

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ, СОЗДАННЫХ НА ОСНОВЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ ДАННЫХ СПУТНИКА GOCE, ДЛЯ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ Pb–Zn МЕСТОРОЖДЕНИЙ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

© 2021 г. А. Л. Галямов^а*, А. В. Волков^а, К. В. Лобанов^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН),
Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 24.03.2021 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 прогнозно-поисковых моделях Pb–Zn месторождений. В результате ГИС-анализа установлено, что последние контролируются блоками земной коры с резкой изменчивостью мощности сейсмических слоев. Месторождения MVT-типа приурочены к глубоким прогибам осадочного слоя коры, выделяемого по сейсмическим скоростям, и совпадают с поднятиями поверхности Мохо; месторождения VMS типа, располагаясь преимущественно на маломощной осадочной коре, с умеренными мощностями ее нижней части; осадочно-эксталяционные руды (SEDEX), занимая промежуточное положение между колчеданными (VMS) рудами и оруденением миссисипского (MVT), контролируются маломощной и/или умеренно мощной осадочной корой в ареалах развития рифтов. Использование этих выводов в прогнозно-поисковых моделях позволяет выделять в Арктической зоне России новые перспективные площади для прогнозирования и поисков Pb–Zn месторождений.

Ключевые слова: Россия, земная кора, глубинное строение, тектоническая обстановка, месторождение, MVT, SEDEX, VMS, свинец, цинк, модель, прогноз, поиски

DOI: 10.31857/S0205961421040035

ВВЕДЕНИЕ

Свинцово-цинковые месторождения — один из важнейших источников стратегических металлов. В Арктике известны крупные и суперкрупные месторождения — Ред Дог, Грин-Крик (Аляска), Селвин, Ховард Пасс, Пайн-Пойнт (Канада), Цитронен (Гренландия) и около 100 более мелких по масштабу объектов в Скандинавии (рис. 1).

В арктической зоне России к настоящему времени выявлено небольшое число Pb–Zn месторождений, среди которых только одно крупное — Павловское (арх. Новая Земля) (рис. 1). Несколько рудопроявлений расположены в Республике Саха (Якутия). Более 10 объектов рассредоточены в Мурманской и Архангельской областях, в Ямало-Ненецком АО, а также на Таймыре и Чукотке. По плотности распределения, несмотря на существенно меньшее количество Pb–Zn объектов в Арктической зоне, Российская Федерация практически не уступает западным странам. Однако отставание России заметно по запасам и прогнозным ресурсам металлов, что в первую очередь это

связано со слабой геологической изученностью арктических регионов (Бортников и др., 2015).

Современные геолого-генетические и прогнозно-поисковые модели Pb–Zn месторождений (Галямов и др., 2020), как результат многолетних мировых и отечественных исследований, — фундамент для дальнейшего изучения этих месторождений. Важная задача в настоящее время — выявление новых дополнительных факторов рудообразования для создания наиболее эффективных поисковых моделей.

При оценке перспективности крупных слабоизученных регионов арктической зоны РФ на выявление новых рудных объектов важно выделить глобальные признаки, которые определяют общее направление прогнозно-поисковых построений. К ним относятся особенности глубинного строения земной коры в современной геофизической модели литосферы (проект GOCE) (Волков и др., 2020).

Проект GOCE Европейского космического агентства (ESA) предусматривает спутниковое

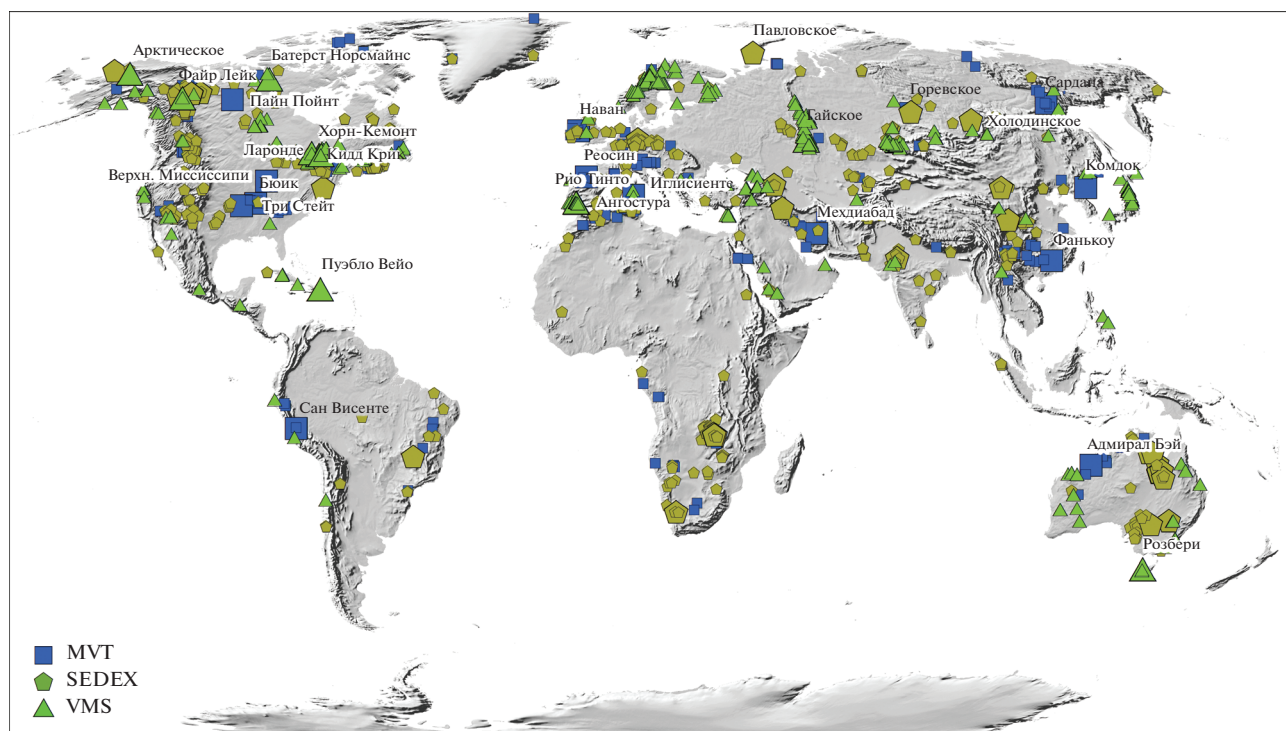


Рис. 1. Глобальное распространение Pb–Zn месторождений.

дистанционное зондирование, сочетающее гравиметрию и GPS-трекинг для определения среднего гравитационного поля Земли с беспрецедентными точностью и пространственным разрешением (Клюйков, 2018). Космический аппарат GOCE был выведен 17 марта 2009 г. с российского космодрома Плесецк на низкую околоземную солнечно-синхронную орбиту. Для обеспечения максимально возможной точности измерений была выбрана весьма низкая орбита – 260 км над поверхностью Земли.

В результате миссии GOCE (2009–2013 гг.) составлена новая сверхточная гравитационная карта Земли (Reguzzoni, 2015). Была более точно определена форма планеты, измерены сила тяготения в различных регионах и плотность земной коры. Имеющиеся модели земной коры (CRUST1.0 и LITHO1.0) на основе сейсмических данных и разрезов были согласованы с наблюдаемым GOCE гравитационным полем. Параллельно осуществляемый проект GEMMA, также финансируемый ESA, выполнил оценку границы между земной корой и мантией (Мохо) на основе полученных GOCE данных (Reguzzoni, 2015). Всего в строении земной коры, согласно моделям, выделены восемь слоев (Bouman et al., 2015): вода, лед, трехслойный осадочный чехол, трехслойная консолидированная кора.

Предлагаемая статья – это попытка с использованием последних достижений дистанционного

зондирования Земли показать перспективы наращивания минерально-сырьевой базы свинца и цинка в России по пространственным соотношениям размещения Pb–Zn минерализации и особенностей глубинного строения вмещающих блоков земной коры. Для изучения пространственных закономерностей размещения Pb–Zn месторождений использовались современные глобальные модели глубинного строения земной коры.

В ходе работы над статьей был подготовлен ГИС-проект, включающий картографический материал и базу данных отечественных и зарубежных Pb–Zn и др. месторождений. При проведении ГИС-анализа применялись традиционные методические подходы, заложенные в аналитический аппарат распространенных геоинформационных систем.

В настоящее время глобальные базы данных по свинцово-цинковым месторождениям имеются на сайтах геологических служб США, Европы, Канады, Австралии и других, но пока не обладают достаточной полнотой.

Глобальная база данных, использованная в работе, включает информацию о размещении более двух тысяч объектов – месторождений и рудопроявлений. Атрибутивная таблица состоит из более чем 70 граф и включает данные о географической и административной принадлежности объекта, его основных и сопутствующих полезных компо-

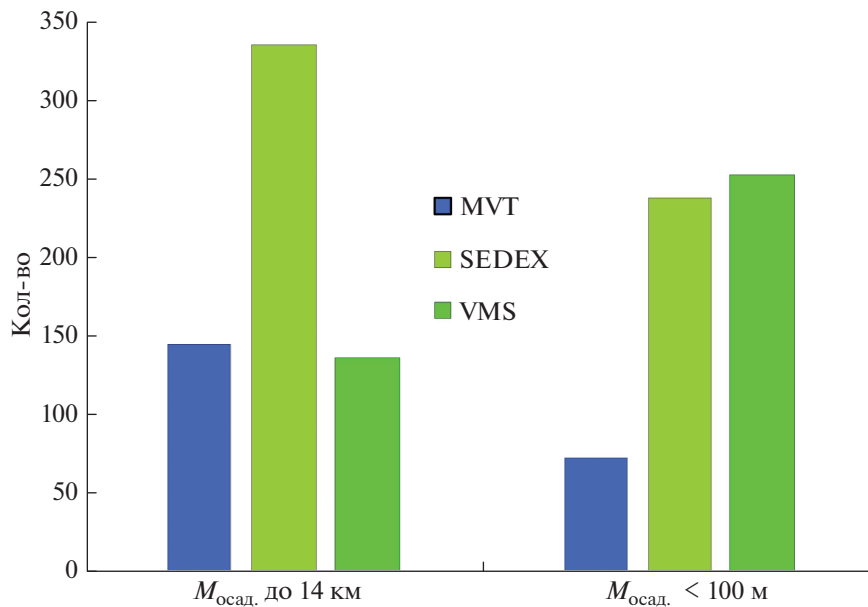


Рис. 2. Пространственные соотношения Pb–Zn месторождений разных типов и мощности вмещающих толщ осадочной коры (по данным ГИС-анализа).

нентах, их содержании в рудах, запасах и прогнозных ресурсах, степень освоенности, геологическом строении, форме и составе рудных тел, характере наложенных изменений. Треть из более чем тысячи месторождений MVT, SEDEX и VMS типа относится к колчеданным объектам, залегающим в вулканогенных комплексах. В терригенных и карбонатно-терригенных толщах преобладают эксгальационно-осадочные проявления (около 40% от всех объектов), а в карбонатных породах – стратиформные месторождения MVT типа (около 20%). В российской базе из 250 свинцово-цинковых объектов насчитывается более 140 месторождений, в т.ч. 5 крупных.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И РАЗМЕЩЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С мощными комплексами осадочного слоя земной коры тесно связаны мировые Pb–Zn месторождения. Это важный глобальный поисковый признак. Руды MVT типа, залегающие в карбонатных толщах интракратонных и перикратонных прогибов, пространственно тяготеют к крупным осадочным бассейнам (рис. 2), с которыми связаны крупные нефтегазоносные провинции. SEDEX-объекты в задуговых бассейнах, связанные с рифтогенными структурами пассивной окраины, также увязываются с проявлениями углеводородов (Хайн и др., 2009).

В качестве примера можно привести стратиформные Pb–Zn руды Южного Верхоянья, Туора-Сис, Хараулаха в Якутии в карбонатных породах и руды осадочно-эксгальационной природы

Пайхой-Новоземельского бассейна и Бассейна Сельвин в Канаде в карбонатно-терригенных, часто углеродсодержащих толщах, где рудоносность приурочена к застойным аноксическими бассейнами с мощными карбонатными, часто хемогенными отложениями, и терригенно-карбонатными флишоидными формациями, слагающими неметаморфизованный разрез осадочной коры. Месторождения MVT и SEDEX типов часто приурочены к глубоким прогибам (около 2 км) верхнего и среднего горизонтов осадочной коры (Галайков и др., 2020).

Осадочный чехол, особенно его верхние горизонты, в структуре которых отражаются особенности региональной тектоники, соответствует, в целом, мощным комплексам платформенного чехла (Laske, Masters, 1997, Pasyanos et al., 2014); немалая его часть относится к формациям пассивной континентальной окраины (Таймыр, Верхоянье, Северная Аляска) и местами – к комплексам активной континентальной окраины (Юго-Восточная Чукотка). Мощность осадочной коры достигает двух десятков км. В ее пределах отмечаются сравнительно низкие сейсмические скорости. По скачкообразному изменению сейсмической скорости с глубиной в ней выделяются три горизонта (Laske, 1997; Bouman, 2015).

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 (табл. 1). Его комплексы слагают

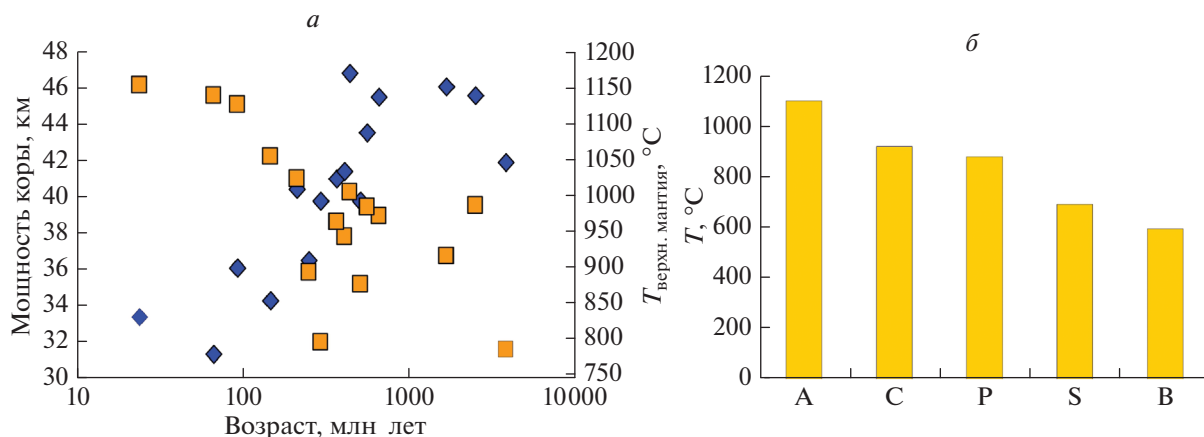


Рис. 3. *а* – Соотношение возраста консолидированной коры с ее мощностью (залитые ромбы) и с температурой подстилающей верхней мантии (залитые квадраты); *б* – термальный режим верхней мантии под корой различных геодинамических режимов (по данным ГИС-анализа). Геодинамические обстановки: А – активная окраина, Р – пассивная окраина, С – коллизия, В – докембрийский фундамент, S – ареалы платформенного чехла.

отдельные глубокие прогибы, приуроченные к нефтегазоносным областям (Северо-Тунгусская и Катангская) на восточном фазе 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 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.

Глубинное строение консолидированной коры широко изучалось и систематизировалось по мощности и соотношениям слоев коры (Белюсов, 1989, Моoney, 2007 и др.). Были выделены основные подтипы континентальной коры разной мощности в соотношении с ее нижним слоем, изучались пространственные соотношения между подтипами коры и разновозрастными геоструктурами, установлены типы и изменчивость внутреннего строения земной коры (Кашубин, 2013) различной геодинамической природы.

При сравнительном анализе особенностей строения и вариаций мощности различных слоев осадочной и консолидированной коры устанавливаются типовые соотношения в структуре слоев земной коры, определяемых геофизическими ме-

тодами. Эти соотношения в значительной мере сходны с систематикой прошлых лет (Белюсов, 1989). Обращает на себя внимание то, что кора по непосредственному соотношению мощностей слоев не разделяется на океаническую и континентальную. Одной из особенностей является прямая зависимость толщины коры от возраста геологических формаций (рис. 3, б). При этом областям развития формаций пассивной континентальной окраины соответствует наиболее мощная осадочная кора, а выступам архей-протерозойских комплексов – максимальная глубина Мохо.

Другая особенность заключается в том, что нижняя “базальтовая” кора в некоторых областях практически не выражена в геофизическом разрезе. Пространственно-статистический анализ показывает, что древние формационные комплексы слагают кору, в среднем, увеличенной мощности (до 50 км), в отличие от коры мощностью менее 35 км, сложенной кайнозойскими толщами, причем молодые формации с ареалами интрузивного мезо-кайнозойского магматизма располагаются над верхней мантией с увеличенной до 1100–1200°C температурой (Тихоокеанский рудный пояс). Более древние проявления магматизма пространственно тяготеют к более мощной коре и менее нагретой верхней мантии (до 400°C в районе Анабарского щита).

С термальным состоянием верхней мантии также увязывается области различных геодинамических режимов развития геологических формаций (рис. 3, б). 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.

По характеру соотношений слоев осадочной и консолидированной коры выделяются семь типов разреза (Галямов, 2020). На территории Российской Федерации и сопредельных стран земная кора представлена шестью типами. Эти типы пространственно сопоставляются с геодинамическими таксонами, определяющимися временем формирования и составом геологических формаций (Геодинамическая карта, 1995). Степень соответствия типа коры геодинамической характеристике приповерхностных формаций носит несколько условный характер, поскольку последняя отражает лишь часть истории развития коры. Большое значение при этом имеет детальность изучения земной коры. Современная 1-градусная модель — достижение в понимании глубинного строения земной коры и литосферы, тем не менее, такой детальности недостаточно для региональных построений (масштаба 1 : 1000000 и детальнее).

Наибольшим распространением характеризуется *I тип разреза коры*, занимающий свыше 60% поверхности Земли. В строении коры этого типа присутствуют все три слоя консолидированной коры и незначительный по мощности верхний горизонт осадочной коры. Общая мощность варьирует от 6 км (океаны) и до 100 км (континенты). По характеру распределения и мощности *I тип коры* условно разделяется на три подтипа.

Значительная часть коры первого подтипа (I.1) охватывает весь мировой океан, ее мощность не превышает 20 км. Кора второго подтипа (I.2), имеющая очень большую мощность (от 45 до 110 км) и сравнительно малое площадное развитие, соответствует орогенным областям складчатым поясам (Загрос в Иране и др. — Mouthereau et al., 2012), Тибета (Qiantang terrane — Holt et al., 1990) и Анд. В последних регионах сейсмотомография показывает, что субдукция обуславливает погружение и, соответственно, утолщение континентальной литосферы Индийского субконтинента под Гималаи и Тибет до глубины до 200–250 км (Huang et al., 2003). Что касается собственно земной коры (до глубины Мохо), то глубина погружения здесь оценивается, по крайней мере, вдвое меньше. Остальные площади (около 110 млн кв. км), отнесенные к коре третьего подтипа (I.3), мощность которой условно варьирует от 20 до 40 км, остаются нерасчлененными. В их пределах кора охватывает значительные территории выступов докембрийского фундамента (Балтийский, Алданский, Канадский и другие щиты) и подвижных поясов — активных континентальных окраин (Северо-Восточная Евразия, Кордильеры, Анды и др.). Наиболее широко проявлены ареалы мезо-

зойского и позднепалеозойского гранитоидного магматизма.

Ареалы коры *второго типа* территориально соответствуют платформенным образованиям (Русская и Сибирская платформы), Западно-Сибирская плита), кора *третьего типа* — регионам развития трапповой формации Сибири, и *четвертого типа* — нефтегазоносным провинциям (рис. 4, а). Общее соответствие крупных областей коры таким ярким в развитии геотектоническим таксонам, как платформы и океаническая кора, показывает, что при дальнейшей детализации модели земной коры, наравне с другими современными геофизическими методами дистанционного зондирования, вполне возможна подробная типизация коры и литосферы.

Третий тип разреза мощностью 11–70 км имеет сходное строение с разрезом второго типа и отличается завершенностью разреза и повышенной мощностью осадочной коры. Ареалы коры этого типа соотносятся с широко развитым раннемезозойским внутриплитным магматизмом платформ и их пассивных окраин (Восточная Гренландия, Сибирская трапповая провинция и др.), а также с участками кайнозойского и современного вулканизма (Вилуйская впадина, Камчатка).

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

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).

Шестой тип отличается малой мощностью осадочной коры, представленной только ее верхним горизонтом. Общая мощность коры здесь весьма изменчива — 5–45 км. Тип коры, по-видимому, является переходным от континента к океану и отмечается в зонах субдукции, в том числе в пределах Тихоокеанского пояса и Карибского бассейна.

По общей геостатистической оценке наиболее ресурсоемкие Pb–Zn месторождения размещаются в терригенных комплексах. Все это соответ-

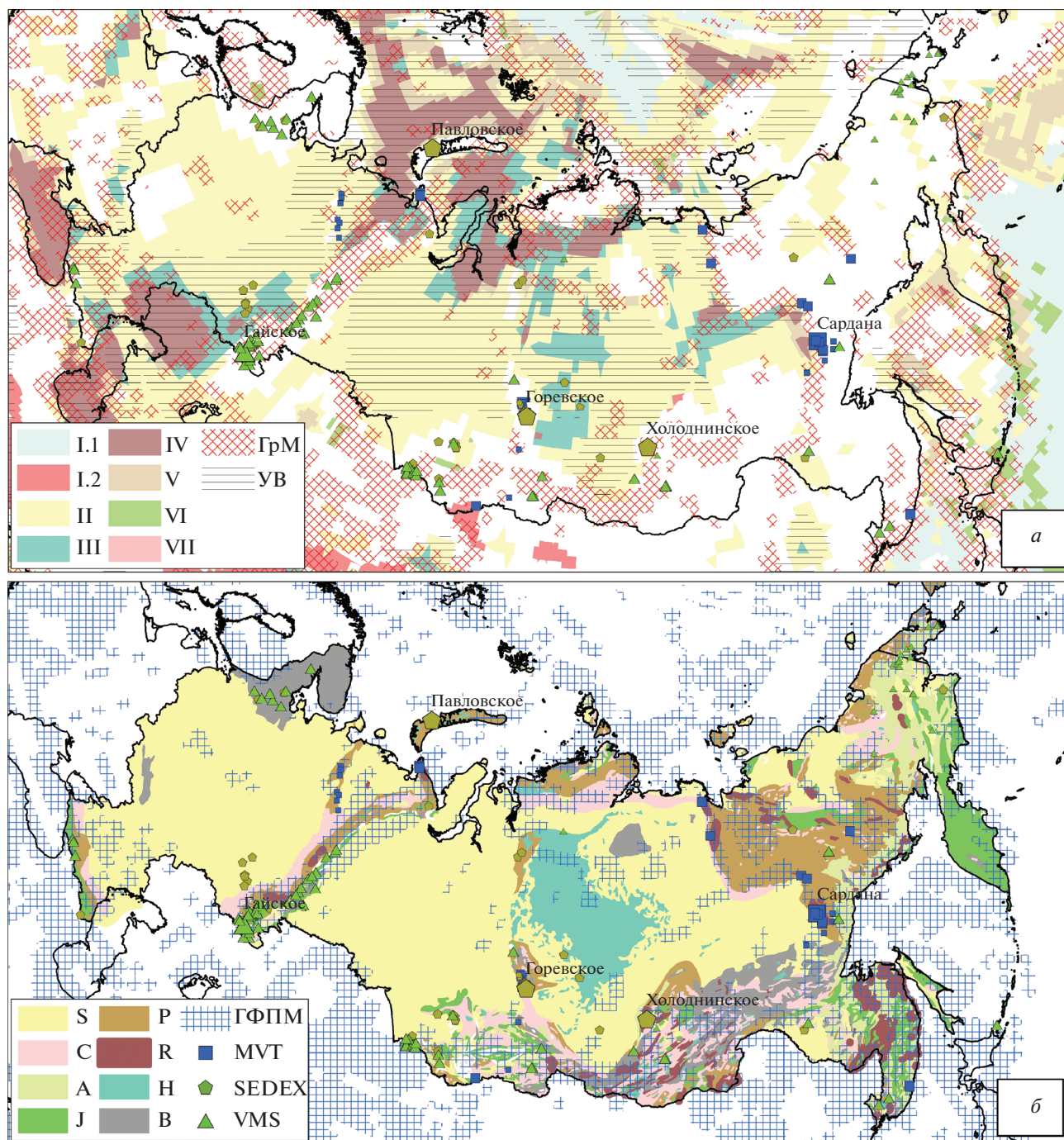


Рис. 4. Типовое строение земной коры (а) и геотектоническое районирование (б) России и распространение Pb–Zn месторождений разных типов.

а – I – нерасчлененные области, II – кратоны, III – области внутриплитного магматизма (внутрикратонные рифты), IV – области глубоких прогибов осадочной коры и углеводородные провинции, V – континентально-океанические рифты, VI – современные островодужные структуры, VII – срединно-океанические хребты. GrM – аномальная изменчивость мощности нижней-средней коры, UB – углеводородные провинции. б – 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. GFPM – геофизическая поисковая модель свинцово-цинковых месторождений. Месторождения типов: MVT, SEDEX и VMS.

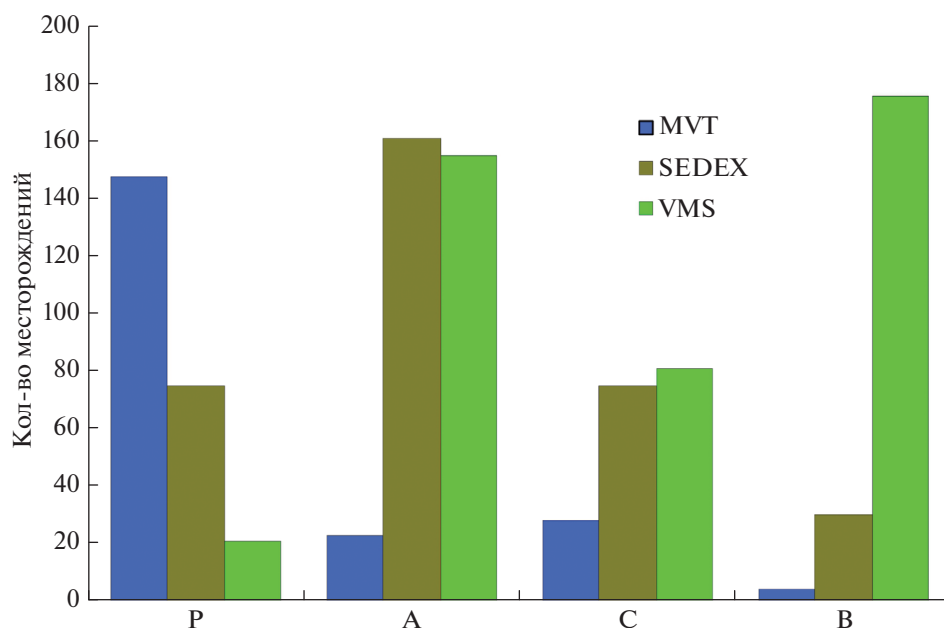


Рис. 5. Распределение Pb–Zn месторождений разных типов в формациях различных геодинамических режимов. Режимы: Р – пассивная континентальная окраина, в т.ч. рифты, А – активная континентальная окраина, включая островодужные комплексы, С – наложенные коллизионные области, В – выступы древнего основания.

ствуется сложившимся представлением о тесной связи формирования месторождений и их типизации с геодинамическими режимами становления вмещающих геологических формаций.

Согласно современным представлениям Pb–Zn руды типа SEDEX отлагались в обстановке континентального рифта. К субконтинентальным бассейнам форланда приурочены стратиформные месторождения MVT-типа. Месторождения VMS возникали в задуговой обстановке на утоненной коре в условиях субвулканического магматизма. В субконтинентальной островодужной и окраинно-континентальной обстановках возникали порфировые Cu–Mo–Au и эпитермальные Au–Ag месторождения, где рудоносные флюиды связаны с дегидратацией, переработкой и гибридизацией верхних частей коры.

В целом, на территории России выделяются три базовые геодинамические обстановки, в формационных комплексах которых выявлены подавляющее количество (более 70%) месторождений: а) выступы древнего основания, включающие блоки архейских кратонов, рифтогенные структуры и области орогенной активизации; б) ареалы формаций пассивной континентальной окраины; в) островодужные комплексы активной окраины, а также наложенные на них зоны коллизионных процессов (рис. 5).

В выступах древнего основания, преимущественно в пределах Балтийского щита, размещается около 30% месторождений, включая месторождения черных, цветных, благородных и редких ме-

таллов. Среди полиметаллических объектов колчеданные преобладают. Важное место по числу месторождений (около 30%) в России занимают ареалы пассивной континентальной окраины и зоны континентальных и субконтинентальных рифтогенных прогибов. Здесь преобладают месторождения цветных и благородных металлов, расположенные в складчатом обрамлении Сибирской платформы и Среднем Урале. В обстановках активной окраины, включая островные дуги, наибольшим распространением в зоне влияния Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса и в островодужных комплексах Камчатки пользуются объекты колчеданного и осадочно-эксталяционного типа. В областях наложенной коллизионной активизации на Урале и в Верхоянье в числе преобладающих выделяются проявления колчеданных и осадочно-эксталяционных объектов. При этом в участках, где тектономагматическая активизация наложена на формации активной окраины, отмечается повышенное количество железорудных объектов, преимущественно скарнового типа. В этих областях также сосредоточены запасы и ресурсы редких металлов.

Важной особенностью связи геодинамических режимов образования формаций и их рудоносности является совмещенная металлогения, обусловленная изменением их обстановок во времени. Определяемая влиянием мантийных процессов на литосферу изменчивость геодинамических режимов обуславливает разнородность вмещаю-

шей среды, изменчивость и полихронность рудообразующих процессов.

В ряде работ показано, что островные дуги, вулканоплутонические пояса и другие элементы активной окраины Северо-Востока России участвуют в строении коллизионных поясов, начиная с середины палеозоя. Взгляды В.И. Смирнова (1993) о латеральной миграции тектономагматических процессов во времени выразились в сопряженности геоструктур в пространственно-временных латеральных рядах. Именно здесь формировались субдукционно-аккреционные и аккреционно-коллизионные комплексы, в которых совмещены фрагментированные блоки земной коры различных геодинамических обстановок формирования. Другое важное свойство земной коры — изменчивость мощности ее глубинных слоев, различаемых по плотности и другим реологическим характеристикам. Величина изменчивости (градиент мощности) оценивалась в градусах, как крутизна изменения мощности слоя.

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 горизонтальными движениями при формировании конвергентных и дивергентных окраин литосферных плит и террейнов (Макеев и др., 2020). Мантийные процессы, являясь триггером геодинамической обстановки в приповерхностной области коры, вызывают в последней новейшие деформации, выраженные поднятиями, прогибами и флексурами.

Основные механизмы формирования глубоких впадин (прогибов), часто приводящие к утолщению коры — рифтогенез, базификация (в понимании акад. В.В. Белоусова) и эклогитизация — не противоречат и не исключают друг друга, они вполне могут происходить одновременно и энергетически стимулировать друг друга (Павленкова и др., 2016). Кроме того, на эти процессы влияет отток вещества из-под впадин по низкоплотным слоям повышенной проницаемости и флюидонасыщенности, что может быть причиной сокращения верхнего “гранито-гнейсового” слоя. Наиболее вероятный источник энергии — мантийные флюиды.

Кроме того, утолщение земной коры обычно связывается с коллизионными процессами при столкновении, субдукции плит и т.п. При коллизии отмечают почти удвоение мощности земной

коры, что выражается в рельефе интенсивными поднятиями (Уральская система, Алтае-Саянская и Байкало-Патомский складчатые области). Часть локальных зон утолщения коры связана с мантийным диапиризмом и гранитогнейсовыми куполами (Мазукабзов и др., 2011). Появление гранитоидных куполов и утолщение коры могло происходить и в коллизионной обстановке в результате декомпрессионного разогрева (Лучицкая, 2014). Также утолщение коры может происходить в результате расслоения на достаточно плотные мафические и менее плотные фельзитовые породы, что характерно для субдукции дуг и континентальной коры (Nacker et al., 2012).

ГИС-анализ показывает, что в пределах локальных зон утолщения коры размещается более 65% всех мировых месторождений и проявлений благородных, цветных, редких, черных и благородных металлов.

В геофизической глобальной модели земной коры наиболее резкие локальные утолщения и утонения ее глубинных слоев проявлены в виде обособленных зон аномальной изменчивости (градиента) мощности средней и нижней коры (рис. 4, б). Положение этих зон, в целом, соответствует коллизионным областям (Тетис, Урал, Байкало-Патом, Алданский щит, Таймыр, Приморье).

По соотношению градиентных зон и размещения Pb–Zn месторождений отмечается отчетливая их приуроченность к эпизонам над блоками с наиболее изменчивой по мощности нижней корой (рис. 6). Причем колчеданные объекты (VMS) тяготеют к областям с утоненной верхней корой. Все эти особенности вполне могут соответствовать реологической модели земной коры (Иванов и др., 2018).

Реологическая модель описывает гидродинамическую зональность, связанную с размещением и миграцией флюидов в глубинных слоях консолидированной коры, и возникновение барьерной зоны, непроницаемой для флюидов. Геофизические исследования показывают, что с глубиной происходит закрытие пор и трещин и становление барьера для движения флюидов по вертикали. Далее, с глубиной породы значительно теряют прочность, вплоть до приповерхностных значений. Такое разупрочнение может быть связано с высоким содержанием флюидов и проявлено в многоэтажном расслоении по плотности, по флюидонасыщенности и другим реологическим свойствам пород. При этом даже незначительные тектонические движения и деформации в этих участках коры могут стать причиной интенсивной флюидной активности, которая может обусловить резкие локальные изменения сейсмических свойств слоев коры и сложную границу их разделителя.

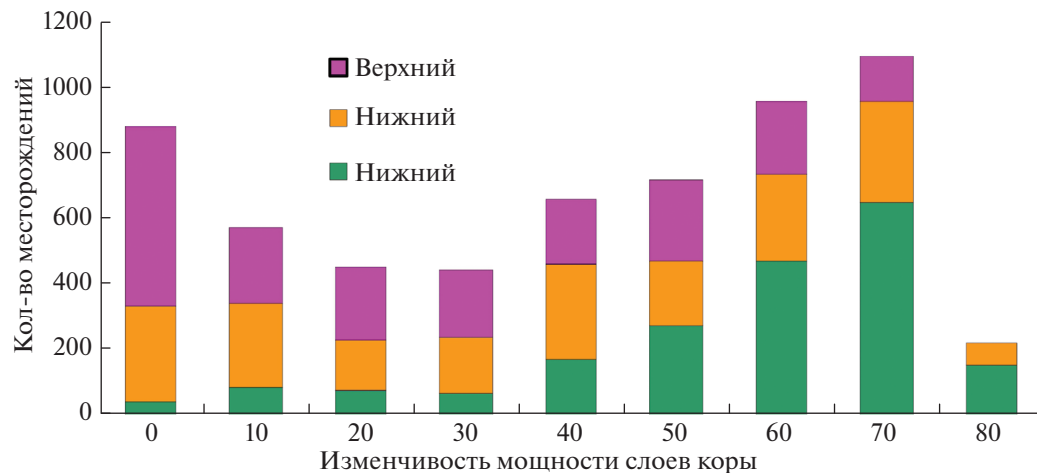


Рис. 6. Размещение Pb–Zn месторождений в аномальных зонах изменчивости мощности нижней коры (по материалам CRUST1.0).

Таким образом, из пространственных соотношений размещения свинцово-цинковых месторождений и различия структуры вмещающих блоков коры вытекают три основных глобальных закономерности размещения Pb–Zn месторождений разных типов.

Первая закономерность — приуроченность MVT- и SEDEX-месторождений к флангам крупных осадочных бассейнов, сложенных платформенными и субплатформенными комплексами с устойчивыми признаками нефтегазоносности. Такие территории отмечаются на Северо-Востоке России, где, в частности, на флангах Вилуйской нефтегазоносной провинции размещаются недоизученное месторождение Менгилер на севере и объекты Сарданского узла на юге.

Вторая закономерность — это размещение Pb–Zn месторождений в блоках земной коры II и V типа, а также в пределах ее нерасчлененного подтипа I.3.

Третья закономерность — высокие значения изменчивости нижней коры по мощности с крутизной более 70°, к областям которых пространственно тяготеют более 60% свинцово-цинковых месторождений, причем с наиболее градиентными областями связаны колчеданные и эксталяционно-осадочные месторождения.

РАЗВИТИЕ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ МОДЕЛЕЙ Pb–ZN МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В результате ГИС-анализа выделены глобальные признаки (табл. 1), на основе которых получили дальнейшее развитие прогнозно-поисковые модели Pb–Zn месторождений.

В пределах выступов докембрийского основания, как показывает ГИС-анализ, в строении коры отмечаются два типовых разреза.

Первый тип характеризуется полным или частичным отсутствием нижнего “базальтового” слоя. Например, в Гренландии кора с таким строением установлена в Нагсугтокском орогенном поясе, сформировавшемся в рифее (1.91–1.77 млрд лет). В Канаде этот тип отмечается в пределах зоны Капейской синг (центральная часть кратона Сьюпириор), а в России — на восточном фланге Алданского щита в районе Пограничной (Хингано-Охотской) трансрегиональной гравитационной ступени (Диденко и др., 2010).

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 кеноранского (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. Например, в Печенгском рудном районе, Pb–Zn жилы залегают в неметаморфизованных рифейских песчаниках пассивной континентальной окраины и архейских гнейсах и кристаллических сланцах фундамента и ассоциируется с проявлениями рифтогенеза при формировании шельфовой плиты Баренцева моря (Лобанов и др., 2019). 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 (Галямов и др., 2020).

ГИС-анализ показывает, что мощная консолидированная кора (30 и более км), отнесенная к подтипу I.1, распространена в орогенных поясах — Кордильеры, Анды, Северо-Восточные террито-

Таблица 1. Глобальные прогнозно-поисковые признаки Pb–Zn месторождений разных типов

Критерии	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, коллизионные 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 ограниченно	Магматические комплексы рифтогенной природы	Вулcano-плутонические пояса и ассоциации
Области резкой изменчивости мощности нижней и средней консолидированной коры	Области резкой изменчивости мощности нижней и средней консолидированной коры		
Тип и подтипы разреза коры	II (кратоны), I.3 (нерасчлененные области)	II (кратоны), V (задуговые бассейны и островодужные комплексы), I.3 (нерасчлененные области)	V (задуговые бассейны и островодужные комплексы) I.3 (нерасчлененные области)
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

рии Канады, Скандинавские регионы, вулcano-плутонические пояса и ассоциации (Урало-Монгольский, Охотско-Чукотский, Восточные Саяны и др.). **MVT** и **SEDEX** объекты в этих регионах сосредоточены в прогибах осадочного слоя земной коры на умеренно мощной консолидированной коре (до 40 км) и приурочены к перикратонным прогибам и рифтогенным структурам с проявлением нефтегазоносности.

Островные дуги, вмещающие **VMS** месторождения и порфировые объекты, по современным представлениям, контролируются наложенными аккреционными и постаккреционными структурами активных континентальных окраин (Волков и др., 2014). ГИС-анализом установлено, что на аккреционном этапе на коре средней мощностью 30–35 км в наибольшей близости с маломощным (8–9 км) “гранитным” слоем, контаминировавшим аккреционные комплексы, возникали порфировые объекты. Причем в наложенных зонах орогенеза толщина первых двух слоев несколько увеличена (до 20–22 км суммарно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что **Pb–Zn** месторождения разных типов контролируются блоками земной коры с резкой изменчивостью мощности выделяемых по сейсмическим данным слоев. Месторождения **MVT**-типа приурочены к глубоким прогибам осадочного слоя коры и совпадают с астеносферными поднятиями поверхности Мохо. Месторождения **VMS** типа располагаются преимущественно на маломощной осадочной коре, с умеренными мощностями нижней части консолидированной коры. **SEDEX** месторождения, занимая промежуточное положение между **MVT** и **VMS**, контролируются маломощной и/или умеренно мощной осадочной корой в ареалах развития рифтов.

Использование этих закономерностей в прогнозно-металлогенических построениях позволяет выделить в Арктической зоне России новые перспективные площади для поисков свинцово-цинковых месторождений. Выделение перспективных площадей существенно зависит от детализации используемых при прогнозно-металло-

генических построениях тематических слоев, совмещение поисковых параметров которых и определяет достоверность прогнозной карты.

Районирование с учетом совокупности этих признаков и потенциальной рудоносности различных геодинамических обстановок (рис. 4.) показывает, что наиболее перспективные регионы в Российской Арктике в основном сосредоточены в пределах Балтийского щита, Урала и архипелага Новая Земля, на Таймыре и на флангах Сибирской платформы, в Верхояно-Колымской зоне и в ареалах развития вулканогенных формаций Охотско-Чукотского вулканического пояса.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы ИГЕМ РАН и 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”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов В.В., Павленкова Н.И. Типы земной коры Европы и Северной Атлантики // Геотектоника. 1989. № 3. С. 3–14.
- Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В., Галямов А.Л., Мурашов К.Ю. Арктические ресурсы цветных и благородных металлов в глобальной перспективе // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1(17). С. 38–46.
- Волков А.В., Сидоров А.А., Старостин В. И. Металлогения вулканогенных поясов и зон активизации. М.: МАКС-ПРЕСС, 2014. 356 с.
- 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: Экономика и Экология. 2020. № 3. С. 87–88.
- 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. РАН. Науки о земле. 2020. Т. 493. № 1. С. 27–30.
- Геодинамическая карта России, масштаб: 1 : 10000000, серия: обзорные карты Российской Федерации масштаба 1 : 10000000. ВСЕГЕИ, 1995 г.
- Диденко А.И., Малышев Ю.Ф., Саксин Б.Г. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии. // Владивосток: Дальнаука, 2010. 232 с.
- Иванов С.Н., Иванов К.С. Реологическая модель строения земной коры (модель третьего поколения) // Литосфера. 2018. Т. 18(4). 500–519. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-500-519>
- Кашубин С.Н., Павленкова Н.И., Петров О.В., Мильштейн Е.Д., Шокальский С.П., Эринчек Ю.М. Типы земной коры Циркумполярной Арктики // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 5–20.
- Клюйков А.А. Новая эра в изучении гравитационного поля Земли // Науч. тр. Ин-та астрономии РАН. 2018. Т. 2. С. 20–25.
- Лобанов К.В., Чичеров М.В., Чижова И.А., Плотинская О.Ю., Горностаева Т.А., Шаров Н.В. Глубинное строение и рудообразующие системы Печенгского рудного района (Арктическая зона России) // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3(35). С. 107–122. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-107-122>.
- 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.
- Мазукабов А.М., Скляр Е.В., Донская Т.В., Гладко-чуб 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.
- Макеев В.М., Макарова Н.В. Деформации глубинных слоев земной коры Восточно-Европейской платформы: причины и следствия // Российский сейсмологический журн. 2020. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/deformatsii-glubinnyh-sloyov-zemnoy-kory-vostochno-evropeyskoy-platformy-prichiny-i-sledstviya>
- 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.
- 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.
- Хаин В.Е., Полякова И.Д., Филатова Н.И. Тектоника и нефтегазоносность Восточной Арктики // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 4. С. 443–460.
- Bouman J., Ebbing J., Meekes S., Abdul Fattah R., Fuchs M., Gradmann S., Haagmans R., Lieb V., Schmidt M., Dettmering D., Bosch W. GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform. 2015. V. 35. 16–30.
- Hacker B., Kelemen P., Behn M. Continental Lower Crust. // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2012, 3. 150223150959000. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124117>
- Holt W., Wallace T. Crustal thickness and upper mantle velocities in the Tibetan Plateau region from the inversion of Pnl waveforms: Evidence for a thick upper mantle lid beneath southern Tibet // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 12.499–12.525.
- Huang Z., Su W., Peng Y., Zheng Y., Li H., 2003. Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions // J. Geophysical Research 108 (B2), 2073.
- Laske G., Masters G. A Global Digital Map of Sediment Thickness // EOS Trans AGU. 1997. 78(F483).
- Map of undiscovered conventional oil and gas resources of the world // 2012. <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-energy/?resource=conventional>

Mouthereau F., Lacombe O., Vergés J. Building the Zagros collisional orogen: Timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence // *Tectonophysics*. Elsevier. 2012. V. 532–535. P. 27–60.

Mooney W.D. Crust and Lithospheric Structure – Global Crustal Structure // Eds. B. Romanowicz, A. Dziewonski. *Treatise on Geophysics*. V. 1: Seismology and Structure of the Earth. Elsevier, 2007. P. 361–417.

Pasyanos M.E., Masters T.G., Laske G., Ma Z. LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2014. V. 119. P. 2153–2173. <https://doi.org/10.1002/2013JB010626>

Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. [S. l.] // Springer Netherlands, 2009. 1252 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.

Application of Models of Earth's Crust Depth Structure Based on GOCE Satellite Gravitational Data, for Forecasting and Prospecting Pb–Zn Deposits in the Arctic Zone of Russia

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

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

The results of a comparative metallogenic spatial analysis based on GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer) data, which allows using the elements of the deep structure of the earth's crust in prospecting models of Pb–Zn deposits, are considered. As a result of spatial analysis, it was found that the deposits are controlled by blocks of the earth's crust with a sharp variability in the thickness of seismic layers. MVT-type deposits are confined to deep troughs of the sedimentary crustal layer, distinguished by seismic velocities, and coincides with the uplifts of the Moho surface; deposits of the VMS type, located mainly on a thin sedimentary crust, with moderate thicknesses in its lower part; SEDEX deposits, which occupy an intermediate position between MVT and VMS, are controlled by thin and/or moderately thick sedimentary crust in rift areas. The use of these conclusions in forecasting and prospecting models made it possible to identify new promising areas in the Arctic zone of Russia for forecasting and prospecting for Pb–Zn deposits.

Keywords: Russia, Earth's crust, deep structure, tectonic setting, field, MVT, SEDEX, VMS, lead, zinc, model, forecast, prospecting

REFERENCES

Belousov V.V., Pavlenkova N.I. Tipy zemnoy kory Yevropy i Severnoy Atlantiki [Types of the Earth's crust in Europe and the North Atlantic] // *Geotektonika*. 1989. № 3. P. 3–14.

Bortnikov N.S., Lobanov K.V., Volkov A.V., Galyamov A.L., Murashov K.YU. Arkticheskiye resursy tsvetnykh i blagorodnykh metallov v global'noy perspektive [Arctic resources of non-ferrous and precious metals in a global perspective] // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2015. № 1(17). P. 38–46.

Volkov A.V., Sidorov A.A., Starostin V.I. Metallogeniya vulkanogennykh pojasov i zon aktivizatsii. [Metallogeny of volcanogenic belts and zones of activation]. Moscow: MAKSPRESS, 2014. 356 p.

Galyamov A.L., Volkov A.V., Lobanov K.V. Geofizicheskaya model' zemnoy kory, geodinamicheskiye obstanovki i perspektivy otkrytiya Pb–Zn mestorozhdeniy v Rossiyskoy Arktike [Geophysical model of the earth's crust, geodynamic settings and prospects for the discovery of Pb–Zn deposits in the Russian Arctic] // *Arktika: Ekonomika i Ekologiya*. 2020. № 3. P. 87–88.

Galyamov A.L., Volkov A.V., Sidorov A.A. Zakonomernosti razmeshcheniya i osobennosti formirovaniya Pb–Zn-mestorozhdeniy mississipskogo tipa na vostochnoy okraine Sibirskoy platformy (po rezul'tatam GIS-analiza modeli glubinnogo stroyeniya zemnoy kory) [Distribution patterns and formation features of Pb–Zn-type deposits of the Mississippi type on the eastern edge of the Siberian platform

(based on the results of GIS analysis of the model of the deep structure of the earth's crust)] // *Doklady Rossiyskoy Akademii nauk. Nauki o zemle*. 2020. T. 493. № 1. P. 27–30.

Geodinamicheskaya karta Rossii, [Geodynamic map of Russia] masshtab: 1 : 10 000 000, seriya: obzornyye karty Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1 : 10 000 000, VSEGEI, 1995 g. *Didenko A.I., Malyshev YU.F., Saksin B.G.* Glubinnoye stroyeniye i metallogeniya Vostochnoy Azii [Deep structure and metallogeny of East Asia]. Vladivostok: Dal'nauka, 2010. 232 p.

Ivanov S.N., Ivanov K.S. Reologicheskaya model' stroyeniya zemnoy kory (model' tret'yego pokoleniya) [Rheological model of the structure of the earth's crust (third generation model)] // *Litosfera*. 2018. V. 18(4). P. 500–519. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-500-519

Kashubin S.N., Pavlenkova N.I., Petrov O.V., Mil'shtein Ye.D., Shokal'skiy S.P., Erinchek Yu.M. Tipy zemnoy kory Tsirkumpolyarnoy Arktiki [Types of the Earth's crust in the Circumpolar Arctic] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2013. № 55. P. 5–20.

Klyuykov 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. T. 2. P. 20–25.

Lobanov K.V., Chicherov M.V., Chizhova I.A., Plotinskaya O.Yu., Gornostayeva T.A., Sharov N.V. Glubinnoye stroyeniye i ru-

- doobrazuyushchiye sistemy Pechengskogo rudnogo rayona (Arkticheskaya zona Rossii) [Deep structure and ore-forming systems of the Pechenga ore region (Arctic zone of Russia)] // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2019. № 3(35). S. 107–122. DOI: 10.25283 / 2223-4594-2019-3-107-122
- Luchitskaya M.V.* Granitoidnyy magmatizm i stanovleniye kontinental'noy kory severnogo obramleniya Tikhogo okeana v mezozoye – kaynozoye [Granitoid magmatism and the formation of the continental crust of the northern framing of the Pacific Ocean in the Mesozoic–Cenozoic] // *Trudy GIN RAN*. Vyp. 607. Moscow: GEOS, 2014. 360 p.
- Mazukabzov A.M., Sklyarov Ye.V., Donskaya T.V., Gladkochub D.V.* Kompleksy metamorficheskikh yader Tsentral'noy Azii i ikh priroda [Complexes of metamorphic cores of Central Asia and their nature] // *Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu)* [Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)]. Vyp. 9. Irkutsk: IZK SO RAN, 2011. P. 134–139.
- Makeyev V.M., Makarova N.V.* Deformatsiya glubinnikh sloyov zemnoy kory Vostochno-Yevropeyskoy platformy: prichiny i sledstviya [Deformations of deep layers of the earth's crust of the East European Platform: causes and consequences] // *Rossiyskiy seismologicheskii zhurnal*. 2020. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/deformatsii-glubinnikh-sloyov-zemnoy-kory-vostochno-evropeyskoy-platformy-prichiny-i-sledstviya>
- Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A.* Zemnaya kora glubokikh platformennykh vpadin severnoy Yevrazii i priroda ikh 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.
- Ruchkin G.V., Konkin V.D., Kudryavtseva N.G.* Metallogenicheskiye ryady mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov v osnovnykh geotektonicheskikh obstanovkakh [Metallogenic series of deposits of non-ferrous and noble metals in the main geotectonic settings] // *Rudy i metally*. 1997. № 4. P. 30.
- Khain V.Ye., Polyakova I.D., Filatova N.I.* Tektonika i neftegazonosnost' Vostochnoy Arktiki [Tectonics and oil and gas potential of the Eastern Arctic] // *Geologiya i geofizika*. 2009. T. 50. № 4. P. 443–460.
- Bouman J., Ebbing J., Meekes S., Abdul Fattah R., Fuchs M., Gradmann S., Haagmans R., Lieb V., Schmidt M., Dettmering D., Bosch W.* GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.* 2015. V. 35. P. 16–30.
- Hacker B., Kelemen P., Behn M.* Continental Lower Crust. // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2012. № 3. 150223150959000.10.1146/annurev-earth-050212-124117.
- Holt W., Wallace T.* Crustal thickness and upper mantle velocities in the Tibetan Plateau region from the inversion of Pnl waveforms: Evidence for a thick upper mantle lid beneath southern Tibet // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 12.499–12.525.
- Huang Z., Su W., Peng Y., Zheng Y., Li H.* Rayleigh wave tomography of China and adjacent regions // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108(B2). P. 2073.
- Laske G., Masters G.* A Global Digital Map of Sediment Thickness // *EOS Trans AGU*, 1997, 78(F483).
- Map of undiscovered conventional oil and gas resources of the world // 2012
<https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/world-energy/?resource=conventional>
- Mouthereau F., Lacombe O., Vergés J.* Building the Zagros collisional orogen: Timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence // *Tectonophysics*. Elsevier, 2012. V. 532–535. P. 27–60.
- Mooney W.D.* Crust and Lithospheric Structure – Global Crustal Structure // Eds. B. Romanowicz & A. Dziewonski. Treatise on Geophysics. V. 1: Seismology and Structure of the Earth. Elsevier, 2007. P. 361–417.
- Pasyanos M.E., Masters T.G., Laske G., Ma Z.* LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2014. V. 119. P. 2153–2173. DOI: 10.1002/2013JB010626
- Pirajno F.* Hydrothermal Processes and Mineral Systems. [S. l.] // Springer Netherlands, 2009. 1252 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.