

УДК 553.041,571.56

ЛИТОСФЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СКЛАДЧАТОМ ОБРАМЛЕНИИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2022 г. А. Л. Галямов^{1,*},член-корреспондент РАН А. В. Волков¹, член-корреспондент РАН К. В. Лобанов¹

Поступило 16.05.2022 г.

После доработки 10.06.2022 г.

Принято к публикации 17.06.2022 г.

Результаты современных исследований литосферы на основе гравитационных данных спутника GOCE впервые применены для сравнительного металлогенического анализа геодинамических обстановок формирования Pb–Zn-месторождений в складчатом обрамлении Сибирской платформы. В областях с преимущественным развитием нижнего “базальтового” слоя земной коры наиболее часто встречаются осадочно-эксгальационные полиметаллические месторождения (Байкальская, Таймырская системы). Колчеданные медные и свинцово-цинковые месторождения свойственны, в основном, надсубдукционным островодужным и аккреционным обстановкам на консолидированной коре с преимущественным развитием среднего “гранитового” слоя (Енисейский кряж). Свинцово-цинковые руды MVT-типа, тесно связанные с перикратонными глубокими осадочными нефтегазоносными бассейнами на шельфе и континентальном склоне, пространственной связи со стратификацией земной коры, очевидно, не имеют. Выявлено сходство геодинамических обстановок формирования серебро-полиметаллических месторождений Южного Таймыра и Западного Верхоянья, приуроченных к перикратонным рифтогенным прогибам на пассивной континентальной окраине, что позволяет объединить их в единый серебро-полиметаллический Таймыро-Западно-Верхоянский пояс.

Ключевые слова: Сибирская платформа, GOCE, глубинная модель, цинк, свинец, серебро, месторождение

DOI: 10.31857/S2686739722600709

Стратиформные полиметаллические месторождения, согласно традиционным представлениям, формировались в интра- и перикратонных бассейнах, в островных дугах активной и задуговых бассейнах пассивной окраины [1]. Высокую промышленную ценность имеют Zn–Pb-руды, содержащие ряд высокотехнологичных металлов (Ag, Ge, In, Cd, Bi, Se, Ga). В пределах обрамления Сибирской платформы известно несколько перспективных на Pb–Zn-месторождений, включая центрально-таймырские, типизация которых и промышленная значимость дискутируется. Одни исследователи относят Таймырские месторождения к типу SEDEX [2], другие связывают их формирование с карбонатитами [3].

Для пространственного анализа размещения полиметаллических месторождений в складчатом обрамлении Сибирской платформы впервые использованы результаты современных исследований литосферы на основе гравитационных данных GOCE: модель CRUST1.0 [4] описывает строение осадочного неметаморфизованного слоя коры, содержит данные о глубине Мохо, о глубинах верхнего, среднего и нижнего слоев консолидированной коры.

Полученные космическим аппаратом GOCE гравиметрические данные стимулировали развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, позволяющих с новой стороны подойти к пониманию металлогенической специализации крупных рудных районов и провинций.

Сибирская платформа в целом характеризуется увеличенной мощностью земной коры (рис. 1). Осадочные и вулканические толщи с проявлениями интенсивного внутриплитного магматизма формируют чехол суммарной мощностью 15–20 км

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

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

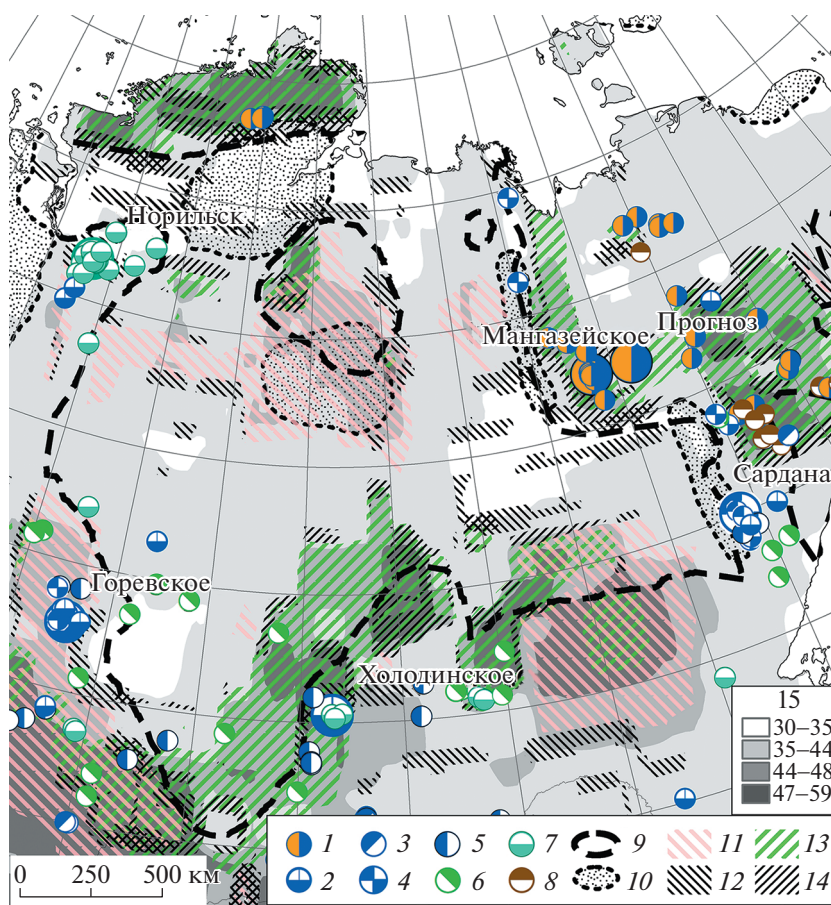


Рис. 1. Размещение полиметаллических месторождений над областями утолщенных среднего “гранитного” и нижнего “базальтового” слоев земной коры в обрамлении Сибирской платформы (по материалам [4]). 1–7 – Типы месторождений: 1 – серебро-полиметаллический, 2 – колчеданно-полиметаллический в терригенных породах, 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 осадочно-неметаморфизованного слоя коры; 11, 12 – утолщенная средняя кора и ареалы ее изменчивости, 13, 14 – утолщенная нижняя кора и ареалы ее изменчивости, 15 – общая мощность консолидированной коры (в км).

[5]. Структура фундамента Сибирской платформы представлена мегаблоками разной мощности и межблоковыми мегазонами (рис. 2 а). Наиболее мощные из них отмечаются в Восточно-Саянском и Алдано-Становом регионах. В составе мегаблоков фундамента преобладают архейские комплексы метаморфитов гранулитовой и амфиболитовой фаций, которые вскрываются на Анабарском и Алдано-Становом щитах. Межблоковые мегазоны (сутуры) сложены раннепротерозойскими комплексами ювенильной коры [5].

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.

Как видно на рис. 1 и рис. 2 б–в, полиметаллические месторождения складчатого обрамления Сибирской платформы располагаются над участками локального утолщения земной коры, которое может быть связано с коллизионными процессами и с разуплотнением вещества коры и мантии. Разуплотнение может быть вызвано реологической инверсией при расслоении коры и мантии или изменением мантийного температурного режима [6].

Разуплотнение, в частности, может происходить в результате разделения субдуктируемой коры на базальтовые и кислые расплавы [7]. Разуплотнение не является однородным, зоны резкой изменчивости проявлены в вариациях мощности коры и ее слоев, вероятно, сопровождаемых трансформными разломами. Рифтогенез, с которым связано формирование месторождений различных типов, рассматривается как следствие

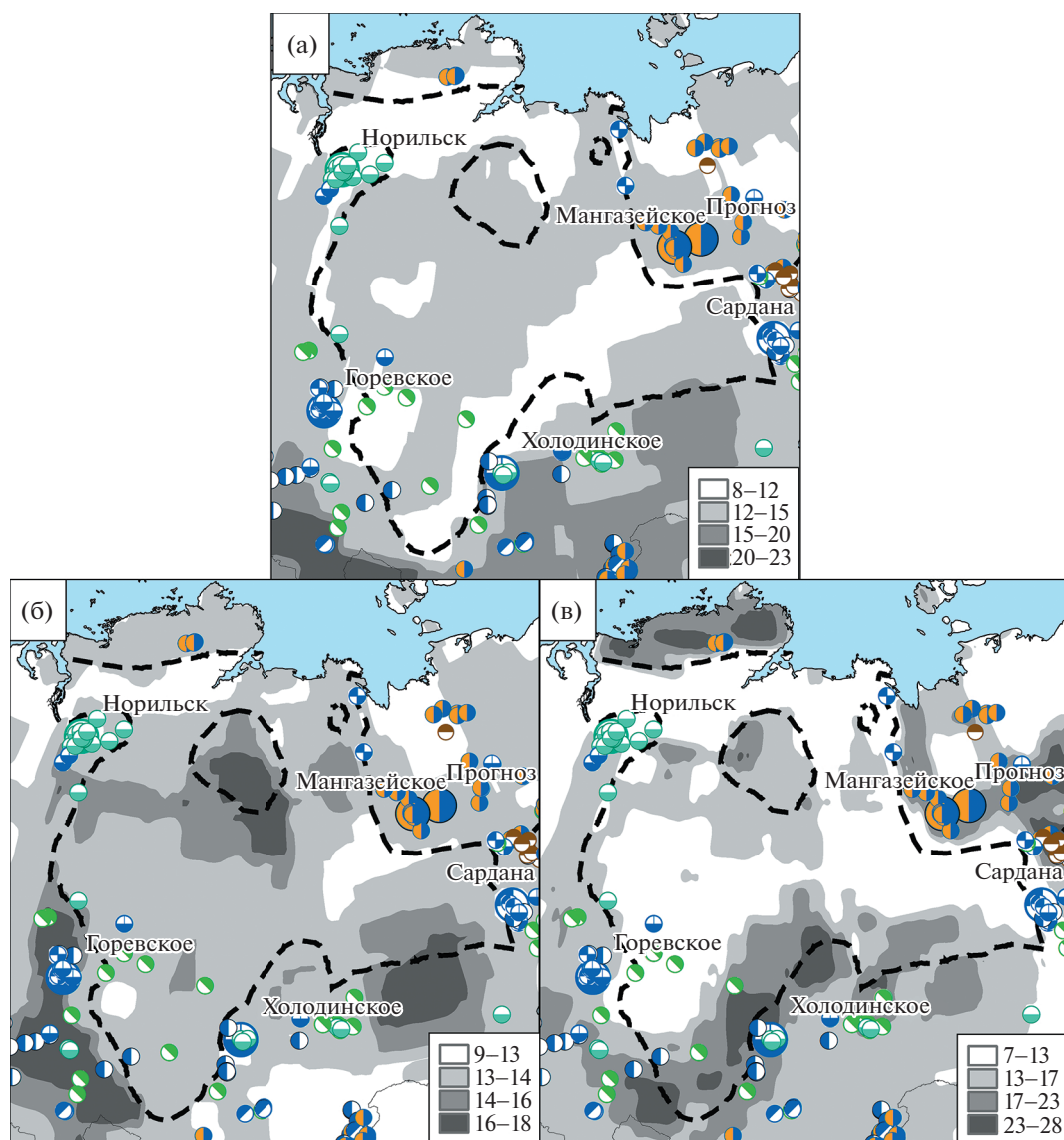


Рис. 2. Позиция полиметаллических месторождений обрамления Сибирской платформы и вариация мощности слоев консолидированной коры (по материалам [4]): а – верхнего “метаморфического”, б – среднего “гранитового”, в – нижнего “базальтового” слоев. Значения мощности представлены в км. Остальные условные обозначения см. на рис. 1.

утолщения и расслоения земной коры в результате субдукции, коллизии и орогенеза [8]. Горячий мантийный материал при этом поднимается в верхние слои коры и активизирует источники вещества в зонах рифтогенеза и магматических дуг.

На Енисейском Кряже колчеданно-полиметаллические месторождения, относящиеся к типу SEDEX, пространственно приурочены к утолщенным блокам средней “гранитизированной” коры (рис. 1, рис. 2 б). Раздвиг среднего слоя, скорее всего, связан с аккрецией островных дуг, расслоением призм и подъемом фельзитового материала в среднюю кору. Возможно, это связано с переходом пассивной континентальной окраины в активную, когда в период 760–720 млн лет фор-

мировались коллизионные и постколлизионные гранитоиды, а также с образованием вслед за этим островных дуг в Исаковской и Предивинской зонах [9]. В Исаковской островодужной зоне располагаются медно-колчеданные проявления (Кутукаское, Хариузинское 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 [9] с эксгалиационными колчеданно-полиметаллическими месторождениями (Горевское, Меркурихинское, Морянихинское, Токминское, Линей-

ное, Зырянское). 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 [10].

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. 1, рис. 2 б–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 [11].

В рифейский период сыннырское рифтообразование на шельфе сопровождалось внедрением в Олоkitский прогиб ультрабазитов Йоко-Довыренского комплекса (728 ± 3.4 млн лет) с сульфидной платиноносной Cu–Ni-минерализацией [12]. В глубоководных и застойных условиях формировались продуктивные рудные ассоциации колчеданно-полиметаллических месторождений (Холоднинское, Овгольское и др.).

Стратиформные свинцово-цинковые месторождения и проявления (тип MVT и его аналоги) в карбонатных формациях восточного обрамления Сибирской платформы, согласно глобальной модели Мохо, приурочены к бортам астеносферных поднятий (рис. 1) в пространственной относительно близости с мантийными источниками. Размещение руд MVT-типа, в составе крупных нефтегазоносных бассейнов (Лено-Вилуйская провинция), контролируется аномально глубокими перикратонными прогибами чехла платформы, сложенными мощными позднепротерозойскими терригенно-известково-доломитовыми комплексами пассивной континентальной окраины. В этот же период формировались рифтогенные комплексы соседнего Улахан-Бамского региона [13].

Месторождения MVT-типа (Сардана, Уруй и Перевальное, проявления Чагдинское, Покосное, Эсэлээхское и Прогнозное, объекты Лугун-Пуханильской группы) распределены в широкой полосе северо-западного простираения, 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. 1). Пояса сло-

жены 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.

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. 1). Сектор располагается над утолщенной нижней “базальтовой” корой, над участками ее резко изменчивой мощности (рис. 2 в).

Мощный прогиб земной коры Западного Верхоянья формировался за счет локального утолщения нижнего слоя коры, возможно, вследствие его расслоения [8]. В районе Хандыгского блока в строении земной коры отмечается раздвиг нижней коры, что может объясняться длительным воздействием верхней мантии [14]. 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 [15].

В настоящее время большинство исследователей связывает размещение серебро-полиметаллических месторождений Западного Верхоянья (Мангазейского, Прогноз, Кимпиче и др.) с аккреционно-коллизионными событиями, которые обусловили на позднеколлизионном этапе перераспределение сереброносной минерализации ранних стадий в проницаемые зоны разрывных нарушений и трещиноватости [15]. Месторождения образовались 113–82 млн лет назад [16]. Рудные тела месторождений представлены линзовидными жилами зон расщепления, прожилково-штокверковыми зонами в купольных 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 [15]. По минеральному и химическому составу руд, по морфологии рудных тел эти месторождения сходны с серебро-полиметаллическими проявления-

ми Таймыроозерского рудного района, выделенного в Южно-Таймырской зоне [13].

Геодинамическое развитие Таймырского региона также схоже с аккреционно-коллизийным формированием Западно-Верхоянского сектора. Центральная-Таймырская зона полуострова, выступая в качестве Главной сутуры между Сибирским кратоном и Свальбардской плитой, сложена аккреционными комплексами [9]. 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 [18].

В целом Таймырский регион располагается над областями утолщения нижней “базальтовой” коры и его повышенной изменчивости (рис. 1, рис. 2 в), обусловленной проявлением глубинных коромантийных разломов и магматизма. В геофизических полях севера Таймыра повсеместно выделяются коро-мантийный и вышележащий “базальтовый” слой [3].

Серебро-полиметаллические месторождения Таймыроозерского района представлены кварц-карбонатными жилами, штокверковыми зонами и брекчиями в среднекаменноугольно-пермских терригенных толщах и туфах позднепермского и раннетриасового возраста [3]. В составе сплошных и прожилково-гнездовых руд с содержаниями серебра 300–800 г/т наблюдаются серебрясодержащие галенит, сфалерит и блеклая руда, а также пирит, халькопирит, марказит и пирротин; отмечаются повышенные содержания олова.

Таким образом, сравнение геодинамических обстановок размещения Pb–Zn-месторождений в складчатом обрамлении Сибирской платформы показывает, что на территориях с преимущественным развитием нижнего “базальтового” слоя земной коры (Байкальская, Таймырская системы) наиболее часто встречаются осадочно-экспозиционные полиметаллические месторождения, часто сопровождаемые проявлениями, связанными с ультрабазитами (медно-никелевая и др.) в областях рифтогенеза и ареалах внутриплитного магматизма.

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 край). Проявления оруденения SEDEX-типа также имеют место в этих обстановках, в связи с придонной флюидной активизацией, связанной с островодужным вулканизмом.

Свинцово-цинковые руды MVT-типа, тесно связанные с перикратонными глубокими осадочными нефтегазоносными бассейнами на шельфе и континентальном склоне, пространственной связи со стратификацией земной коры, очевидно, не имеют.

Отдельно следует отметить сходство геодинамических обстановок размещения серебро-полиметаллических месторождений Таймыра и Западного Верхоянья, которые приурочены к глубоким перикратонным рифтогенным прогибам на пассивной континентальной окраине и могли бы быть объединены в единый серебро-полиметаллический Таймыро-Западно-Верхоянский пояс. Полученные результаты подтверждают потенциальную перспективность Pb–Zn-месторождений Таймыра и необходимость их дальнейших исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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: Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. P. 561–608.
2. *Лобанов К.В., Некос В.В.* Месторождения типа SEDEX-важнейший источник Zn, Pb и Ag в мире. Краткий мировой обзор. Перспективы России и Красноярского края // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. Т. 10. №. 7. С. 881–907.
3. *Проскурнин В.Ф., Гавриш А.В., Межубовский В.В., Трофимов В.Р. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Таймырско-Североземельская. Лист S-49 – Хатангский залив. Объяснительная записка. СПб: ВСЕГЕИ. 2013. 275 с.
4. *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.
5. *Егоров А.С.* Особенности глубинного строения и вещественного состава геоструктур земной коры континентальной части территории России // Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 13–30.
6. *Artemieva I.M., Meissner R.* Crustal thickness controlled by plate tectonics: a review of crust–mantle interaction processes illustrated by European examples // Tectonophysics. 2012. V. 519. P. 3–34.
7. *Hacker B.R., Kelemen P.B., Behn M.B.* Continental Lower Crust // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2015. V. 43. № 1. P. 167–205. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124117>
8. *Pirajno F.* Hydrothermal Processes and Mineral Systems / Springer science. 2009. 1250 p.

9. *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.
10. *Стримжа Т.П.* Метасоматоз – кислород – аргиллизиты (на примере Горевского Pb–Zn месторождения, Енисейский кряж): монография / Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2017. 160 с.
11. *Мельникова Т.М.* Байкальский рифт как долгоживущая система // *Известия Ирк. ГУ. Серия “Геоархеология. Этнология. Антропология”*. 2012. № 1 (1). С. 3–21.
12. *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.
13. *Дымович В.А., Васькин А.Ф., Опалихина Е.С., Кисляков С.Г. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист О–53 – Нелькан. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012 г. 364 с.
14. *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 // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. Т. 5 (3). С. 785–798.
15. *Некрасов А.И.* Геология и благороднометалльная минерализация Верхояно-Колымской складчатой области / Автореф. дисс. ученой степени доктора геол.-мин. наук. Москва. 2017. 56 с.
16. *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.
17. *Верниковский В.А.* Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области / Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996, 202 с.
18. *Самыгин С.Г.* Особенности строения и геодинамической эволюции Таймыра в неопротерозое // *Литосфера*. 2018. Т. 18 (1). С. 5–19.

LITHOSPHERIC CONTROL OF THE LOCATION OF POLYMETALLIC DEPOSITS IN THE FOLDED FRAME OF THE SIBERIAN PLATFORM

A. L. Galyamov^{a, #},

Corresponding Member of the RAS A. V. Volkov^a, and Corresponding Member of the RAS K. V. Lobanov^a

^a *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: alg@igem.ru*

The results of modern studies of the lithosphere based on the gravity data of the GOCE satellite were used for the first time for a comparative metallogenic analysis of the geodynamic settings of the formation of Pb–Zn deposits in the folded frame of the Siberian Platform. Sedimentary-exhalation polymetallic deposits (Baikal, Taimyr systems) are most often found in areas with the predominant development of the lower “basalt” layer of the earth’s crust. Pyrite copper and lead-zinc deposits are mainly characteristic of suprasubduction island-arc and accretionary environments on the consolidated crust with the predominant development of the middle “granite” layer (Yenisei Ridge). MVT-type lead-zinc ores, which are closely associated with pericratonic deep sedimentary oil and gas basins on the shelf and continental slope, obviously do not have a spatial relationship with the stratification features of the earth’s crust. The similarity of the geodynamic settings of the formation of the silver-polymetallic deposits of Southern Taimyr and Western Verkhoyansk confined to pericratonic rift troughs on the passive continental margin has been revealed, which makes it possible to combine them into a single silver-polymetallic Taimyr-West Verkhoyansk belt.

Keywords: Siberian platform, zinc, lead, silver, ore, deposit, SEDEX, MVT