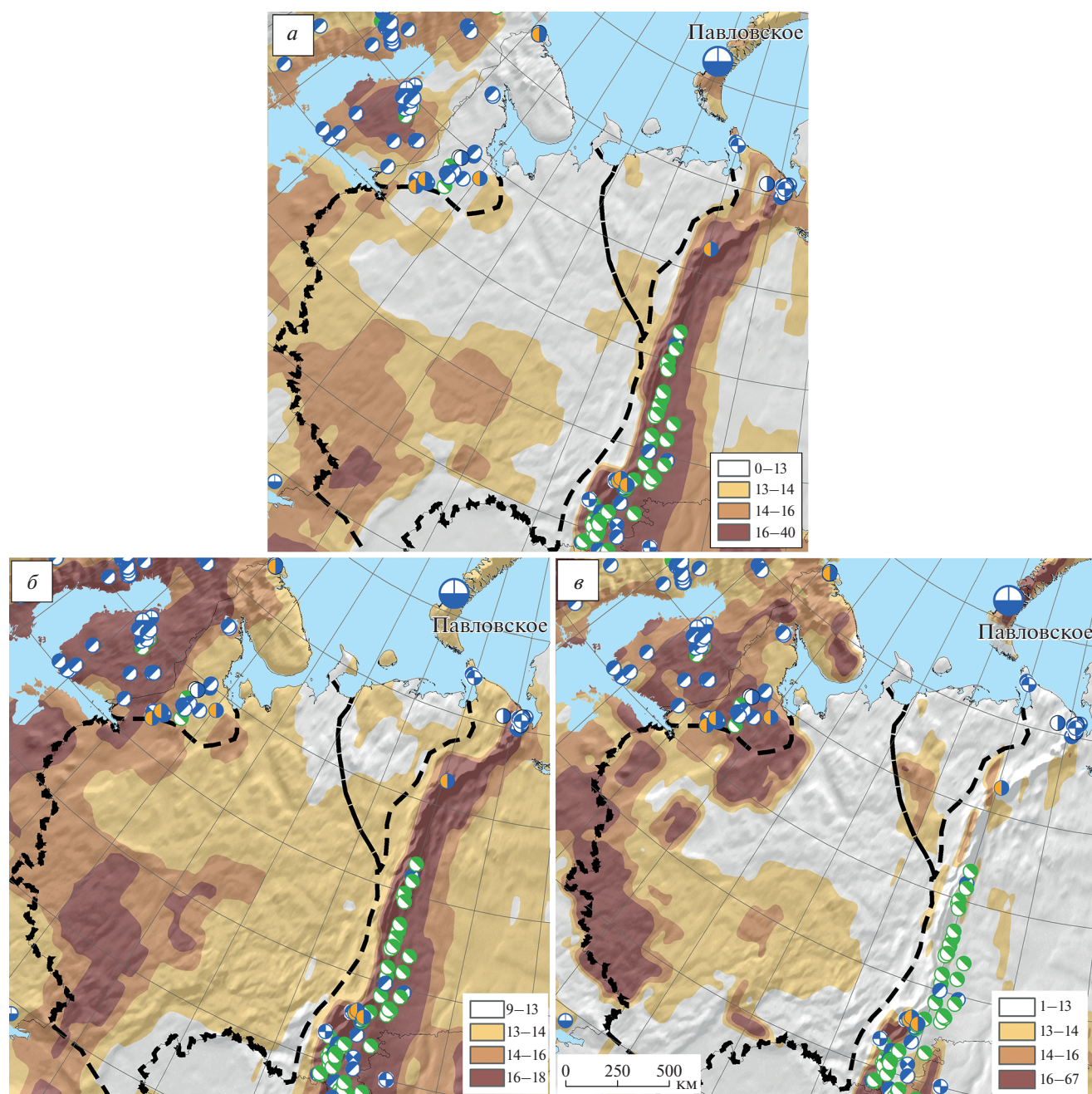


Рис. 7. Позиция полиметаллических месторождений обрамления Восточно-Европейской платформы и вариация мощности слоев консолидированной коры (Laske, 2013): а – верхнего “метаморфического”, б – среднего “гранитового”, в – нижнего “базальтового” слоев. Значения мощности представлены в км. Ост. усл. обозн. см. рис. 4.

ем Вайгачского рудного района. В северной части Южного острова на крупном свинцово-цинковом Павловском месторождении залегают богатые руды SEDEX типа, причем его рудное поле располагается над участком земной коры общей мощностью 43–47 км, достигающей местами 50 км (рис. 6), в основном из-за увеличенной толщины нижнего “базальтового” слоя коры в 19 км (рис. 7, в). В том же районе в терригенно-карбо-

натных толщах известны проявления этого типа (Северное, Перья, Промысловое, Пиритовое, Дайковое и Первальное).

Тимано-Печорская плита характеризуется мощностью литосферы 200–250 км со стороны ВЕП (38 км – Мохо) и 80–120 км (36 км – Мохо) на флангах Приполярного Урала (Егоров, 2015). В строении плиты в металлогеническом аспекте выделяется Тиманский кряж, как рифтогенная

структура рифейской пассивной “балтийской” континентальной окраины. Общая мощность земной коры здесь составляет около 40 км, выходы палеозойских терригенно-карбонатных формаций пространственно совпадают с продольной зоной утолщения нижнего “базальтового” слоя коры (рис. 7, в).

Тиманский кряж сложен рифейскими и палеозойскими терригенными, терригенно-карбонатными и терригенно-вулканогенными породами (Пармузин и др., 2015). На севере кряжа развиты терригенно-карбонатные формации рифея и верхнего силура. В южной части рифейские и позднепалеозойские терригенно-карбонатные толщи часто закарстованы.

Из значимых металлических полезных ископаемых здесь известны месторождения бокситов, титана, РЗЭ (Пармузин и др., 2015). Медное оруденение представлено проявлениями Косминское, Заводское, а также рядом пунктов минерализации, связанными с терригенными отложениями верхнего девона и тремя пунктами минерализации, приуроченными к базальтам. Полиметаллическая минерализация Ворыквинского рудного поля, приурочена к углеродисто-карбонатным породам и представлена проявлениями Водораздельным, Глубоким и другими, где сфалерит-галенитовая минерализация связана с кальцитовыми прожилками в зонах брекчирования. Для руд характерно повышенное содержание серебра.

Карельский кратон. В северо-западном обрамлении Восточно-Европейской платформы в аспекте проявления полиметаллического оруденения привлекает внимание металлогения Центрально-Карельского региона. Среди зеленокаменных поясов на его территории Ведлозерско-Сегозерская структура характеризуется сравнительно высокой насыщенностью рудными проявлениями различных рудноформационных типов (Рыбаков и др., 1999; Максимов и др., 2015). Среди полиметаллических проявлений наиболее распространены типы: колчеданно-полиметаллический золотосодержащий в вулканогенных толщах лопия (Нялмозеро, Хаутаваара, проявления Корбозеро, Суглампи, Эльмус и др.), свинцово-цинковый золото- и серебросодержащий в метасоматитах и кварцевых, карбонат-барит-кварцевых жилах (проявления Южное, Кориолан-Коланус, Случайное, Колос, Юго-Коски и др.), колчеданно-полиметаллический в карбонатно-сланцевых породах (проявление Коват-Ярви). В регионе также известны медно-молибден-порфировые (Лобаш-1), золото-сульфидные (Педролампи), медные в сульфидизированных метасоматитах зон дробления (пр. Эльмус, Новые Пески), медно-никелевые в ультрабазитах (проявление Хюрсюля), а также жильные золото-кварцевые и золото-сульфидно-

кварцевые (проявление Центрально-Хаутаваарское) объекты.

Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс имеет субмеридиональное простирание и протяженность более 300 км, состоит из локальных зеленокаменных структур (Хаутаваарская, Койкарская, Семченская и др.). Его развитие связано с разноэтапными островодужными, океаническими и окраинно-континентальными геодинамическими обстановками, в сопровождении субдукционных и последующих коллизионно-аккреционных процессов на активной протоконтинентальной окраине (Светов и др., 2005).

Общая мощность земной коры в пределах зеленокаменного пояса несколько увеличена и составляет около 47 км (рис. 6), что напрямую соотносится с локальным утолщением (до 21 км) нижнего “базальтового” слоя (рис. 7, в). Наибольшее утолщение этого слоя до 24 км, при общей мощности коры 52 км, отмечается к юго-востоку под платформенным чехлом в области Прионежской моноклинали. Здесь в состав раннепротерозойских комплексов входят многочисленные силлы габбро-долеритов ропручейского плутоногенного комплекса в супракrustальных терригенных толщах (Максимов и др., 2015). Это согласуется с представлениями об первичном образовании расплавов андезибазальтовой ассоциации при плавлении мантийного клина в ходе субдукции океанической коры. Дальнейшее взаимодействие расплавов с коровым материалом обусловило формирование палингенных магм андезидацитового, дацитового и риолитового состава (Светов и др., 2005).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно традиционным представлениям формирование колчеданных месторождений VMS типа обусловлено мощным подводным контрастным вулканизмом в островодужных структурах и базальтоидным – в рифтогенных прогибах континентальной окраины. Эксгальационные Pb–Zn руды (SEDEX) формировались в интра- и перикратонных рифтогенных прогибах на пассивной континентальной окраине. Эти руды часто залегают в терригенных и карбонатно-глинистых формациях и несут в текстуре руд признаки сингенетического и/или диагенетического отложения из теплых соленых рассолов (100–200°C), которые выходили в придонное пространство по конседиментарным разломам. При этом, оруденение может быть связано с глубинными источниками в обстановках регионального растяжения (Zappettini et al., 2017). Руды на месторождениях MVT типа имеют эпигенетический облик, залегают в субплатформенных карбонатных комплексах в связанных с углеводородами интракратонных и перикратонных бассейнах пассивной окраины. Рудные тела стратифицированы в соответствии с осо-

бенностями литологических свойств вмещающих пород. Сульфиды отлагались из низкотемпературных металлоносных рассолов из коровых источников на разных этапах развития пород (от диагенеза до катагенеза) в виде замещения пород и заполнения карстовых пространств.

Пространственная статистика размещения полиметаллических месторождений указывает на две типовые обстановки. Первая характеризует приуроченность колчеданно-полиметаллических проявлений VMS и SEDEX типов, а также серебро-полиметаллических месторождений к участкам локального утолщения консолидированной коры (рис. 4, 6). Вторая обстановка соотносится со стратиформными полиметаллическими месторождениями миссисипского типа (MVT) в платформенных и субплатформенных карбонатных формациях, которые формировались в связанных с углеводородами интракратонных и перикратонных бассейнах (Leach et al., 2005) и пространственно связаны с глубокими прогибами неморфизованного осадочного чехла.

Утолщение земной коры, причины и следствия. Главными причинами увеличения объема земной коры являются: тектоническое взаимодействие плит и термохимическое мантийное воздействие, сопровождающиеся магматизмом, андерплейтингом и расслоением коры и мантии. Основным следствием утолщения коры являются расслоение, конвекция, метасоматоз и последующее разуплотнение коры и верхней мантии, что соответственно отражается в виде утолщения на сейсмических разрезах.

Тектоническое утолщение земной коры обычно связывается с коллизионными процессами при столкновении, субдукции плит и т.п. (Исаковская зона Енисейского кряжа, палеозойские уралиды). При коллизии отмечают почти удвоение мощности земной коры, что выражается в рельефе интенсивными поднятиями (Уральская система, Алтае-Саянская и Байкало-Патомский складчатые области).

В результате орогенного утолщения коры происходит ее термическая эрозия (Zhang, 2007) и деламация, при которой нижняя “базитовая” кора и подстилающая ее литосферная мантия распадаются на блоки различной плавучести, более плотные из которых опускаются в астеносферу (Houseman et al, 1997; Pirajno, 2009; Bradley et al., 2015). Это приводит к быстрому компенсирующему подъему менее плотной астеносферной мантии с последующим декомпрессионным плавлением (Луцицкая, 2014), базитовым андерплейтингом, частичным плавлением материалов нижней коры (Pirajno, 2009; Artemieva et al., 2012) и внутриплитным базальтовым магматизмом (Mo et al., 2007). Все это приводит в общему разуплотнению коры и утолщению в сейсмическом отоб-

ражении. Об этом свидетельствуют результаты геофизических исследований, согласно которым установлено разуплотнение коры и верхов мантии под Центральным Тянь-Шанем, что связывается с ретроградным метаморфизмом пород (Современная геодинамика..., 2005). Понижение скорости сейсмических волн за счет разуплотнения наблюдаются также под горными областями (Тибет, Кавказ, Карпаты и Альпы).

Мощность “гранито-гнейсовой” коры также может быть увеличена за счет аккреции и магматизма в ходе коллизионного орогенеза (Artemieva et al., 2012). Это находит отражение в существовании мощной “кислой” средней коры под деформированными Исаковской и Предивинской зонами на Енисейском Кряже (рис. 5, б).

В пределах Уральской системы основной этап тектонического разрастания верхнего и среднего слоев коры (рис. 7, а, 7, б) связан, в первую очередь, с ее ранне-среднепалеозойской субдукцией и формированием островных дуг. С вулканогенными комплексами субдукционных и надсубдукционных обстановок связана большая часть колчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождений Урала. Последующая в каменноугольное время коллизия континентов продолжила деформационную историю наращивания мощности коры уралид, определила коллизионный магматизм и связанные с ним процессы минералообразования, что определило общий облик Уральской складчатой системы и ее металлогении.

Утолщение коры при мантийном воздействии сопровождается диапиризмом астеносферы (Мазукабзов и др., 2011), базификацией (в понимании акад. В.В. Белоусова) и эклогитизацией (Павленкова и др., 2016). Мощность коры увеличивается и при формировании крупных изверженных провинций (Artemieva et al., 2012). Толщина земной коры в пределах провинций составляет в среднем около 40 км, при этом нижняя кора в связи с мощным базальтовым магматизмом имеет увеличенную мощность (20 км), иногда за счет сокращения вышележащего “гранито-гнейсового” слоя.

Следствием утолщения, расслоения и разуплотнения земной коры является рифтогенез (Pirajno, 2009), с развитием которого связывают формирование многих месторождений (карлинского, стратиформного, эпитептермального и других типов). В целом же, рифтогенез характеризуется также утонением среднего “кислого” слоя и утолщением “базитового” слоя земной коры (Artemieva et al., 2019).

Рифтогенез и полиметаллические месторождения. Приуроченность полиметаллических SEDEX- и серебро-полиметаллических месторождений к областям задугового и континентально-окраинного рифтогенеза - наиболее распространенное явление

ние в обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ. При этом для рифтогенных областей выделяются два типовых соотношения среднего и нижнего слоев коры: 1) локальное утолщение среднего слоя и 2) локальное утолщение нижнего слоя.

Первый тип встречается в строении Уральской и Енисейской системы. Здесь такое соотношение связано, скорее всего, с близостью рифтогенных областей к зоне субдукции и обдукции. На Урале субдукционный островодужный процесс определял в девонский период задуговой спрединг, рифтогенез и формирование офиолитов. Зрелая стадия развития островных дуг Урала приходится на фамен, а их отмирание и разрушение — на ранний карбон, с началом крупных коллизионных событий (Пучков, 2000). Именно эти события, как предполагается, обусловили разрастание объемов “гранито-гнейсового” слоя коры (рис. 7, б). При этом, на объем нижней “базитовой” коры эти процессы никакого видимого влияния не оказали (рис. 7, в). Аналогичная картина отмечается на Енисейском Кряже. Разрастание коры увязывается с субдукционными, обдукционными и островодужными процессами (рис. 5, в). Рифтогенез, сопровождаемый базитовым магматизмом, проявлен только в Вороговском и Тейско-Чапском прогибах. В Большепитской зоне, где в вулканогенно-терригенных и терригенных толщах залегают колчеданно-полиметаллические руды SEDEX (Горевское и др.) рифтовый магматизм развит намного слабее.

Второй тип соотношений — утолщение нижней “базитовой” коры наблюдается, в основном, в широких областях спрединга и рифтогенеза континентальной окраины.

Наиболее древний рифтогенез проявлен на северо-западном сочленении Восточно-Европейской платформы и Балтийского щита, где в беломорском чехле Русской платформы развиты надрифтовые прогибы (авлакогены), а в фундаменте Карельского кратона — многочисленные зеленокаменные пояса среди серых гнейсов архей-раннепротерозойского возраста (Балуев, 2013). Геохимические особенности указывают на происхождение гнейсов из гранатсодержащих базитов, а зеленокаменные пояса сложены, в основном, толеитовыми базальтами и коматиитами (Голубев и др., 2007). Зеленокаменные пояса, к которым приурочены колчеданно-полиметаллические руды, часто с золотом и медью, относятся к древним континентальным рифтогенным структурам с риодацит-андезитовым и дацит-андезит-базальтовым вулканизмом. Именно под этими ареалами отмечается локальное утолщение “базитового” слоя коры (рис. 7, в). В отношении металлогении скрытого под чехлом оруденения перспективной может являться амагматичная бе-

ломорская палеорифтовая система (Балуев и др., 2021).

В Северном Прибайкалье развитие поздне-рифейских островодужных структур и задуговых комплексов с SEDEX-рудами и медно-никелевой минерализацией связано с аккреционно-коллизионными событиями в условиях подъема мантийных диапиров (Владимиров и др., 2011), что отразилось в развитии ультрабазитового магматизма и массивном утолщении нижней “базитовой” коры. Субдукционные вендские процессы здесь проявились в Муйской зоне на значительном расстоянии от рифтогенных зон Олоkitского прогиба с проявлением внутриплитного магматизма. Средняя кора под Олоkitским прогибом редуцирована, но имеет увеличенную мощность в районе Чуйского и Тонодского выступов, где проявлен нижнепротерозойский гранитоидный магматизм, а также южнее в Делюн-Уранской дуге Муйской зоны.

Девонский окраинно-континентальный рифтогенез территории Безымянского рудного узла арх. Новая Земля характеризуется покровными базальтами и базитовым внутриплитным магматизмом (рейская свита), рядом которыми в терригенно-карбонатных толщах с органогенными постройками (грибовская свита) вскрываются богатые SEDEX-руды Павловского месторождения и других проявлений этого типа. Рудоносная территория располагается на коре с увеличенной мощностью нижнего слоя до 19 км (рис. 7, в). В южной оконечности Новоземельского террейна мощность нижней коры уменьшена до 13 км, а на о. Вайгач и Пайхое, где свинцово-цинковые проявления представлены преимущественно стратиформными рудами в субплатформенных терригенно-карбонатных породах — до 9 км. Эта разница указывает на существенное различие в глубинном строении коры Пайхой-Новоземельского складчатого пояса на бортах Кармакульской седловины, разделяющей его на Южно- и Северо-Новоземельский антиклинории. Кармакульская седловина, заполненная турбидитовыми комплексами, вероятно, унаследовала крупную разрывную зону в пределах Байдарацкой зоны глубинных разломов.

На Таймыре рифтогенез проявился в поздне-рифейско-вендское время (Верниковский, 1996) и предшествовал формированию Центрально-Арктического медно-порфирового пояса. Последующая коллизия Сибирского и Карского континентов обусловила сжатие, утолщение коры и ее деламинацию. Это привело к формированию в начале триаса крупных рифтогенных структур на утолщенной нижней коре (рис. 5, в). В Южно-Таймырской зоне в терригенных толщах и туфах поздне-пермского и ранне-триасового возраста отлагались серебро-полиметаллические руды. При

этом, влияние Центрально-Арктического порфирового пояса проявилось в колчеданно-полиметаллической, медно-никелевой, ртутной, сурьмяной и флюорит-баритовой минерализации.

Что касается Западно-Верхоянского металлогенического сектора, его рифтогенная природа обусловлена крупной областью внутриплитной коллизии Верхоянского палеобассейна (Некрасов, 2011). В связи с удаленностью от субдукционных зон Охотско-Чукотского пояса, коллизионная нагрузка пришлась на значительный объем литосферы, что привело к ее многоуровневой горизонтальной расслоенности в области наиболее глубоких частей Верхоянского и Яно-Охотского прогибов, где отмечается значительное утонение нижней коры (рис. 5, в). Сплошность коры здесь в позднепалеозойско-мезозойский период нарушалась только рифтогенезом (Некрасов, 2011). Расслоенность литосферы привела к разобщению рифтогенеза на отдельные различные по характеристикам процессы, что и определило зональное размещение в Верхоянском и Яно-Охотском прогибах различных минерогенических провинций с серебросодержащими рудами с различной специализацией (Sb, Pb, Hg, Sn, Au—Ag, полиметаллы, в т.ч. и колчеданные руды). Под Западно-Верхоянским сектором с наиболее богатыми сереброполиметаллическими рудами отмечается более мощная нижняя кора (рис. 5, в), что может указывать на значительные и долгоживущие объемы источников сереброносных флюидов.

Таким образом, приуроченность эксгальационных полиметаллических месторождений SEDEX типа с палеорифтовыми структурами связана с процессами взаимодействия нижнекорового и мантийного флюидного материала за счет даламинации и мантийной конвекции. С другой стороны, колчеданные VMS-проявления в вулканогенных породах связаны с верхне- и среднекоровыми рудоносными флюидами, которые в результате субдукции и орогенеза, последующего утолщения коры, ее даламинации и метасоматоза являются продуктом взаимодействия мантийно-нижнекорового и средне-верхнекорового вещества. Все это, в принципе, не противоречит устоявшимся представлениям об общности обстановок и механизма образования руд этих типов, как членов непрерывного ряда.

Осадочный чехол и стратиформные Pb—Zn месторождения. Месторождения миссиссипского и аналогичного им типа, в отличие от VMS и SEDEX, формировались из источников, имеющих весьма сложную историю. Как показывает пространственный анализ, формирование руд связано не с динамичным взаимодействием плит, не наблюдаются какие-либо закономерности в размещении руд относительно соотношения слоев коры. Скорее всего, формирование этих руд определялось

тектонической и метасоматической трансформацией рудовмещающих толщ субплатформенного чехла.

В размещении MVT руд, согласно современным представлениям, имеются следующие основные закономерности. Во первых, руды локализованы на флангах формировавшихся в режиме пассивной окраины интра- и перикратонных бассейнов с терригенно-карбонатным осадконакоплением (Leach et al., 2005) с углеводородной специализацией. На восточном фланге Сибирской платформы Кыллахская провинция со стратиформными месторождениями сарданского подтипа и Туора-Сисская зона с проявлением Мэнгэнелэр располагаются в пределах Лено-Вилуйской нефтегазоносной провинции (рис. 4). Пайхойские и полярноуральские стратиформные месторождения (Талата-Сале, Пайготинское, Саурей и др.) располагаются на восточном фланге Тимано-Печорского бассейна (рис. 6). Башкирские стратиформные проявления свинца и цинка Кужинское и Аршинское — на восточном борту Волго-Уральского бассейна.

Во-вторых, месторождения тяготеют к глубоким прогибам в верхнем слое осадочной неметаморфизованной коры. Это отчетливо наблюдается в Приленском полиметаллическом поясе на восточной окраине Сибирской платформы, где прогибы соответствуют положению Кыллахской провинции и Туора-Сисской зоне (рис. 4). В Башкирском синклинии в раннерифейских терригенно-карбонатных формациях, накапливавшихся в глубоком прогибе в условиях шельфового бассейна пассивной окраины (Пучков, 2000) размещаются единичные, близкие к миссиссипскому типу стратиформные барит-полиметаллические объекты (рис. 6).

На Полярном Урале в глубоких прогибах эпиплатформенных бассейнов (современная Байдарская губа), сложенных кембрийскими и ордовикскими терригенно-карбонатными толщами, формировались стратиформные барит-полиметаллические месторождения (Саурейское, Косьюнское, Хаара, Надежда и др.). На Пайхое размещение стратиформных полиметаллических с баритом и флюоритом месторождений Пайхойского поднятия и о-ва Вайгач (рис. 6) в ранне-среднепалеозойских образованиях, также контролировалось глубокими осадочными бассейнами на пассивной окраине.

Общий пространственный анализ показывает, что ареалы проявления MVT-оруденения располагаются в областях уменьшенной общей плотности мощности земной коры, что можно объяснить снижением термохимической активности коры и эклогитизацией ее нижних горизонтов. В этих обстоятельствах усиливается процесс погружения коры и формирования океанических

Таблица 1. Типовые соотношения слоев земной коры и геодинамические режимы в обрамлении Сибирской и Восточно-Европейской платформ

Соотношение слоев земной коры	Утолщенный средний "гранитный" слой коры	Утолщенный нижний "базальтовый" слой коры	Астеносферные выступы в обрамлении платформы
Геодинамические режимы	Надсубдукционные и аккреционные обстановки	Рифтогенез на пассивной окраине и в тыловых зонах островных дуг активных окраин	Перикратонные прогибы платформенного чехла с углеводородной специализацией
Механизм массообмена "мантия-кора"	Субдукция и расслоение переносит материал коры в мантию, наращивание континентальной коры	Мафический магматизм мантии переносит материал мантии вверх и участвует в росте новой коры.	
Глубинность источников металлов	Средняя и нижняя кора	Мантия – нижняя кора	Осадочная кора
Рудно-формационный тип месторождений	Колчеданно-вулканогенные VMS месторождения	Колчеданные SEDEX месторождения и серебро-полиметаллические руды.	Pb–Zn месторождения MVT в карбонатных породах

впадин со слабым рифтогенезом. В этих условиях наложенные преобразования осадочных пород ограничены аутометасоматозом, стратиформное свинцово-цинковое рудообразование происходило с вовлечением углеводородов в механизм миграции и разгрузки рудоносных флюидов. Длительные и последовательные наложенные преобразования руд и вмещающих пород определили эпигенетический облик руд и метасоматических образований. Согласно недавним результатам исследований на китайских месторождениях SEDEX- и MVT – типа (Zhou et al., 2022), источником серы в SEDEX рудах была морская вода, а в MVT рудах – катагенетические элизионные растворы. Источником металлов для SEDEX руд служили, в основном, породы глубинного фундамента, а для MVT руда – вмещающие осадочные толщи. Рифтогенез обуславливал возникновение конседиментационной SEDEX минерализации, а формирование MVT руд на малоглубинных уровнях земной коры определялось орогенезом.

Таким образом, по соотношению мощностей слоев земной коры выделяются три типовые обстановки размещения полиметаллических месторождений (табл. 1, рис. 5, 7): 1) надсубдукционные и задуговые рифтогенные области локального утолщения среднего "гранитного" слоя земной коры (Енисейский кряж, Уральская система), 2) рифтогенные структуры пассивной окраины с преимущественным развитием нижнего "базитового" слоя коры (Байкальская складчатая область, Западное Верхоянье, Таймыр, арх. Новая Земля, сочленение Восточно-Европейской платформы и Балтийского щита) и 3) перикратонные прогибы с субплатформенными нефтегазоносными комплексами над астеносферными поднятиями (восточный фас Сибирской платформы, Пайхой и Полярный урал).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственный анализ размещения Pb–Zn месторождений в складчатом обрамлении Сибирской и Восточно-Европейских платформ и сравнение геодинамических обстановок их формирования указывает на следующие закономерности:

1. На территориях с преимущественным развитием нижнего "базитового" слоя земной коры (Байкальская, Таймырская, арх. Новая Земля, Западно-Верхоянская системы) наиболее часто встречаются осадочно-эксталяционные полиметаллические и серебро-полиметаллические месторождения. Отлагавшиеся близкоодновременно с вмещающими породами SEDEX-руды тесно связаны с рифтогенными обстановками базитового вулканизма активной и пассивной континентальной окраины, с глубинными источниками флюидов нижнекорового и верхнемантийного уровня.

При этом, по соседству с ними часто отмечается рудная минерализация, связанная с ультрабазитами (медно-никелевая и др.) в областях рифтогенеза на пассивных континентальных окраинах и ареалах внутриплитного магматизма.

2. Колчеданные медные и свинцово-цинковые месторождения размещаются в, основном, в надсубдукционных островодужных и аккреционных обстановках на консолидированной коре с преимущественным развитием среднего "гранитового" слоя (Енисейский кряж, Уральская система). Проявления оруденения SEDEX-типа также имеют место в этих обстановках, в связи с придонной флюидной активизацией, связанной с островодужным вулканизмом.

3. Стратиформные свинцово-цинковые руды MVT-типа тесно связаны с перикратонными глубокими осадочными нефтегазоносными бассей-

нами на шельфе и континентальном склоне (Приленский полиметаллический пояс, Приуральский прогиб, Пайхой). При этом, их пространственная связь со стратификацией земной коры не наблюдается. В обрамлении платформ руды этого типа формировались в карбонатной вмещающей среде в осадочных бассейнах с углеводородной специализацией в течение длительного времени, что определяет полихронность их генезиса и эпигенетический облик руд.

4. Следует отметить сходство геодинамических обстановок размещения серебро-полиметаллических месторождений Таймыра и Западного Верхоянья, которые приурочены к глубоким перикратонным рифтогенным прогибам на пассивной континентальной окраины и могут быть объединены в единый серебро-полиметаллический Таймыро-Западно-Верхоянский пояс.

Несмотря на множество исследований гидротермальных рудообразующих процессов, важной задачей, по-прежнему, остается выявление механизма взаимодействия вещества коры и мантии и эволюция флюидов при продвижении от источников до области рудообразования.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 13.1902.21.008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Арискин А.А., Костицын Ю.А., Конников Э.Г. и др. Геохронология Довыренского интрузивного комплекса в неопротерозое (Северное Прибайкалье, Россия) // Геохимия. 2013. № 11. С. 955–972.
- Балуев А.С. (2013) Континентальный рифтогенез Севера Восточно-Европейской платформы в Неоге: геология, история развития, сравнительный анализ. // Дис. докт. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН. 326 с.
- Балуев А.С., Колодяжный С.Ю., Терехов Е.Н. Сравнительная тектоника палеорифтовой системы Белого моря и других систем континентального рифтинга // Литосфера. 2021; 21(4): 469–490.
- 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. Т. 58. № 2. С. 97–119.
- Верниковский В.А. Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области // РАН, Сиб. отд., Объед. ин-т геологии, геофизики и минералогии. Научный ред. академик Н. Л. Добрецов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. 202 с.
- Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Матушкин Н.Ю., Метелкин Д.В., Советов Ю.К. Геодинамическая эволюция складчатого обрамления и западная граница Сибирского кратона в неопротерозое: геолого-структурные, седиментологические, геохронологические и палеомагнитные данные // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 4. С. 502–519.
- Владимиров А.Г., Владимиров В.Г., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Бабин Г.А., Травин А.В., Колотилина Т.Б., Хромых С.В., Юдин Д.С., Кармышева И.В., Корнева И.Б., Михеев Е.И. (2011). Роль плюм-тектоники и сдвигово-раздвиговых деформаций литосферы в эволюции ранних каледонид Центральной Азии // Науки о Земле и недропользование. 38 (1). С. 105–119.
- 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.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Сидоров А.А. Закономерности размещения и особенности формирования Pb–Zn-месторождений миссисипского типа на восточной окраине Сибирской платформы (по результатам ГИС-анализа модели глубинного строения земной коры) // Докл. Российской Академии наук. Науки о земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 27–30.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Лобанов К.В. Применение моделей глубинного строения земной коры, созданных на основе гравитационных данных спутника GOCE, для прогноза и поисков Pb–Zn месторождений в Арктической зоне России // Исслед. Земли из Космоса. 2021. № 4. С. 15–27.
- Гамянин Г.Н., Аникина Е.Ю., Бортников Н.С. и др. Серебро-полиметаллическое месторождение Прогноз, Якутия: минералого-геохимические особенности и генезис // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40 № 5. С. 440–458.
- Голубев А.И., Иващенко В.И., Трофимов Н.Н., Ручьев А.М. Металлогения и оценка перспектив Карелии на крупные комплексные благороднометалльные месторождения // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2007. Вып. 10. С. 91–116.
- Гошко Е.Ю., Ефимов А.С., Сальников А.С. Современная структура и предполагаемая история формирования земной коры юго-востока Северо-Азиатского кратона вдоль опорного профиля 3-ДВ // Geodynamics & Tectonophysics, 2014. V. 5(3). P. 785–798.
- Дергачев А.Л., Еремин Н.И. Соотношение вулканогенного колчеданного и стратиформного свинцово-цинкового оруденения в истории Земли // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2008. 4, 26–34.
- Дымович В.А., Васькин А.Ф., Опалихина Е.С., Кисляков С.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист О-53 – Нелькан. Объяснительная записка // СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012 г. 364 с.
- Егоров А.С. Глубинное строение и геодинамика литосферы Северной Евразии (по результатам геолого-геофизического моделирования вдоль геотравверсов России) // СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 200 с.
- Егоров А.С. Особенности глубинного строения и вещественного состава геоструктур земной коры континентальной части территории России // Записки Горного института. V. 216. 2015. P. 13–30.
- Клюйков А.А. Новая эра в изучении гравитационного поля Земли // Научные труды института астрономии РАН. 2018. Т. 2. С. 20–25.
- Конкин В.Д., Донец А.И., Ручкин Г.В. Минералого-геохимические типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых место-

- рождений в карбонатных толщах // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 52–63.
- Лучицкая М.В. Гранитоидный магматизм и становление континентальной коры северного обрамления Тихого океана в мезозое – кайнозое // Труды ГИН РАН. Вып. 607. М., ГЕОС, 2014, 360 с.
- Мазукабзов А.М., Скляров Е.В., Донская Т.В., Гладкохуб Д.В. Комплексы метаморфических ядер Центральной Азии и их природа // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 9. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. С. 134–139.
- Максимов А.В., Богданов Ю.Б., Воинова О.А., Коссовая О.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Р-(35),36 – Петрозаводск. Объяснительная записка // СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 400 с.
- Мельникова Т.М. Байкальский рифт как долгоживущая система // Известия Ирк. ГУ. Серия “Геоархеология. Этнология. Антропология”. № 1(1). 2012. С. 3–21
- Некрасов А.И. Геология и благороднометалльная минерализация Верхояно-Колымской складчатой области // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, Москва. 2017. 56 с.
- Некрасов А.И. Отражение геодинамического режима восточной окраины Сибирской платформы в особенностях формирования осадочной призм Верхоянского комплекса и минерализации Западно-Верхоянского сегмента Верхоянского складчатого-надвигового пояса // Отечественная геология. 2011. № 1. С. 101–110.
- Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А. Земная кора глубоких платформенных впадин северной Евразии и природа их формирования // Физика Земли. 2016. № 5. С. 150–164.
- Пармузин Н.М., Алексеев М.А., Вовшина А.Ю., Вукс В.Я., Гаврилова В.А., Горбачевич Н.Р., Евдокимова И.О., Коротецкая Э.Е., Коссовая О.Л., Котляр Г.В., Кузьмин А.Н., Мазуркевич К.Н., Максимов А.В., Маулини Р.Л., Никифорова Ю.Ю., Петров Б.В., Рябухина М.Ю., Семенова Л.Р., Степунин А.В., Терентьева А.С., Шаметко В.Г., Якобсон К.Э. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Мезенская серия – Лист Q-39 (Нарьян-Мар). Объяснительная записка // СПб.: Изд-во СПб картофабрики ВСЕГЕИ, 2015, 517 с.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) // М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 571 с.
- Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В., Межубовский В.В., Трофимов В.Р. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000 (третье поколение). Серия Таймырско-Североземельская. Лист С-49 – Хатангский залив. Объяснительная записка // СПб: ВСЕГЕИ. 2013. 275 с.
- Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала // Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146 с.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). // Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Рыбаков С.И., Голубев А.И., Слюсарев В.Д. и др. Металлогения Карелии // Петрозаводск. Изд-во КНЦ РАН. 1999. 340 с.
- Самыгин С.Г. Особенности строения и геодинамической эволюции Таймыра в неопротерозое // Литосфера, 2018, 18(1). 5–19.
- Светов С.А. Магматические системы зоны перехода океан – континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита // Петрозаводск. 2005. 229 с.
- Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) // М., Научный мир, 2005, 400 с.
- Стримжа Т.П. Метасоматоз–кислород–аргиллизиты (на примере Горевского свинцово-цинкового месторождения, Енисейский край) // монография, Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2017. 160 с.
- Тычинский А.А., Акулишина Е.П., Баулина М.В. Прибайкальский полиметаллический рудный пояс // Новосибирск: Наука, 1984. 135 с.
- Эрнст Р.Е., Гамильтон М.А. Возраст 725 млн лет (U–Pb по бадделиту) Довыренской интрузии Сибири: корреляция с гигантской Франклинской магматической провинцией северной Лаврентии, датированной как 723 млн лет // Материалы совещания “Геология полярных областей Земли” (Москва, 2009). Т. 2. С. 330–332.
- Artemieva I.M., Shulgin A., 2019. Making and altering the crust: A global perspective on crustal structure and evolution // Earth Planet. Sci. Lett., 512, 8–16.
- Artemieva I.M., Meissner R., 2012. Crustal thickness controlled by plate tectonics: a review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples // Tectonophysics 519. 3–34.
- Bradley R. Hacker, Peter B. Kelemen, Mark D. Behn, Continental Lower Crust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124117>, 43, 1, (167–205), (2015)
- Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere // Geophys. J. Int. 2017. V. 210. P. 56–72.
- Houseman G.A., Molnar P., 1997. Gravitational (Rayleigh–Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere // Geophysical J. International 128. 125–150.
- 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, 15. EGU2013-2658.
- Leach D.L., Sangster D.F., Kelley K.D., Large R.R., Garven G., Allen C.R., Gutzmer J. and Walters S. Sediment-hosted lead-zinc deposits; a global perspective / in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds. // Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005: Littleton, CO, Society of Economic Geologists, 2005, 561–607.
- Map of undiscovered conventional oil and gas resources of the world // 2012, <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-energy/?resource=conventional>.
- Mo X.X., Hou Z.Q., Niu Y.L. et al. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet // Lithos 96, 225–242.
- Pirajno F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems // Springer science. 1250 p.
- Reguzzoni M., Sampietro D. GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform. 2015. V. 35. P. 31–43.
- Zappettini Eduardo, Rubinstei, Nora, Crosta Sabrina, Segal, Susana. (2017). Intracontinental rift-related deposits: A re-

view of key models // *Ore Geology Reviews*. 89.
https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.06.019

Zhang H.F. (2007) Temporal and spatial distribution of Mesozoic mafic magmatism in the North China Craton and implications for secular lithospheric evolution // *Geological Society, London, Sp Publ* 280, pp 35–54.

Zhou Z., Wen H., de Fourestier J., Qin C., Liu L. (2022). Sulphur and metal sources of polymetallic vein-type, sedimentary exhalative-type and Mississippi Valley-type Zn–Pb deposits along the southeast margin of the Yangtze Block // *Ore Geology Reviews* 147.

Structure of the Earth's Crust According to the Gravity Data of the GOCE Satellite Mission and Spatial Position of Polymetallic Deposits in the Frame of the Siberian and Eastern European Platforms

A. L. Galyamov¹, A. V. Volkov¹, K. V. Lobanov¹, and K. Yu. Murashov¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

The results of recent study of the Earth's crust based on the gravity data of the GOCE satellite were used for a comparative metallogenic analysis of the geodynamic settings of polymetallic deposits in the folded frame of Siberian and East European platforms. It is shown that deposits of the SEDEX type are more often located in the earth's crust with the predominant development of the lower "basalt" layer. Pyrite copper and lead-zinc deposits (VMS), as well as some occurrences of the SEDEX type, are known in subduction island-arc and accretionary settings on the crust with the predominant development of the middle "granite" layer. Pb–Zn ores of the MVT-type are localized in deep pericratonic sedimentary oil&gas basins on the shelf and continental slope, with no spatial relationship with the stratification of the earth's crust. The Ag-polymetallic mineralization of Taimyr and Western Verkhoyansk are confined to deep pericratonic rift troughs on the passive continental margin, have a similar ore-bearing environment and may be considered as a single silver-polymetallic Taimyr-West Verkhoyansk belt. The obtained results to confirm the prospects of Pb–Zn deposits in Central and Eastern Taimyr, as well as the Saurey ore region (Polar Urals) and the need for their further research.

Keywords: lithosphere, earth's crust, Siberian, East European, platform, copper, zinc, lead, silver, ore, deposit, SEDEX, MVT, VMS

REFERENCES

Ariskin A.A., Kosticyn YU.A., Konnikov E.G. i dr. Geohronologiya Dovyrenskogo intruzivnogo kompleksa v neoproterozoe (Severnoe Pribajkal'e, Rossiya) [Geochronology of the Dovyren intrusive complex in the Neoproterozoic (Northern Baikal region, Russia)] // *Geokhimiya*. 2013. № 11. P. 955–972. (In Russian).

Baluev A.S. (2013) Kontinental'nyj riftogenez Severa Vostochno-Evropejskoj platformy v Neogee: geologiya, istoriya razvitiya, sravnitel'nyj analiz. [Continental rifting of the North of the East European Platform in the Neogea: geology, development history, comparative analysis.] // *Dis. dokt. geol.-min. nauk. M.: GIN RAN*. 326 p. (In Russian).

Baluev A.S., Kolodyazhnyj S.YU., Terekhov E.N. Sravnitel'naya tektonika paleoriftovoj sistemy Belogo morya i drugih sistem kontinental'nogo riftinga [Comparative tectonics of the paleorift system of the White Sea and other systems of continental rifting] // *Litosfera*. 2021; 21(4): 469–490. (In Russian).

Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikent'ev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.YU. Mineral'nye resursy vysokotekhnologichnykh metallov v Rossii: sostoyanie i perspektivy razvitiya [Mineral resources of high-tech metals in Russia: state and development prospects] // *Geologiya rudnykh mestorozhdenij*. 2016. V. 58. № 2. P. 97–119. (In Russian).

Vernikovskij V.A. Geodinamicheskaya evolyuciya Tajmyrskoj skladchatoy oblasti [Geodynamic evolution of the

Taimyr folded region] // *RAN, Sib. otd., Ob"ed. in-t geologii, geofiziki i mineralogii. Nauchnyj red. akademik N.L. Dobrecov. Novosibirsk: Izd-vo S O RAN, NIC OIGGM*, 1996. 202 p. (In Russian).

Vernikovskij V.A., Kazanskij A.Yu., Matushkin N.Yu., Metelkin D.V., Sovetov Yu.K. Geodinamicheskaya evolyuciya skladchatogo obramleniya i zapadnaya granica Sibirskogo kratona v neoproterozoe: geologo-strukturnye, sedimentologicheskie, geohronologicheskie i paleomagnetnye dannye [Geodynamic evolution of the folded framing and the western boundary of the Siberian Craton in the Neoproterozoic: geological-structural, sedimentological, geochronological and paleomagnetic data] // *Geologiya i geofizika*. 2009. V. 50. № 4. P. 502–519. (In Russian).

Vladimirov A.G., Vladimirov V.G., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Babin G.A., Travin A.V., Kolotilina T.B., Hromykh S.V., Yudin D.S., Karmysheva I.V., Korneva I.B., Miheev E.I. (2011). Rol' plyum-tektoniki i sdvigovo-razdvigovykh deformacij litosfery v evolyucii rannih kaledonid Central'noj Azii. [The role of plume tectonics and strike-slip deformations of the lithosphere in the evolution of the early Caledonides of Central Asia.] // *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie*. 38 (1). P. 105–119. (In Russian).

Volkov A.V., Galyamov A.L., Belousov P.E., Vol'fson A.A. Primenenie kosmicheskikh tekhnologij v metallogenicheskom analize territorii Arkticheskoy zony Rossii [Application of space technologies in the metallogenetic analysis of the territory of the Arctic zone of Russia] // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2020. № 2(38). P. 77–85. (In Russian).

Galyamov A.L., Volkov A.V., Sidorov A.A. Zakonomernosti razmeshcheniya i osobennosti formirovaniya Pb–Zn-mestorozhdenij mississipskogo tipa na vostochnoj okraine Sibirskoj platformy (po rezul'tatam GIS-analiza modeli glubinnogo stroeniya zemnoj kory) [Patterns of location and features of the formation of Pb–Zn deposits of the Mississippi type on the eastern margin of the Siberian platform (according to the results of GIS analysis of the model of the deep structure of the earth's crust)] // *Doklady Rossijskoj Akademii nauk. Nauki o zemle*, 2020. V. 493. № 1. P. 27–30. (In Russian).

Galyamov A.L., Volkov A.V., Lobanov K.V. Primenenie modelej glubinnogo stroeniya zemnoj kory, sozdannyh na osnove gravitacionnyh dannyh sputnika GOCE, dlya prognoza i poiskov Pb–Zn mestorozhdenij v Arkticheskoj zone Rossii [Application of models of the deep structure of the earth's crust, created on the basis of gravity data from the GOCE satellite, for forecasting and searching for Pb–Zn deposits in the Arctic zone of Russia] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2021. № 4. P. 15–27 (In Russian).

Gamyanin G.N., Anikina E.YU., Bortnikov N.S. i dr. Serebro-polimetallicheskoe mestorozhdenie Prognoz, Yakutiya: mineralogo-geohimicheskie osobennosti i genesis [Silver-polymetallic deposit Prognoz, Yakutia: mineralogical and geochemical features and genesis] // *Geologiya i poleznye iskopayemye Karelii*. Petrozavodsk, 2007. V. 10. P. 91–116. (In Russian).

Golubev A.I., Ivashchenko V.I., Trofimov N.N., Ruch'ev A.M. Metallogeniya i ocenka perspektiv Karelii na krupnye kompleksnye blagorodnometall'nye mestorozhdeniya [Metallogeny and assessment of Karelia's prospects for large complex noble metal deposits] // *Geologiya i poleznye iskopayemye Karelii*. Petrozavodsk, 2007. V. 10. P. 91–116. (In Russian).

Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S. Sovremennaya struktura i predpolagaemaya istoriya formirovaniya zemnoj kory yugo-vostoka Severo-Aziatskogo kratona vdol' opornogo profilja 3-DV [Modern structure and supposed history of the formation of the earth's crust in the southeast of the North Asian craton along the 3-DV reference profile] // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. V. 5(3). P. 785–798. (In Russian).

Dergachev A.L., Eremin N.I. Sootnoshenie vulkanogenno-go kolchedannogo i stratiformnogo svincovo-cinkovogo orudneniya v istorii Zemli. [Correlation between volcano-genic pyrite and stratiform lead-zinc mineralization in the history of the Earth.] // *Vest. Mosk. un-ta. Ser. 4. Geologiya*, 2008. 4. P. 26–34. (In Russian).

Dymovich V.A., Vas'kin A.F., Opalihin E.S., Kislyakov S.G. i dr. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Dal'nevostochnaya. List O-53 – Nel'kan. Ob"yasitel'naya zapiska. [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Far Eastern series. Sheet O-53 – Nelkan. Explanatory note.] // SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2012 g. 364 p. (In Russian).

Egorov A.S. Glubinnoe stroenie i geodinamika litosfery Severnoj Evrazii (po rezul'tatam geologo-geofizicheskogo modelirovaniya vdol' geotraversov Rossii) [Deep structure and geodynamics of the lithosphere of Northern Eurasia (according to the results of geological and geophysical modeling along geotraverses of Russia)] // SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2004. 200 p. (In Russian).

Egorov A.S. Osobennosti glubinnogo stroeniya i veshchestvennogo sostava geostruktur zemnoj kory kontinental'noj chasti territorii Rossii [Features of the deep structure and material composition of the geostructures of the earth's crust of the continental part of the territory of Russia] // *Zapiski Gornogo instituta*. V. 216. 2015. P. 13–30. (In Russian).

Klyujkov A.A. Novaya era v izuchenii gravitacionnogo polya Zemli [A new era in the study of the Earth's gravitational field] // *Nauchnye trudy instituta astronomii RAN*. 2018. T. 2. P. 20–25. (In Russian).

Konkin V.D., Donec A.I., Ruchkin G. V. Mineralogo-geohimicheskie tipy i regional'nye geologicheskie osobennosti stratiformnyh svincovo-cinkovyh mestorozhdenij v karbonatnyh tolshchah [Mineralogical and geochemical types and regional geological features of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata] // *Otechestvennaya geologiya*. 2018. № 4. P. 52–63. (In Russian).

Luchickaya M.V. Granitoidnyj magmatizm i stanovlenie kontinental'noj kory severnogo obramleniya Tihogo okeana v mezozoe – kajnozoe [Granitoid magmatism and formation of the continental crust of the northern framing of the Pacific Ocean in the Mesozoic-Cenozoic] // *Trudy GIN RAN*, vyp. 607. M., GEOS, 2014. 360 p. (In Russian).

Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Donskaya T.V., Gladkochub D.V. Kompleksy metamorficheskikh yader Central'noj Azii i ih priroda [Complexes of metamorphic cores of Central Asia and their nature] // *Geodinamicheskaya evolyuciya litosfery Central'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)*. V. 9. Irkutsk: IZK SO RAN, 2011. P. 134–139. (In Russian).

Maksimov A.V., Bogdanov Yu.B., Voinova O.A., Kossovaya O.L. i dr. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1: 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Baltijskaya. List P-(35), 36 – Petrozavodsk. Ob"yasitel'naya zapiska. [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Series Baltic. Sheet P-(35), 36 Petrozavodsk. Explanatory note.] // SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2015. 400 p. (In Russian).

Mel'nikova T.M. Bajkal'skij rift kak dolgozhivushchaya sistema [Baikal rift as a long-lived system] // *Izvestiya Irk. GU. Seriya "Geoarheologiya. Etnologiya. Antropologiya"*. № 1(1). 2012. P. 3–21. (In Russian).

Nekrasov A.I. Geologiya i blagorodnometall'naya minerageniya Verhoyano-Kolymskoj skladchatoj oblasti. [Geology and precious metal minerageny of the Verkhoyansk-Kolyma folded region.] // *Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora geologicheskikh nauk*, Moskva. 2017. 56 p. (In Russian).

Nekrasov A.I. Otrazhenie geodinamicheskogo rezhima vostochnoj okrainy Sibirskoj platformy v osobennostyah formirovaniya osadochnoj prizmy Verhoyanskogo kompleksa i mineragenii Zapadno-Verhoyanskogo segmenta Verhoyanskogo skladchato-nadvigovogo poyasa [Reflection of the geodynamic regime of the eastern margin of the Siberian Platform in the features of the formation of the sedimentary prism of the Verkhoyansk complex and the mineralization of the West Verkhoyansk segment of the Verkhoyansk fold-and-thrust belt] // *Otechestvennaya geologiya*. 2011. № 1. P. 101–110. (In Russian).

Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A. Zemnaya kora glubokih platformennyh vpadin severnoj Evrazii i priroda ih formirovaniya [The Earth's crust of deep platform depressions in northern Eurasia and the nature of their

- formation] // *Fizika Zemli*. 2016. № 5. P. 150–164. (In Russian).
- Parmuzin N.M., Alekseev M.A., Vovshina A.YU., Vuks V.YA., Gavrilova V.A., Gorbachevich N.R., Evdokimova I.O., Korotckaya E.E., Kossovaya O.L., Kotlyar G.V., Kuz'min A.N., Mazurkevich K.N., Maksimov A.V., Maulini R.L., Nikiforova Yu.Yu., Petrov B.V., Ryabuhina M.YU., Semenova L.R., Stepunin A.V., Terent'eva A.S., SHamet'ko V.G., YAKobson K.E.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Mezenskaya seriya — List Q-39 (Nar'yan-Mar). Ob'yasnitel'naya zapiska. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Mezen series — Sheet Q-39 (Naryan-Mar). Explanatory note.] // SPb.: Izd-vo SPb kartfabriki VSEGE., 2015. 517 p. (In Russian).
- Parfenov L.M., Kuz'min M.I.* Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Saha (Yakutiya) [Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)] // M.: MAIK "Nauka/Interperiodika", 2001. 571 p. (In Russian).
- Proskurnin V.F., Gavrish A.V., Mezhubovskij V.V., Trofimov V.R. i dr.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'e pokolenie). Seriya Tajmyrsko-Severozemel'skaya. List S-49 — Hatangskij zaliv. Ob'yasnitel'naya zapiska. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Taimyr-Severozemelskaya series. Sheet S-49 — Khatanga Bay. Explanatory note.] // SPb: VSEGEI. 2013. 275 p. (In Russian).
- Puchkov V.N.* Paleogeodinamika YUzhnogo i Srednego Urala. [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals.] // Ufa: GILEM, 2000. 146 p. (In Russian).
- Puchkov V.N.* Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii). [Geology of the Urals and Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny).] // Ufa: DizajnPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian).
- Rybakov S.I., Golubev A.I., Slyusarev V.D. i dr.* Metallogeniya Karelii [Metallogeny of Karelia] // Petrozavodsk. Izd-vo KNC RAN. 1999. 340 p. (In Russian).
- Samygin S.G.* Osobennosti stroeniya i geodinamicheskoy evolyucii Tajmyra v neoproterozoe. [Features of the structure and geodynamic evolution of Taimyr in the Neoproterozoic.] // *Litosfera*, 2018. 18(1). P. 5–19. (In Russian).
- Svetov S.A.* Magmaticheskie sistemy zony perekhoda okean — kontinent v arhee vostochnoj chasti Fennoskandinavskogo shchita. [Magmatic systems of the ocean-continent transition zone in the Archaean of the eastern part of the Fennoscandian shield.] // Petrozavodsk. 2005. 229 p. (In Russian).
- Sovremennaya geodinamika oblactej vnutrikontinental'nogo kollizionnogo gopobpazovaniya (Centpal'naya Aziya).* [Modern geodynamics of areas of intracontinental collisional mountain formation (Central Asia).] // M., Nauchnyj mip, 2005, 400 p (In Russian).
- Strimzha T.P.* Metasomatoz—kislород—argillizity (na primere Gorevskogo svincovo-cinkovogo mestorozhdeniya, Enisejskij kryazh) [Metasomatoses—oxygen—argillites (on the example of the Gorevsky lead-zinc deposit, Yenisei Ridge)] // monografiya, Krasnoyarsk: Sib. feder.un-t, 2017. 160 p. (In Russian).
- Tychinskij A.A., Akul'shina E.P., Baulina M.V.* Pribajkal'skij polimetallicheskij rudnyj pojas. [Pribaikalsky polymetallic ore belt.] // Novosibirsk: Nauka, 1984. 135 p. (In Russian).
- Ernst R.E., Gamil'ton M.A.* Vozrast 725 mln let (U—Pb po baddeleyitu) Dovyrenskoj intruzii Sibiri: korrelyatsiya s gigantiskoj Franklinskoj magmaticheskoy provinciej severnoj Lavrentii, datirovannoj kak 723 mln let [Age 725 Ma (U—Pb according to baddeleyite) of the Dovyren intrusion in Siberia: correlation with the giant Franklin igneous province of northern Laurentia, dated as 723 Ma] // *Materialy soveshchaniya "Geologiya polyarnyh oblastej Zemli"* (Moskva, 2009). T. 2. P. 330–332. (In Russian).
- Artemieva I.M., Shulgin A., 2019.* Making and altering the crust: A global perspective on crustal structure and evolution // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 512. 8–16.
- Artemieva I.M., Meissner R., 2012.* Crustal thickness controlled by plate tectonics: a review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples // *Tectonophysics* 519. 3–34.
- Bradley R. Hacker, Peter B. Kelemen, Mark D. Behn,* Continental Lower Crust // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 10.1146/annurev-earth-050212-124117, 43, 1. (167–205). (2015)
- Cammarano F., Guerri M.* Global thermal models of the lithosphere // *Geophys. J. Int.* 2017. V. 210. P. 56–72.
- Houseman G.A., Molnar P., 1997.* Gravitational (Rayleigh–Taylor) instability of a layer with non-linear viscosity and convective thinning of continental lithosphere // *Geophysical J. International* 128. 125–150.
- 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, 15. EGU2013-2658.
- Leach D.L., Sangster D.F., Kelley K.D., Large R.R., Garven G., Allen C.R., Gutzmer J., Walters S.* Sediment-hosted lead-zinc deposits; a global perspective / in J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb, J.P. Richards eds. // *Economic Geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005*: Littleton, CO, Society of Economic Geologists, 2005, 561–607.
- Map of undiscovered conventional oil and gas resources of the world // 2012, <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-energy/?resource=conventional>.
- Mo X.X., Hou Z.Q., Niu Y.L. et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet // *Lithos* 96, 225–242.
- Pirajno F., 2009.* Hydrothermal Processes and Mineral Systems // Springer science. 1250 p.
- Reguzzoni M., Sampietro D.* GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.* 2015. V. 35. P. 31–43.
- Zappettini Eduardo, Rubinstein, Nora, Crosta Sabrina, Sega, Susana.* (2017). Intracontinental rift-related deposits: A review of key models // *Ore Geology Reviews*. 89. 10.1016/j.oregeorev.2017.06.019.
- Zhang H.F.* (2007) Temporal and spatial distribution of Mesozoic mafic magmatism in the North China Craton and implications for secular lithospheric evolution // *Geological Society, London, Sp Publ* 280. P. 35–54.
- Zhou Z., Wen H., de Fourestier J., Qin C., Liu L.* (2022). Sulphur and metal sources of polymetallic vein-type, sedimentary exhalative-type and Mississippi Valley-type Zn–Pb deposits along the southeast margin of the Yangtze Block // *Ore Geology Reviews* 147.