

## Перспективы выявления месторождений миссисипского типа на Северо-Востоке России

А. Л. Галямов<sup>1</sup>, А. В. Волков<sup>1</sup>, К. Ю. Мурашов<sup>1</sup>, Н. В. Сидорова<sup>1</sup>, Т. П. Кузнецова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35, e-mail: alg@igem.ru

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ), 117545, Москва, Варшавское шоссе, 129, корп. 1, e-mail: okt@tsnigri.ru

Поступила в редакцию 13.03.2019 г., принята к печати 05.05.2019 г.

**Объект исследований.** Месторождения миссисипского типа составляют около трети в мировом балансе запасов, ресурсов и добычи, свинца и цинка, помимо которых в рудах могут присутствовать серебро, сурьма, мышьяк, барий, висмут, кадмий, кобальт, галлий, индий, ртуть, молибден, никель и таллий. На Северо-Востоке России месторождения этого типа представлены слабо, наиболее известными из них являются месторождения Сарданского рудного узла Республики Саха (Якутия) и отдельные месторождения Магаданской области, исследованию которых и посвящается настоящая работа. **Методы.** В статье рассматриваются и обсуждаются результаты научно-исследовательских работ, предшествующие и новые данные по геохимическим особенностям, изотопному составу руд и геолого-структурным условиям формирования месторождения Сарданского узла. Кроме того, потенциал выявления стратиформных свинцово-цинковых месторождений связан с установлением благоприятных геодинамических обстановок в регионе, уточнением и адаптацией прогнозно-поисковой модели месторождений MVT для Северо-Востока России. **Результаты.** Минералого-геохимические особенности пород и руд месторождений Сарданского узла, морфология рудных тел, элементы зональности в них, а также изотопные соотношения указывают на принадлежность руд, скорее, к миссисипскому типу с началом рудоотложения на стадиях диагенеза и катагенеза. Распределение редких элементов указывает на заметную роль наложенного метаморфизма вмещающих карбонатно-терригенных толщ в отложении руд продуктивных стадий. **Заключение.** Потенциальная возможность наращивания минерально-сырьевой базы свинца и цинка связана с выявлением осадочных бассейнов с застойным аноксическим режимом карбоната накопления в непосредственном соседстве с областями развития рифтогенных комплексов, а также с наличием других критически важных прогнозно-поисковыми признаков. Помимо известной Кыллахской металлогенической зоны, к таким областям относится Туора-Сисский и Орулганский металлогенические таксоны на севере Республики Саха (Якутия) с известными стратиформными проявлениями свинца и цинка.

**Ключевые слова:** Северо-Восток России, Сардана, цинк, свинец, руда, геохимия, микроэлементы, РЗЭ, месторождение, миссисипский тип, поисковая модель, перспективы

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке темы ИГЕМ РАН “Металлогения уникальных рудных районов вулканогенных поясов и зон орогенеза различного возраста окраинноморской литосферы Северо-Востока Азии” и программы Президиума РАН № 48 “Месторождения стратегических и высокотехнологических металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения”.

## Prospects for identifying the Mississippi Valley type deposits in the North-East of Russia

Andrei L. Galyamov<sup>1</sup>, Aleksandr V. Volkov<sup>1</sup>, Konstantin Yu. Murashov<sup>1</sup>,  
Nina V. Sidorova<sup>1</sup>, Tatiana P. Kuznetsova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, 35 Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia, e-mail: alg@igem.ru

<sup>2</sup>Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals (TsNIGRI), 129 block 1 Varshavskoye highway, Moscow 117545, Russia, e-mail: okt@tsnigri.ru

Received 13.03.2019, accepted 05.05.2019

**Для цитирования:** Галямов А.Л., Волков А.В., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В., Кузнецова Т.П. (2020) Перспективы выявления месторождений миссисипского типа на Северо-Востоке России. *Литосфера*, **20**(2), 254-270. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-254-270

**For citation:** Galyamov A.L., Volkov A.V., Murashov K.Yu., Sidorova N.V., Kuznetsova T.P. (2020) Prospects for identifying the Mississippi Valley type deposits in the North-East of Russia. *Litosfera*, **20**(2), 254-270. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-254-270

© А.Л. Галямов, А.В. Волков, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова, Т.П. Кузнецова, 2020

**Research subject.** The Mississippi Valley type deposits make up about a third of the global balance of lead and zinc reserves, resources and production. Additionally, silver, antimony, arsenic, barium, bismuth, cadmium, cobalt, gallium, indium, mercury, molybdenum, nickel and thallium can be present in the ores of these deposits. In the North-East of Russia, the Mississippi Valley type of deposits is poorly represented. In this work, we investigate the deposits of the Sardana ore cluster of the Republic of Sakha (Yakutia) and individual deposits of the Magadan region. **Materials and methods.** The article discusses the results of previous scientific research and new data on the geochemical features, isotopic composition of ores and geological and structural conditions for the formation of the Sardana cluster deposit. In addition, the potential for identifying stratiform lead-zinc deposits is associated with favourable geodynamic conditions in the region, as well as with the refinement and adaptation of the forecast-search model of MVT deposits for the North-East of Russia. **Results.** The mineralogical and geochemical features of the rocks and ores of the Sardana cluster deposits, the morphology of ore bodies, their zoning elements, as well as isotopic ratios indicate that the ores are likely to be of the Mississippi Valley type with the onset of ore deposition at early diagenetic and catagenetic stages. The distribution of rare elements indicates a significant role of superimposed metamorphism of the host carbonate-terrigenous strata in the deposition of the ores of producing stages. **Conclusion.** The potential possibility of increasing the mineral and raw material base of lead and zinc is associated with the identification of sedimentary basins with a stagnant anoxic regime of carbonate accumulation in the immediate vicinity of the development areas of rift complexes, as well as with the presence of other critically important forecast-search signs. In addition to the well-known Killakh metallogenic zone, Tuora-Sis and Orulgan metallogenic taxa located in the north of the Republic of Sakha (Yakutia) with known stratiform manifestations of lead and zinc belong to such areas.

**Keywords:** Northeast of Russia, Sardana deposit, zinc, lead, ore, geochemistry, trace elements, REE, deposit, Mississippi Valley type, prospecting model, prospects

**Acknowledgments**

This work was financially supported by the IGEM RAS theme “Metallogeny of unique ore regions of volcanogenic belts and orogenic zones of different ages of the marginal sea lithosphere of North-East Asia” and the RAS Presidium programme No. 48 “Deposits of strategic and high-tech metals of the Russian Federation: placement patterns, formation conditions, innovative forecasting and development technologies”.

**ВВЕДЕНИЕ**

Свинцово-цинковые месторождения миссисипского типа (MVT) весьма широко распространены в мире (рис. 1). В общем мировом балансе их запасы и ресурсы составляют около 27%, а удельный вес всех месторождений этого типа в мировой добыче свинца и цинка – около 30% (Тикканен, 1986). Крупнейшие и наиболее разведанные место-

рождения расположены в Северной Америке (бассейн р. Миссисипи). Основную долю глобальных запасов обеспечили крупнейшие месторождения Вибурнум, Браши Крик, Флетчер (США); Пайн-Пойнт, Поларис (Канада); Тара, Наван (Ирландия); Реосин, Рубиалес (Испания), Ангуран (Иран), Тунсвит (Марокко). С распадом СССР основная сырьевая база месторождений этого типа осталась в Казахстане (Миргалимсай, Ачисай, Шалкия). В Рос-



Рис. 1. Глобальное размещение свинцово-цинковых месторождений Миссисипского типа.

Fig. 1. Global distribution of lead-zinc ore MVT deposits.

сии известные месторождения MVT составляют всего около 10% от общего количества свинцово-цинковых месторождений.

В рудах MVT помимо основных металлов, могут присутствовать серебро, сурьма, мышьяк, барий, висмут, кадмий, кобальт, галлий, индий, ртуть, молибден, никель и таллий, повышенные содержания которых обусловлены влиянием геодинамических обстановок формирования соседних металлогенических провинций.

На Северо-Востоке России из широко распространенных месторождений и рудопроявлений миссисипского типа наиболее известны месторождения Сарданского рудного узла Республики Саха (Якутия) и отдельные месторождения Магаданской области. Балансовые запасы категории C<sub>2</sub> свинца и цинка на месторождении Сардана за период около 20 лет не претерпели изменений и по состоянию на 2017 г., согласно Государственному докладу “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах”, составляют 0.592 и 1.926 млн т соответственно. По данным “Дальнедра” в 2001 г. были апробированы также прогнозные ресурсы по категории P<sub>1</sub>, которые составили: свинца – 2.007 млн т, цинка – 6.473 млн т, германия – 6.6 тыс. т, кадмия – 23.6 тыс. т, серебра – 3500 т.

Проблема изучения месторождений (MVT) Северо-Востока России особенно актуальна в связи с тем, что темпы роста цен на цинк и другие попутные высокотехнологичные элементы в рудах этих месторождений на фоне растущего дефицита на мировом рынке, по прогнозам Morgan Stanley, в ближайшей перспективе могут быть самыми значительными среди других цветных и редких металлов.

В статье обсуждаются результаты научно-исследовательских работ, направленных на оценку перспектив выявления крупных месторождений MVT типа на Северо-Востоке России по проекту “Разработка научных основ прогнозирования крупнотоннажных месторождений цветных и благородных металлов в металлогенических провинциях Востока России” программы Президиума РАН № 48 “Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения”. Одна из задач работы заключалась в подтверждении высокого потенциала выявления крупных свинцово-цинковых месторождений, в том числе стратиформных, в связи с благоприятными геодинамическими условиями развития региона и в адаптации известной прогнозно-поисковой модели месторождений MVT для Северо-Востока России. В комплекс признаков включены результаты изучения современными методами геохимических особенностей руд месторождения Сардана и содер-

жания в них высокотехнологичных попутных (критических) металлов в целях получения новой информации об условиях рудообразования.

## ПОИСКОВАЯ МОДЕЛЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ MVT

Месторождения MVT относятся к крупной группе свинцово-цинковых месторождений в осадочных породах, которая состоит из разнообразных объектов, в большом количестве залегающих среди карбонатных толщ и не имеющих явной генетической связи с магматической активностью. Эти месторождения исторически являются важными ресурсами свинца и цинка в мире и продолжают доминировать в мировом производстве. Наиболее известны такие объекты, как Адмирал Бэй (Австралия), Пайн Пойнт (Канада), Фанкоу (КНР), Мехди-абад (Иран), Наван (Ирландия), Комдок (КНДР), Реосин (Испания), месторождения США (Бюик, объекты Миссисипской долины, Три Стейт). В России известно месторождение Сардана в Республике Саха, где кроме него выявлены и частично оценены Агакуканское, Лугун, Менгенильер, Перевальное, Пуханил, Уруй, Урультун.

Выделение типа MVT, как и типа SEDEX, не является идеальным, эти категории не имеют однозначных отличительных признаков. Месторождения этих типов представляют собой группу связанных подтипов, различающихся между собой по ограниченному набору признаков. По характеру рудообразующей среды и морфологии рудных тел, а также по сходным признакам до сих пор в мире разрабатываются их генетические модели. Множество классификаций свинцово-цинковых месторождений в литературе основано на таких признаках, как литология вмещающих пород, морфология залежей (стратоидность, стратиформность) или генетические характеристики (сингенетичность, конседиментационность, синдиогенетичность). В зарубежных публикациях среди свинцово-цинковых месторождений MVT типа выделяются собственно апалачский, альпийский, блейбергский, верхнесилезский, реосинский и ирландский подтипы (Leach et al., 2010a, b). Широко известны отечественные классификации, разработанные Д.И. Горжевским, П.Ф. Иванкиным, А.Д. Щегловым, В.В. Поповым, Н.С. Скрипченко, В.П. Феоктистовым, Э.И. Кутыревым и др.

Наиболее часто в отечественной литературе приводится классификация, основанная на представлениях Э.И. Кутырева, согласно которой стратиформные свинцово-цинковые месторождения в карбонатных породах разделяются на подтипы (Донец и др., 2017): собственно миссисипский, силезско-краковский, сарданский, миргалымсайский, шалкиинский, учкулачский, горевский и барвинский. В приведенной классификации, несмо-

тря на ее сравнительную полноту, в полной мере проявлена неоднозначность признаков месторождений и, как следствие, сидерит-кварц-сфалерит-галенитовый подтип руд Горевского объекта в сланцево-карбонатной формации является переходным подтипом к типу SEDEX. Сарданский тип был выделен в основном благодаря повышенной германиенности руд. Вместе с тем такой же набор элементов-примесей установлен и в рудах кентуккийских и иллинойских свинцово-цинковых объектов в США, в сфалерите которых обнаруживается в среднем 300 г/т германия. Месторождения залегают в выщелоченных метасоматических доломитах раннего ордовика. Рудная минерализация представлена красновато-коричневым клейофаном, галенитом, пиритом, флюоритом и баритом.

Поэтому отсутствие подходящей терминологии, а также широкое использование неоднозначных признаков при выделении подтипов побудили авторов данной статьи, вслед за предшественниками (Leach et al., 2010a, b), использовать обобщенное описание подтипов MVT-месторождений.

Характерная особенность месторождений типа MVT заключается в основном в их залегании в платформенных и субплатформенных карбонатных толщах на флангах осадочных бассейнов пассивной континентальной окраины, затронутой наложенными процессами коллизии, в отсутствии прямой связи с магматизмом и эпигенетическом облике руд (табл. 1). В состав региональных признаков MVT-месторождений, по общему мнению, входит ряд стратиграфических, формационных, тектони-

Таблица 1. Индикаторные признаки месторождений миссисипского типа

Table 1. Features of MVT ore deposits

| Признаки             | Критерии   |
|----------------------|--|
| Палеогеодинамические | Краевые фланги платформенных карбонатных осадочных, в том числе нефтегазонасных, бассейнов пассивной континентальной окраины с эвапоритовыми условиями, рифовыми органогенными постройками, локальными застойными впадинами с повышенными мощностями рудовмещающих литофаций с проявлениями наложенных ТМА, локальными компрессионными поднятиями и соляными диапирами, континентальными рифтогенными прогибами  |
| Формационные         | Рудовмещающие отложения, характеризующиеся литофациальной неоднородностью (переслаивание доломитов и известковистых доломитов различной структуры, органогенные известняки и доломиты, карбонатные брекчии, углесто-глинисто-кремнисто-карбонатные породы, аргиллиты). Потенциально рудоносные фации рудоносной субформации – отложения мелкозаливных фаций (иловые, застойные лагунные, донные и рифообломочные). Стратоуровни с сингенетичной сульфидной минерализацией. Наличие в подрудных толщах песчано-глинистых отложений с признаками катагенетических преобразований |
| Литологические       | Доломиты и известняки – органогенные, анкеритовые, биокластические, битуминозные, мраморизованные, окремненные и песчанистые; глинистые биомикриты, черные сланцы, известковые и доломитовые брекчии, мергели, известковые илы и сланцы, кремнистые сланцы, песчаники, палеокарст  |
| Структурные          | Области палеогеогеологической разгрузки вдоль проницаемых горизонтов, поверхностей несогласия или глубинных разломов. Складки изоклинальные, пологие, штамповые, разрывы сдвиговые, сбросовые, взбросовые, постминерализационная милонитизация, трещиноватость   |
| Метасоматические     | Локальные зоны развития калишпатизации, каолинизации, доломитизации, окремнения, вкрапленности битумов с сульфидами, фиксирующие участки палеогеогеологической разгрузки подземных растворов   |
| Минералогические     | <i>Главные</i> минералы руд – сфалерит, галенит, пирит, пирротин. <i>Примеси</i> – арсенипирит, борнит, буланжерит, бурнонит, бравоит, гематит, халькозин, халькопирит, хризоколла, киноварь, кобальтин, ковеллин, фрейбергит, магнетит, марказит, молибденит, пираргирит, стибнит, сульфосоли серебра, теннантит, тетраэдрит, уранинит, ванадинит, виллемит, вульфенит, вюртцит, цинкит, Au, Ag, электрум<br><i>Гипергенные</i> – азурит/малахит, каламин, церуссит, англезит, гетит, лимонит, смитсонит  |
| Геохимические        | Зональные геохимические ореолы свинца, цинка, бария, серебра, кадмия в пределах площадей развития рудовмещающих отложений. Шлиховые ореолы галенита, сфалерита, барита   |

Источники: (Донец, 2003; Paradis, Hannigan, 2007; Leach et al., 2010b).

Sources: (Donets, 2003; Paradis, Hannigan, 2007; Leach et al., 2010b).

ческих, минералогических, геохимических и геофизических критериев и признаков. Кроме прямых признаков рудоносности (множественные площадные проявления стратиформной минерализации), важный признак – наличие эвапоритовых фаций в платформенных и субплатформенных карбонатных толщах, залегающих на складчатом метаморфическом основании и соседствующих с областями активного вулканизма и орогенеза и областями развития карбонатных и терригенно-карбонатных формаций и палеодепрессий с застойным режимом. Особое значение имеет наличие органогенных построек, склоновых брекчий, палеокарстовых аралов, зон фациальной смены литологического состава формаций, зон палеогидрогеологической разгрузки, стратоуровней с сингенетичной сульфидной минерализацией (Донец, 2003). Важна также анизотропия свойств вмещающей среды, служивших ловушками для минерализованных растворов. Наиболее часто в породах месторождений отмечаются брекчии обрушения, пространственно приуроченные к разрывным и трещинным структурам (Leach et al., 2010b).

С месторождениями часто соседствуют объекты других рудноформационных типов, например SEDEX, который традиционно описывается как конседиментационно-диагенетический, в отличие от MVT, руды которого обычно характеризуются эпигенетическим обликом. Между тем различие между этими типами руд довольно неоднозначное, поскольку на первых стадиях руды могли формироваться в низкотемпературных условиях при взаимодействии нелитифицированных осадков и металлоносных рассолов. Основное различие этих типов обусловлено неодинаковыми геодинамическими обстановками формирования их рудовмещающих формаций, что в значительной степени определило специфику процессов рудоотложения, морфологические особенности рудных тел и различные геолого-промышленные типы руд.

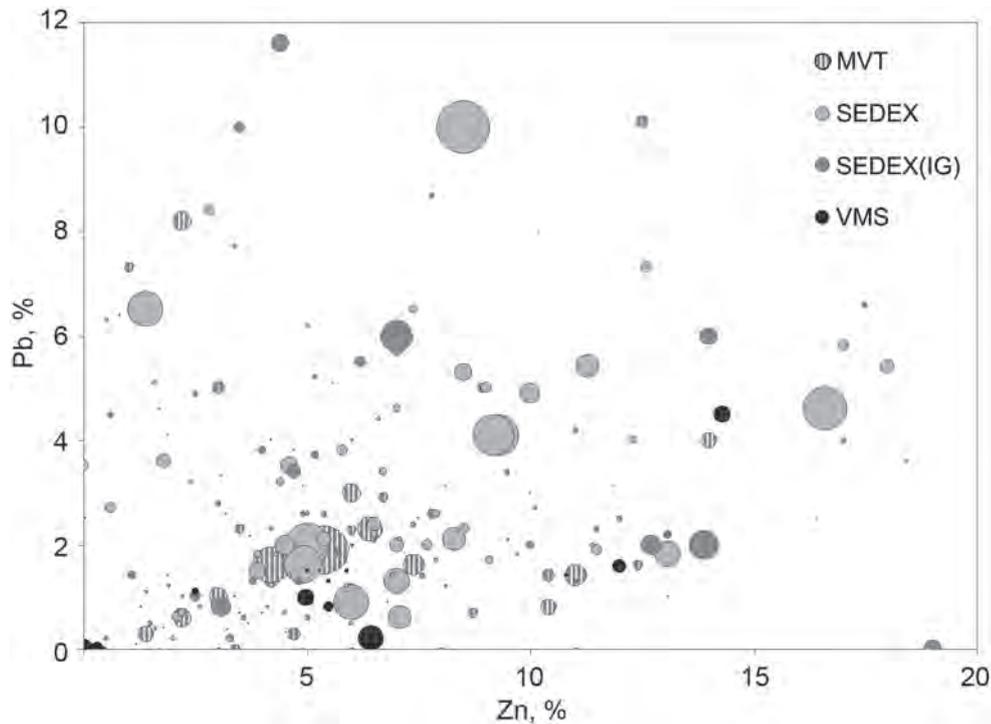
С рудами MVT также ассоциируют типы: SSPb (SandStone hosted lead), к которому относятся слабо изученные месторождения с рассеянным галенитом в кварцевых и кварцитовых песчаниках базальных частей осадочных разрезов; жильные свинцово-цинковые и флюорит-баритовые месторождения Кентукки и Нью Мексико в США, а также дистальные свинцово-цинковые скарны (Эль Мохито в Гондурасе) и руды типа Монто (Николаевское, Россия).

Ресурсы отдельных месторождений обычно составляют менее 2 млн т суммарного металла, а содержания редко превышают 10% (по сумме металлов) при преобладании цинка (Paradis et al., 2007). Площади месторождений обычно занимают значительные территории. Так, в бассейне р. Миссисипи в пределах нескольких таких районов расположены до 400 разномасштабных месторожде-

ний и это, скорее всего, связано с более или менее одинаковыми геодинамическими обстановками накопления осадочных формаций и их последующих преобразований в ходе диагенеза, катагенеза и эпигенеза.

Кроме свинца и цинка, руды миссисипского типа содержат металлы стратегической группы (Бортников и др., 2016). Вместе с тем количество материалов их изучения в рудах месторождений весьма невелико (Verplanck, Hitzman, 2016). Германий, галлий, кобальт и, реже, рений выявлены в рудах миссисипского типа. Наиболее ярким примером кобальтовых руд могут служить месторождения в рудном районе Южного Миссури, где, по данным R.D. Hagni (1983), выявлено 60 г/т Co в виде зигенита, флетчерита, карролита, а также включений в сфалерите. Присутствие галлия также отмечено на месторождении Ред Дог (тип SEDEX), где его содержания, по материалам Alaska Department of Environmental Conservation, составляют до 26 г/т, на ирландском месторождении Лишин (тип Irish, аналогичен MVT) – достигают 73 г/т. В сфалерите галлий отмечается в количестве 7–50 г/т, чаще всего он присутствует в клейофане. Германий в рудах миссисипского типа присутствует совместно с медными минералами в виде реньерита, германита, бриартита и в кадмийсодержащем сфалерите. Содержания германия в последнем здесь заметно выше и повсеместно учитываются в балансовых запасах. На месторождении Ред Дог эти величины достигают около 80 г/т при средних значениях 0.8–22 г/т. Месторождения типа MVT – Кипуши и Цумеб – исторически являются крупнейшими производителями германия, где по данным Ivanplats Limited с 1956 г. добыто 278 т этого элемента. Причины накопления индия в рудах изучено также слабо, известно, что он присутствует в рудах обычно с высоким содержанием марматита (Три Стейт, Вибурнум, Лишин).

Соотношение содержания свинца и цинка на месторождениях MVT сравнительно стабильные, количество цинка в рудах обычно больше, чем свинца, в среднем составляя 2–3/1, и в этом проявлено одно из немногих отличий от объектов типа SEDEX, в которых отношение Zn:Pb варьирует в гораздо более широких пределах (рис. 2). Многочисленные исследования показывают, что, кроме различного состава вмещающих пород, связанного с геодинамической позицией осадочных бассейнов, и некоторых текстурных различий в облике руд и морфологии рудных тел поздних продуктивных стадий, эти месторождения имеют много общих признаков. К ним относятся общий минералогический состав и текстуры руд ранних стадий, комплекс примесей в рудах, изотопный состав свинца и серы, отражающий многообразие их источников (Зайцев, Костин, 1999), структурные факторы контроля оруденения поздних стадий.



**Рис. 2.** Соотношение содержаний свинца и цинка на месторождениях миссисипского (MVT), эксгаляционного (SEDEX) и колчеданных (VMS) типов (с использованием материалов (Leach et al., 2010a, b; Paradis et al., 2007).

SEDEX(IG) – эксгаляционные месторождения, соседствующие с выходами гранитоидов сиенитового и тоналитового рядов; размеры значков отражают сравнительный размер запасов и прогнозных ресурсов.

**Fig. 2.** Ratio of grades of lead and zinc in the ores of MVT, SEDEX and VMS types by (Leach et al., 2010a, b; Paradis et al., 2007).

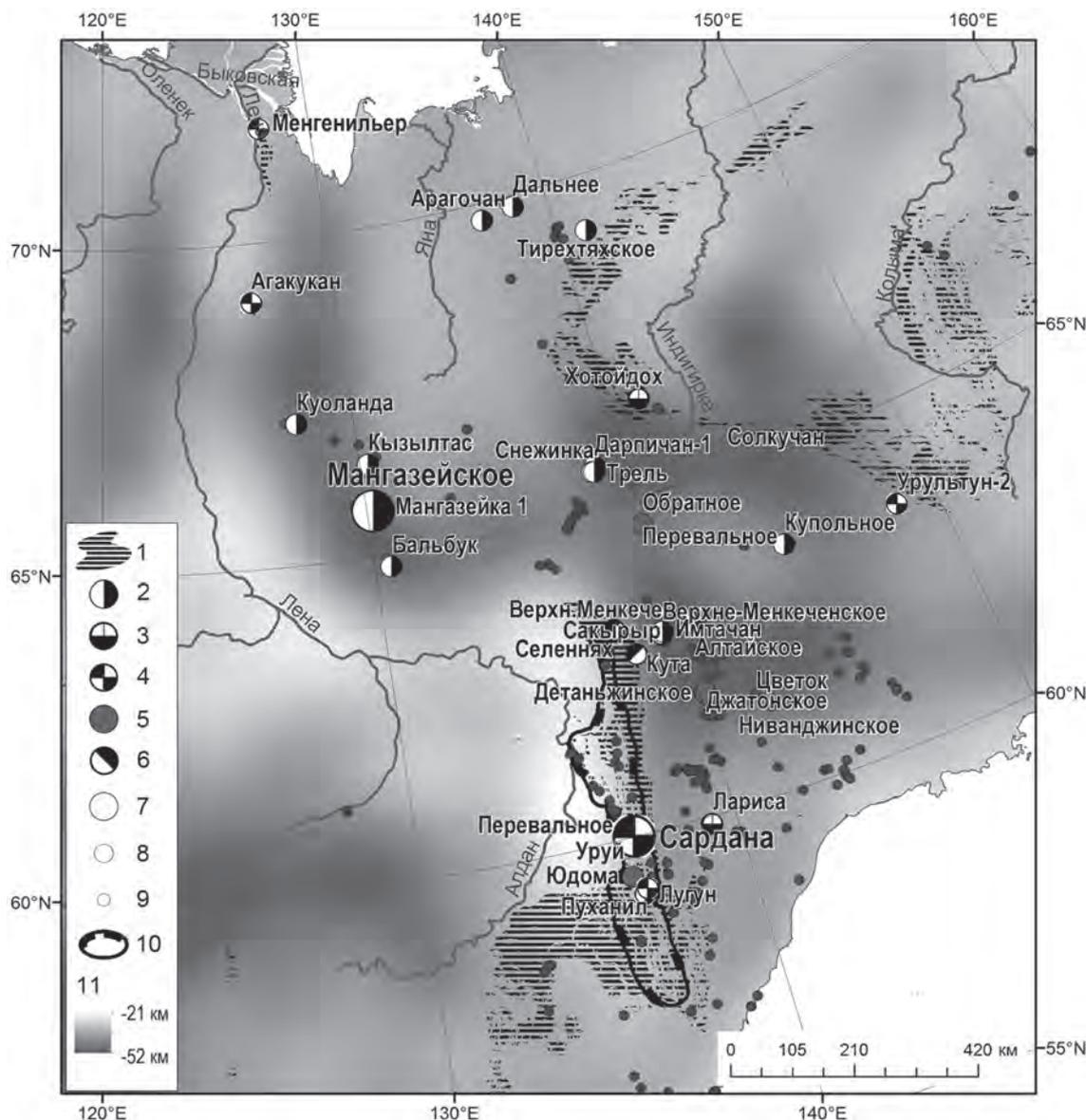
SEDEX(IG) – exhalation ore deposits adjacent to syenite and tonalite intrusions; the size of circles reflect the resources.

Большинством исследователей признается существование ряда между месторождениями типов SEDEX и MVT. Эти месторождения могли формироваться в соседствующих геодинамических обстановках. Первые формировались в интракратонных и эпикратонных рифтогенных прогибах с высокими скоростями прогибания и осадконакопления. Вторые размещаются в платформенных и субплатформенных карбонатных толщах пассивной континентальной окраины, обычно ассоциируют с баритом или флюоритом и, в отличие от SEDEX-типа, обычно имеют ярко выраженный эпигенетический облик. Вместе с тем известны многочисленные находки руд ранних стадий, в которых имеются признаки оползневых процессов. При сравнении в месторождениях этих типов часто выявляются общие признаки (Галямов и др., 2018), что является основанием для объединения части дистальных SEDEX-фаций и периферических фаций MVT. Вместе с тем средние и максимальные запасы и ресурсы MVT-месторождений заметно меньше (см. рис. 2). Например, ресурсы крупнейшего MVT-месторождения Пайн Пойнт в Канаде усту-

пает SEDEX-месторождениям: Брокен Хилл, Мак Артур, Ред Дог и др.

#### MVT-МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

На Северо-Востоке России стратиформные свинцово-цинковые месторождения миссисипского типа располагаются вдоль восточного фаса Сибирской платформы и залегают в вендских субплатформенных осадках карбонатной и терригенно-карбонатной формаций. Характерны широкая площадная зараженность металлами верхних частей вендского разреза, пространственная связь месторождений с конседиментационным палеоподнятием и доломитовыми фациями на его внутреннем склоне. Здесь, на юго-восточном фланге платформы, выделена Кыллахская металлогеническая зона, одна из самых крупных свинцово-цинковых зон страны, где известны основные свинцово-цинковые месторождения – Сардана, Перевальное и Уруй. Граница платформы (рис. 3) подчеркивается зонами астеносферных



**Рис. 3.** Позиция свинцово-цинковых месторождений Северо-Востока России в структуре поверхности Мохо (с использованием материалов (Bouman et al., 2015)).

1 – карбонатные комплексы; 2–6 – месторождения: 2 – серебро-полиметаллические, 3 – колчеданно-полиметаллические, 4 – свинцово-цинковые в карбонатных породах (MVT), 5 – свинцово-цинковые жильные в разнообразных породах, 6 – олово-серебро-полиметаллические; 7–9 – размеры месторождений: 7 – крупные, 8 – средние и мелкие, 9 – рудопроявления; 10 – контуры Кыллахской металлогенической зоны; 11 – глубина поверхности Мохо (км).

**Fig. 3.** Position of lead-zinc ore deposits of North-East Russia relatively to Moho surface structure with materials by (Bouman et al., 2015).

1 – carbobate sequences; 2–6 – ore deposits: 2 – silver-base metal deposits, 3 – VMS type deposits, 4 – lead-zinc stratiform in carbonate rocks (MVT), 5 – base metal vein deposits, 6 – tin-silver-base metal; 7–9 – deposit scale: 7 – large, 8 – ordinary and small, 9 – occurrences; 10 – Kyllakh metallogeny zone; 11 – Moho surface.

поднятий (Bouman et al., 2015), а передовые прогибы Верхоянской складчатой зоны, к которым приурочены серебро-полиметаллические месторождения Мангазейской группы, выражены контрастными мегааномалиями гравитационного поля.

Вендские отложения, вмещающие стратиформные свинцово-цинковые руды, составляют юдомскую серию и отделены от подстилающих и перекрывающих образований перерывами с некоторым угловым несогласием. Базальные слои се-

рии (юкандинская свита) с размывом и небольшим угловым несогласием в первые градусы лежат на доломитах среднего рифея и на терригенных сериях верхнего рифея. Свита сложена тонкозернистыми известняками с редкими линзочками кремней, известковистыми аргиллитами и мергелями с прослоями тонкозернистых известняков и доломитами с оолитовой структурой. В породах свиты постоянно присутствует мелкокристаллический пирит, образующий иногда мелкие гнездовидные скопления. Наибольшая мощность свиты в 200 м зафиксирована в бассейне р. Аллах-Юнь (вблизи устья р. Чагды, ее притока), а к северу и к югу она уменьшается до нуля.

Рудовмещающая сарданинская свита также с размывом налегает на юкандинские слои, на севере Кыллахской зоны ее базальные слои перекрывают доломиты среднерифейской ципандинской свиты. Сарданинская свита состоит из двух подсвит. Нижняя имеет общий терригенно-карбонатный состав, а верхняя – существенно карбонатный. Нижняя подсвита подразделяется на три пачки. Нижняя представлена средне- и мелкозернистыми кварцевыми песчаниками с массивными, часто горизонтально- и косослоистые. Иногда в основании пачки присутствует маломощный прослой кварцевых гравелитов и гальки. В песчаниках отмечаются признаки регенерации и избирательной перекристаллизации и рассеянная тонкая вкрапленность пирита и гидроокислов железа. Мощность пачки изменяется от 45 м на юге до 15–30 м на севере. Средняя пачка сложена плитчатыми вишнево-красными и зеленовато-серыми пелитоморфными глинистыми доломитами. Красный цвет пород обусловлен повышенным содержанием окислов железа, а зеленый – более поздней редукцией этих окислов (Стратиформные..., 1979). Среди доломитов средней пачки установлены маломощные слои кристалло-, витро-литокластических туфов щелочных эффузивов (Давыдов, 1981). Мощность пачки варьирует с юга на север территории от 20–55 до 65–70 м. Верхняя пачка состоит из голубовато-серых плитчатых тонкозернистых известняков с горизонтальной и волнистой слоистостью. В породе наблюдаются равномерно рассеянные ромбоэдры доломита, иногда образующие тонкие прослойки, к которым приурочены мелкие обломки и стяжения фосфатного вещества и вкрапленники пирита. К югу от территории количество доломита в известняках резко увеличивается. Мощность пачки составляет 5 м.

Верхняя подсвита также объединяет три пачки. Нижняя представлена светло-серыми мелкозернистыми доломитами с неяснослоистой и массивной текстурами. Они отличаются стабильностью минерального состава. Средняя пачка сложена битуминозными серыми и темно-серыми горизонтально-слоистыми доломитами и известняками. Состав

пачки латерально изменяется от известняков до доломитов. Горизонтальная слоистость пород подчеркивается чередованием прослоев с различной степенью раскристаллизованности порообразующего карбоната. Слабо перекристаллизованный доломит имеет неправильно-изометричную форму и 0.01–0.05 мм в поперечнике. Перекристаллизованный карбонат характеризуется идиоморфными очертаниями выделений и увеличенными размерами выделений до 0.15 мм. В них отмечается ясная зональность, выражающаяся в наличии центрального ядра буроватого цвета, насыщенного глинисто-органическим веществом, и чистой периферической каемки. Неправильные зерна целиком состоят из буроватого доломита. Такое строение соответствует, по-видимому, двум фазам образования современной структуры породы (Стратиформные..., 1979). Мощность пачки составляет от 5 до 40–55 м.

Строение верхней пачки определяется фациальными изменениями в составе карбонатных пород (Стратиформные..., 1979). Юго-западный сектор Кыллахской зоны включает ареал распространения мелко- и среднезернистых массивных сахаровидных доломитов, которые в северо-восточном направлении от месторождения Сардана фациально сменяются серыми тонкозернистыми известняками. Полоса фациального изменения вытянута в север-северо-западном направлении вдоль склона конседиментационного поднятия. Сахаровидные доломиты отличаются высокой чистотой химического состава. Содержание углерода в них низкое – 0.01–0.08%. Порода состоит из неправильно-ромбоэдрических и, реже, ромбоэдрических зерен, размером 0.04–0.8 мм. В неяснослоистых разностях установлено чередование полос различной размерности зерен. Иногда в доломитах встречаются гнезда крупных идиоморфных выделений с кавернами. Также отмечаются стилолитовые швы, в которых содержатся пирит; железа в сутурах содержится в десятки, свинца – в сотни, а цинка – в тысячу раз больше, чем в породах (Давыдов, Лескова, 1981). Известняки, фациально сменяющие доломиты к северо-востоку, содержат гнезда, послойно-линзовидные скопления и сплошные блоки перекристаллизованных карбонатов. В полосе фациальной смены доломиты представлены линзами светло-серых мелкозернистых пород среди серых тонкозернистых слоистых известняков с цепочечными кремневыми стяжениями. Часто доломиты в линзах имеют полосчатый “збровидный” облик, связанный с послойной перекристаллизацией.

На генезис вендских доломитов Кыллахской зоны имеются три точки зрения. Согласно первой, все эти породы, будучи перекристаллизованными строматолитовыми постройками, являются первично-осадочными и по латерали фациально замещаются известняками (Иогансон и др., 1976), вторая точка

зрения предусматривает метасоматическое происхождение как сахаровидных, так и полосчатых доломитов (Ручкин и др., 1977). Третья версия сближена с первой и предполагает смешанную природу сахаровидных доломитов (Стратиформные..., 1979). Метасоматическими считаются лишь полосчатые доломиты линзовидных тел. Остальные доломитовые толщи, как и доломиты среднего рифея, имеют раннее, докатагенетическое происхождение, на что указывают реликтовые выделения глауконита и фрамбоидального пирита. Такие же доломиты встречаются в рифейских разрезах.

Свинцово-цинковые стратиформные месторождения (Сардана и др.) сосредоточены в наиболее узкой части металлогенической зоны, где линейные складки более асимметричны и осложнены нарушениями. Месторождение Сардана в 1971 г. в ходе геолого-съемочных работ масштаба 1 : 200 000 было открыто А.И. Горбуновым с коллегами как свинцово-цинковое проявление. Эти авторы выявили стратиформный характер оруденения, установили германиеносность руд, дали прогнозную оценку рудопоявления. Рудные сечения были вскрыты канавами и скважинами в пологих и в крутых крыльях, а также в мульде Сарданской синклинали. Находящееся южнее в 10 км месторождение Уруй отличается более компактным расположением рудных тел, где руды встречены в различных частях складчатых форм. Месторождение Перевальное, расположенное в 20 км к северо-западу от месторождения Сардана, залегает в крутом крыле Керби-Хамнинской синклинали, и его тела, вероятно, могут быть встречены в ее прогнутой части. Оруденение здесь также связано с выходами вендских толщ на протяжении более 25 км, богатые руды известны на сравнительно небольшом отрезке на северном фланге месторождения. Общая территория, где руды вскрываются в полосе вендских выходов на крыльях складок, протягиваясь на значительные расстояния, располагаются на расстоянии около 10–30 км, в связи с чем эта территория выступает в качестве Сарданского рудного района (узла).

На южном фланге Кыллахской зоны известны свинцово-цинковые проявления Лугун-Пуханильской группы. На рудопоявлении Радуга выявлены два пластообразных тела мощностью 3–7 м и протяженностью до 70 м, залегающих в доломитах верхнесарданинской подсвиты. Богатые смитсонит-лимонитовые, галенит-смитсонитовые и галенит-сфалеритовые руды имеют массивно-полосчатую структуру. Содержания цинка в них – от 7 до 40%, свинца – от долей до 16%. В полосчато-вкрапленных и вкрапленных рудах содержание соответственно до 15 и 0.5%. На площади в междуречье рек Лугун и Пуханил выявлено несколько мелких рудопоявлений с линзовидными телами полукислых сульфидных свинцово-цинковых

руд (Ольков, Рассказов, 1977). Севернее, в пределах металлогенической зоны, известны также несколько десятков проявлений свинца и цинка в карбонатных породах венда, расположенные в полосе фациального изменения состава пород сарданинской свиты с известкового на доломитовый, где развиты линзы полосчатых “зебра-доломитов”. Существенно галенит-сфалеритовый состав руд, их структурно-текстурные особенности и геологические условия нахождения, отсутствие видимой связи с магматизмом, субсогласный характер залегания рудных тел и другие признаки также определяют отнесение этих объектов к группе стратиформных месторождений.

Стратиформные Pb-Zn руды также были впервые обнаружены в карбонатно-терригенных отложениях каменноугольного возраста в пределах Ыныкчанского рудного узла Аллаха-Юньской металлогенической зоны (Анисимова и др., 2013). Руды представляют собой вкрапленный сфалерит и гнезда галенита, реже пирита, образующие полосчато-ритмичные выделения в белых сахаровидных доломитах. Сфалерит представлен клейофаном с высоким содержанием германия (1.15%) и кадмия (0.42%). Галенит характеризуется беспримесным составом. Среди примесей в рудах в основном, обращают на себя внимания высокие концентрации германия, кадмия, вольфрама, мышьяка, марганца, чуть меньше серебра, меди, кобальта, никеля, ванадия, титана, ниобия, иттербия, иттрия и циркония.

Месторождения и проявления в вендских карбонатных толщах также известны на севере Республики Саха (Якутия) и расположены в зоне северо-восточного края Сибирской платформы, в полосе ее сочленения с терригенными формациями Верхоянского мегасинклинория. Среди объектов наиболее известно месторождение Менгенилер, в котором вскрыты три линзовидных стратиформных залежи. Основные минералы полосчатых и вкрапленных руд – сфалерит (до 7%) и галенит (до 1%). Иногда в подсечениях отмечаются массивные руды (Давыдов и др., 1988). Руды полосчатые, что обусловлено чередованием менее и более богатых рудных скоплений.

#### ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕЗИСА РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ САРДАНА

Свинцово-цинковые руды Кыллахской зоны имеют отчетливый эпигенетический облик. В составе рудных и жильных минералов руд выделяется три основные продуктивные минеральные ассоциации (Соловьев, 1981). Продукты ранней кварц-доломит-марказит-пирит-галенит-сфалеритовой ассоциации слагают, как правило, ядра крупных залежей или образуют участки среди руд более поздних генераций. Они пользуются незначительным

распространением и встречаются преимущественно в участках наиболее богатого оруденения. На месторождениях Сардана, Перевальное и Уруй руды первой ассоциации отмечаются в виде отдельных реликтов среди богатых крупнокристаллических полосчатых и прожилково-вкрапленных руд второй ассоциации. На рудопроявлениях они встречаются крайне редко. Для ранних руд характерны массивная, полосчатая и гнездово-вкрапленная текстуры (рис. 4а, б). Полосчатость представлена послойным чередованием сфалеритовых с галенитом и мелкозернистых доломитовых полос. Иногда отмечаются брекчиевые руды (рис. 4в), возникшие в результате взламывания рудных прослоев и их цементации тонкозернистым карбонатом (Стратиформные..., 1979). Нередко в рудах встречаются стилолитовые швы, экранирующие отложение пирита и сфалерита.

Относительно условий формирования руд ранней стадии нет единого мнения. Согласно одной из точек зрения, накопление основных ресурсов свинца и цинка связано с выходом гипогенных металлоносных растворов в придонные области карбонатных осадков застойных бассейнов. Наиболее богатое свинцово-цинковое оруденение располагается на границах ареала развития вендских битуминозных известняков и доломитов и приурочено к зоне фациальной смены состава вмещающей пачки с существенно доломитового на юго-западе на преимущественно известковый на севере (Йогансон, Кропачев, 1976), вдоль широкой полосы северо-западного простирания, протягивающейся от Кыллахской гряды на севере (р. Алдан) за р. Юдому на юге (рис. 5).

Формирование руд ранней ассоциации могло быть связано с осаждением при реакции малосернистого раствора с окружающей средой в периферических зонах застойных анокисических осадочных бассейнов (Донец, 2003). Металлоносные комплексные соединения устойчивы в кислых и слабощелочных растворах, при изменении кислотности осаждение сульфидов осуществляется на стыках различных фациальных обстановок – мелководноморской, рифовой и лагунной. На близкие к нейтральным окислительным условия осаждения металлов указывают исследования (Галямов и др., 2018), согласно которым значения  $\delta^{34}\text{S}$  руд варьируют в диапазоне (0.75–0.96), а  $\delta^{66}\text{Zn}$  находится в отрицательном диапазоне (0.55–0.77). Здесь в присутствии органического углерода и при участии сульфатредуцирующих бактерий происходит восстановление серы сульфатов морской воды и появляется сульфидная сера (Донец, 2003). При этом гидротермально-осадочное отложение руд могло происходить при выходе потока в придонные горизонты нелитифицированного осадка морского бассейна при соответственном разбавлении рудоносного рассола и падении температуры.

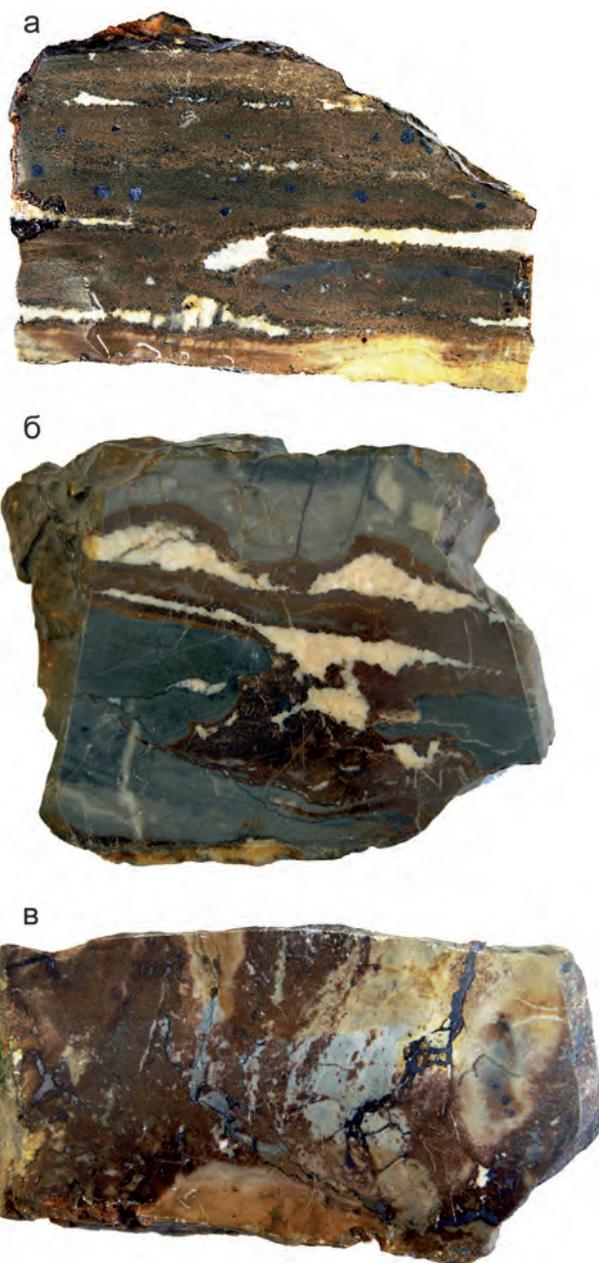


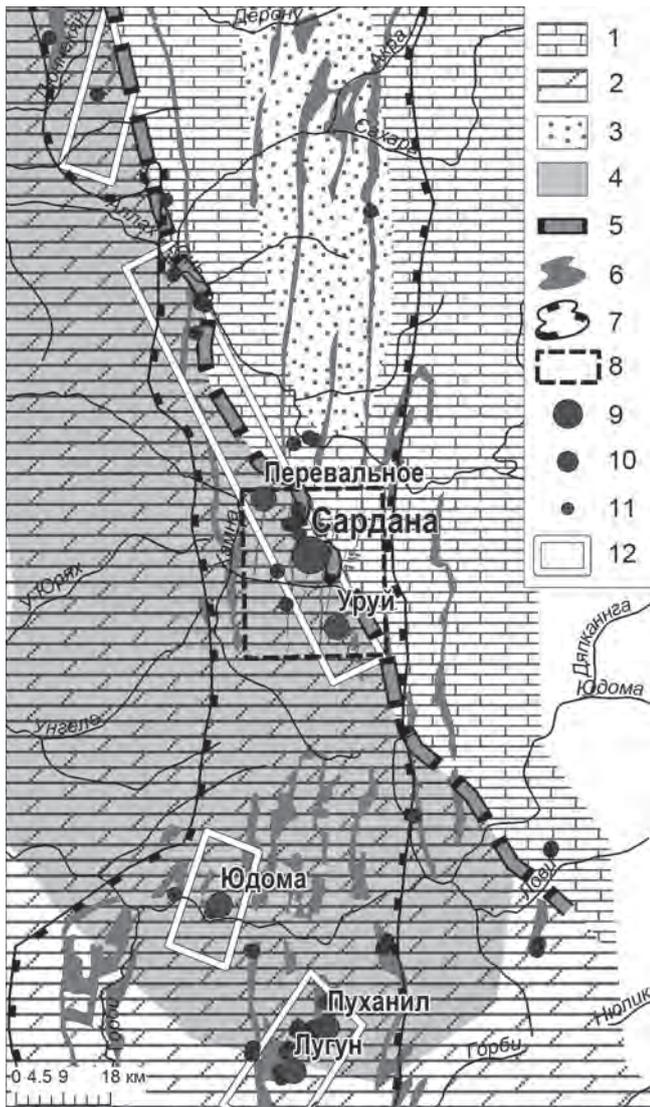
Рис. 4. Свинцово-цинковые руды месторождения Сардана.

а – полосчатые, б – кокардовые и гнездовые, в – брекчиевидные.

Fig. 4. Lead-zinc ores in Sardana deposit.

a – banded, б – cocarde, в – brecciated ores.

На месторождении Сардана наличие “брекчированных рудных слойков” среди массивных тонко- и мелкокристаллических сфалеритовых руд может косвенно указывать на отложение руд в придонном слое карбонатных осадков, содержащих массы сфалерита, отложенного из хлоридных рассолов при сравнительно низких температурах – 135–



**Рис. 5.** Схематическая карта размещения фаций вендских комплексов Кыллахской зоны (составлена с использованием материалов (Давыдов, 2002)).

1, 2 – состав рудовмещающей пачки верхнесарданинской свиты: 1 – сахаровидные доломиты, 2 – известняки тонкозернистые, часто с кремневыми стяжениями; 3 – песчаники (прибрежная фация); 4 – ареал распространения битуминозных известняков второй пачки верхнесарданинской свиты; 5 – зона фациальной смены известняков и доломитов рудовмещающей пачки верхнесарданинской свиты; 6 – выходы вендских карбонатных толщ в современном структурном плане; 7 – Кыллахская зона; 8 – участок Сарданского рудного поля; 9, 10 – месторождения: 9 – крупные, 10 – средние и мелкие; 11 – рудопоявления; 12 – потенциально-перспективные площади.

**Fig. 5.** Vendian facies of Kyllakh metallogeny zone (made up with use of (Davydov, 2002)).

1, 2 – ore-bearing rocks of Upper-Sardana Formation: 1 – metasedimentary dolomites, 2 – limestones; 3 – sandstones (on-shore facies); 4 – bituminous limestone area of Upper-Sar-

dana Formation; 5 – dolostone to limestone facies transition zone; 6 – Vendian carbonate beds outcrops; 7 – Kyllakh metallogeny zone; 8 – Sardana ore field; 9, 10 – ore deposits: 9 – large, 10 – medium and small; 11 – occurrences; 12 – prospecting areas.

235°C (Стратиформные..., 1979). Известно, что, по сравнению с пелитоморфными осадками, литификация карбонатных отложений происходит намного быстрее и на глубине 50–100 м они представляют собой минеральные агрегаты. Ранние разновидности сфалерита, отложенные в карбонатных осадках, содержат примеси железа, кадмия, германия и серебра. Содержание германия в сфалерите ранней ассоциации наиболее высокое по сравнению с поздними разновидностями. Пиритовым выделением присущ син- и диагенетический облик – он встречается в виде желваковых образований коллоидно-морфообразной и микроглобулярной структуры. Нередко глобулы кристаллизированы марказитом.

Изучение глинистого вещества (Давыдов, 1980), отмученного из карбонатных пород рудовмещающей толщи месторождения Сардана, показало, что содержание Pb и Zn в нем имеет прямую зависимость от общего содержания этих элементов как в рудах, так и в боковых породах. Это свидетельствует о влиянии рудного процесса на глинистое вещество и должно указывать на раннее поступление Zn и Pb в еще не литифицированный осадок. Известно, что глинистые минералы – хорошие сорбенты. При поступлении Pb и Zn в не литифицированный карбонатный осадок они сорбируются на поверхности глинистых минералов. Количество адсорбированного металла зависит от общего содержания его в осадке и консервируется при окончательной литификации породы. Дальнейшее поступление металлов в процессе рудогенеза реализуется в отложении сульфидов, состав сорбированных элементов в глинистых минералах карбонатных пород остается неизменным.

Другая особенность руд месторождения Сардана заключается в наличии в рудах непредельных углеводородов, характерных для удаленных фаций нефтегазовых залежей (Ручкин, Боговин и др., 1977). Общеизвестно также, что минеральные образования, характерные для стратиформных свинцово-цинковых месторождений (пирит, галенит, сфалерит, барит, флюорит, кварц, доломит, кальцит и др.), встречаются в коллекторских породах нефтегазоносных бассейнов. Согласно другой точке зрения, стратиформные свинцово-цинковые руды в карбонатных толщах формировались из металлоносных растворов поступающих из главной зоны нефтеобразования (Павлов, Галямов, 1988), включающей катагенно-миграционные аконсервационные области с активированными битумами (Донец, 2003). При этом рудные тела располагаются на нескольких стратиграфических уровнях.

Наиболее рудоносные уровни фиксируются в кровле вендских толщ под тонкозернистыми известняками в зоне фациальной смены состава рудоносной пачки с существенно доломитового на существенно известковый.

В пользу наибольшей продуктивности ранней стадии отложения сульфидов свидетельствуют также данные изучения примесных и изотопных соотношений в рудах и породах. По результатам изучения состава примесей в рудах и вмещающих породах месторождения Сардана (Галямов и др., 2018) ясно, что в неизменных породах количество примесей заметно выше, чем в породах, вмещающих руды поздних ассоциаций. В рудах первой ассоциации содержание литофильных и сидерофильных элементов выше, чем в рудах второй и третьей ассоциаций. Халькофильные элементы, напротив, выше в рудах второй ассоциации. Обогащенность руд халькофильными элементами указывает на участие в рудообразовании гидротермального флюида корового (метаморфогенного) происхождения. Величина отношения  $Co/Ni$  в рудах варьирует в интервале 0.02–1.19, а  $Y/No$  – в диапазоне 26.7–38.37, что также характерно для метаморфогенных гидротермальных флюидов.

Редкоземельные элементы в породах и рудах месторождения разделяются на три группы: цериевые – La, Ce, Pr, Nd, иттриевые – Sm, Eu, Gd, Dy, Ho и скандиевые – Er, Yb, Lu (Минеев, 1974). Руды первой ассоциации существенно обеднены РЗЭ (в несколько раз) по сравнению с вмещающими породами, хондритами и верхней корой (Тейлор, Мак-Леннан, 1988). Преобладают легкие “гидрофильные” лантаноиды “цериевой” группы. Спектры РЗЭ в рудах обогащены легкими и обеднены тяжелыми элементами. Значения  $La_N/Yb_N$  и  $\sum LREE/\sum HREE$  варьируют в диапазоне 1.86–19.28 и 2.59–8.2 соответственно. Соотношения  $Gd_N$  и  $Yb_N$ , сходность спектров РЗЭ руд и вмещающих пород указывают на унаследованность содержаний РЗЭ из пород.

Изотопный состав серы осадочных пород в районе месторождения Сардана показал высокое содержание  $\delta^{34}S$ . Значения  $\delta^{34}S$  в осадочных породах Сарданы варьируют от +1.9 до +41.8‰ (Стратиформные..., 1979). Среднее значение  $\delta^{34}S$  для карбонатных пород составляет  $28.8 \pm 8.0\%$ . Обращают на себя внимание две основные особенности изотопного состава серы сульфидов Сарданы: 1) все пробы сульфидов оказались существенно обогащены тяжелым изотопом  $\delta^{34}S$  ( $22.0 \pm 2.3\%$ ) и 2) диапазон вариаций изотопных отношений серы сульфидов не превышает 11‰ (+16.8 до +27.1‰). В сфалерите среднее значение  $\delta^{34}S$  выше ( $23.5 \pm 1.9\%$ ), чем у галенита ( $20.8 \pm 1.9\%$ ). Среднее значение  $\delta^{34}S$  пирита составляет  $21.5 \pm 2.6\%$ . В целом же для месторождений МVT-типа характерен широкий диапазон изотопных характеристик серы сульфидов (от –18‰ до +35‰) с модальными

значениями +20‰ (+5‰) в месторождениях интракратонных прогибов и значениями +14‰ (+5‰) в рудных телах перикратонных прогибов на шельфе и склоне континентов.

Образование руд продуктивной второй доломит-арсенопирит-пирит-галенит-сфалеритовой ассоциации, составляющих основу запасов месторождения Сардана, связано с переотложением и перекристаллизацией продуктов ранней стадии (Ручкин и др., 1977, Стратиформные..., 1979) в условиях тектоно-магматической активизации. Начиная со среднего кембрия в разрезах отмечаются два длительных перерыва в осадконакоплении – в ордовике–девоне и в верхней перми–триасе. Наиболее ранние тектонические события в этот период, вероятно, относятся к раннему-среднему палеозою, когда продолжались процессы сводообразования и рифтогенеза, начавшиеся в позднем рифее. Верхний предел возраста подтверждается наличием широко распространенных даек основного и щелочного состава, образовавшихся в раннем-среднем палеозое.

Мезозойский этап активизации, начавшийся в позднем палеозое, обусловил формирование линейных структур, возникновение разрывов, трасируемых дайками верхнепалеозойского возраста и линзами перекристаллизованных доломитов. Рудные минералы ассоциации встречаются преимущественно в участках гнездового и прожилкового оруденения и неотделимы от гнезд и прожилков белого крупнокристаллического доломита. Содержание серебра в сфалерите, максимальное в ранних ассоциациях, здесь заметно снижено. Обратная тенденция отмечена в изменении содержания ртути. В поздних выделениях галенита количество серебра, олова и мышьяка также заметно выше. Кристаллическая форма и сложные интерстициональные взаимоотношения выделений сфалерита, пирита, галенита и доломита свидетельствуют о неоднократной перекристаллизации и наложенной деформации. Наличие полос крупнокристаллического доломита (т.н. “зебра-доломиты”), часто с участками мраморизации и битумизации карбонатов, свидетельствует о процессах перераспределения карбоната и рудных минералов в обстановке существования гидродинамически сосредоточенных гидротермальных потоков (Донец, 2003). Такие текстуры агрегатов встречаются как в крыльях, так и в ядерной части современных линейных складок, значения отношения цинка к свинцу уменьшается от подошвы к кровле рудных тел (Йогансон, Кропачев, 1976), независимо от залегания в складке, что указывает на доскладчатое время их образования. Об этом также свидетельствуют результаты изучения деформационной истории рудовмещающих пород и эволюции складчатых форм (Галямов, 1986).

Изотопные соотношения свинца в галените в рудах первой и второй минеральных ассоциаций

практически неразличимы и для них характерно относительное постоянство. Завершающая стадия рудообразования на месторождении Сардана проявлена в виде жильных и жильно-прожилковых систем с существенно свинцовыми рудами третьей парагенетической ассоциации. Обращает на себя внимание дисперсия в изотопном составе рудных свинцов поздних жил трещинного типа с галенитом (Стратиформные..., 1979). Эта дисперсия послужила основанием для выделения среди поздних жильных руд двух типов рудных свинцов – “нормальных” и “удревненных”, которые, очевидно, связаны с разными механизмами и разной геологической средой мобилизации металлов. Характерной особенностью месторождений миссисипского типа является выщелачивание свинца рассолом из ураноносных пород, что приводит к обогащению руд радиогенным свинцом. Последующий метаморфизм обуславливает усреднение изотопного состава, что имело место при формировании руд месторождения. Важным критерием для выявления регенерированных руд служит слишком большой возраст (“удревнение”) свинца в сульфидах. Вывод о древнем возрасте оруденения, синхронном времени формирования рудовмещающих толщ может быть связан только с рудами первых двух ассоциаций (Стратиформные..., 1979), а свинцы руд жильного типа, несомненно, являются более молодыми.

О принадлежности руд Сарданского рудного узла к миссисипскому рудноформационному типу нет однозначного мнения, что связано с геохимическими и минералогическими особенностями руд месторождения. По материалам обобщающих публикаций (Донец и др., 2017) руды месторождения принадлежат в целом к MVT, но по отдельным характеристиками (содержание германия в рудах) выделяются в отдельный минералогический подтип – сардинский. Вместе с тем миссисипский тип руд по характерным особенностям оруденения представлен также миргалимсайским, учулачским и шалкиинским подтипами. Согласно другим представлениям (Скрипченко, 1970), стратиформные свинцово-цинковые месторождения в карбонатных толщах относятся к телетермальному классу гидротермальных месторождений. Они пространственно тесно связаны с доломито-известняковыми, глинисто-доломито-известняковыми, реже туфогенно-доломито-известняковыми толщами широкого возрастного диапазона формирования в платформенных интракратонных бассейнах и субплатформенных обстановках перикратонных прогибов на шельфе и склоне континентов.

Минералогическо-геохимические особенности пород и руд месторождений Сарданского узла, морфология рудных тел, элементы зональности в них, а также изотопные соотношения указывают на принадлежность руд к миссисипскому типу. Во-первых, по

содержанию породообразующих окислов вмещающие и околорудные породы месторождения Сардана типичны для месторождений MVT типа. Во вмещающих породах преобладает CaO (38.12–47.26), присутствуют заметные концентрации, MgO (1.6–19.44), SiO<sub>2</sub> (0.72–12.89), Fe<sub>2</sub>O<sub>3общ</sub> (0.35–4.68), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.21–2.38), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.09–1.7%), а также незначительное количество K<sub>2</sub>O (0.08–0.96) и MnO (0.04–0.1%). Повышенное содержание SiO<sub>2</sub> (12.89), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2.38), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1.7%) и пониженное MgO (1.6%) отмечаются в известняках с глауконитом.

Изотопный состав углерода карбонатных пород в районе месторождения Сардана в целом изменяется от –0.17 до +0.08‰ (Стратиформные..., 1979). Эти значения укладываются в диапазон вариаций, характерный для морских известняков и доломитов. По характеру распределения значений изотопного состава углерода доломиты более однородны, чем другие известняки, хотя величины <sup>13</sup>C тех и других близки. Сравнение соотношений δ<sup>18</sup>C и δ<sup>13</sup>O в рудовмещающих эпигенетических полосчатых доломитах месторождения Сардана с таковыми вмещающих пород месторождений США, Канады и Китая показывает, что доломиты сардинской свиты более интенсивно метасоматически изменены (рис. 6). Также это свидетельствует о том, что при эпигенетической доломитизации углерод заимствовался преимущественно из вмещающих известковых и доломитовых пород и сопровождался некоторой гомогенизацией его изотопного состава.

#### ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ НОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Согласно общей генетической модели, большинство месторождений миссисипского типа имеют временную и пространственную связь с орогенными структурами (Leach et al., 2010). Многие руды этого типа сформировались в периоды интенсивных тектонических событий. Месторождения расположены в перикратонных областях в орогенных складчатых зонах, часть из них образовалась до складчатости и сопутствующих деформаций. Другие формировались синхронно с деформациями, а третьи – в постдеформационный период и связаны с карстообразованием. Некоторые руды образовались явно в условиях растяжения (Ленард Шельф, Австралия). Руды MVT-типа обычно связаны с карбонатными породами, в участках фациальных переходов субплатформенных комплексов по латерали и в разрезе. Рудоконтролирующим фактором выступает особый характер проницаемости пород для металлоносных флюидов при фациальном переходе из одной породы в другую (в том числе рифовые постройки).

Особенности геотектонической позиции и локализации стратиформных месторождений Респу-

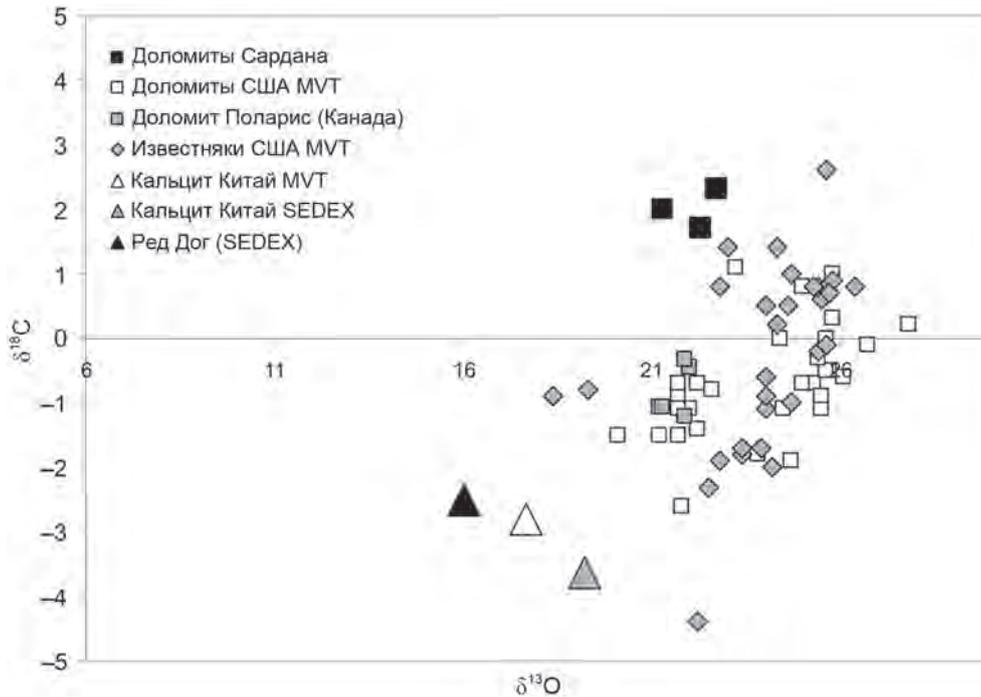


Рис. 6. Соотношение изотопов углерода и кислорода в породах месторождения Сардана (по материалам С.Г. Кряжева) и мировых месторождений MVT и SEDEX (по (Leach et al., 2010a, b; Paradis et al., 2007; и др.)).

Fig. 6. Carbon and oxygen isotope ratio in the rocks of Sardana deposit (by S.G. Kryazhev) and of famous world MVT and SEDEX ore deposits (by (Leach et al., 2010a, b; Paradis et al., 2007; and others)).

блики Саха (Якутия) соответствует основным критериям общей модели. В истории осадконакопления на территории Кыллахской металлогенической зоны выделяется среднепозднерифейский и вендский этапы развития рифтогенных структур (Сухоруков, 2003). К ним относятся ранне-рифейские вулканогенно-терригенные и ранне-вендские молассоидные образования локального распространения. С ними ассоциируют интрузии базальт-долеритовой, габбро-долеритовой и ультраосновной-щелочной с карбонатитами формаций. На территории Кыллахской зоны в этот период преобладали обстановки пассивной континентальной окраины внешнего шельфа и континентального склона. Осадочные комплексы представлены терригенными, терригенно-карбонатными и карбонатными осадками со свойственной им выдержанностью фаций по латерали и трансгрессивной последовательностью разреза. В вендском разрезе в составе рудовмещающей толщи выделяется протяженный горизонт битуминозных известняков, образовавшихся в застойных аноксических обстановках, характерных для внутренних морей (Давыдов и др., 1982).

На территории Республики Саха (Якутия) в разные годы были выделены площади стратиформного оруденения свинца, цинка и меди (Давыдов и др., 1988). На Сибирской платформе оконтурены

Куонамская, Силигирская, Нюйская, Березовская и Угуйская площади с проявлениями металлов в раннепротерозойских и раннесреднепалеозойских толщах. Во внешней зоне восточного складчатого обрамления платформы расположены Туорасисская, Ага-Куканская, Кыллахская и Сетте-Дабанская площади полиметаллического и медного оруденения в отложениях рифея, венда, кембрия и среднего палеозоя. В юго-восточной части Верхояно-Колымской складчатой системы оконтурены Умбинская, Каменская, Муастахская, Омудевская и Ороевская площади, содержащие медные и полиметаллические проявления в образованиях протерозойского фундамента и среднего палеозоя.

Потенциальная перспективность Кыллахской металлогенической зоны на выявление новых крупных месторождений миссисипского типа определяется, в первую очередь, размерами и позицией ареалов выходов на поверхность продуктивного пакета доломитовых пород в зоне их фациального замещения известняками и областью распространения битуминозных известняков, подстилающих рудовмещающие толщи. Общая площадь ареалов вендских доломитов с повсеместными проявлениями стратиформной минерализации с учетом погружения слоев под кембрийские терригенно-карбонатные отложения на глубину около 300 м составляет более 250 км<sup>2</sup> и включена в контуры потенциально-

перспективных площадей на выявление новых месторождений (см. рис. 5).

Кроме ресурсной базы месторождения Сардана, апробированной по результатам поисково-оценочных работ последних лет и составляющей по сумме запасов и прогнозных ресурсов около 4 млн т свинца и цинка, приблизительная оценка оконтуренных площадей в полосе выходов вендских доломитов составляет около 40 млн т суммы металлов без учета оценки Лугун-Пуханильского узла, территория которого требует дополнительных поисковых и поисково-оценочных работ. Здесь наряду с проявлениями миссисипского типа отмечается минерализация других типов – свинцово-цинковая в терригенных породах (SEDEX).

На севере Республики Саха (Якутия) выделен Туора-Сисский металлогенический пояс, в котором располагаются месторождения и проявления, залегающие в субплатформенных карбонатных формациях пассивной окраины. В карбонатных породах нижнего-среднего кембрия развито стратиформное свинцово-цинковое оруденение MVT. Продуктивными являются глинистые доломиты тусерской свиты и битуминозные фосфоритонесные известняки сэктенской свиты нижнего кембрия. Возраст стратиформной свинцово-цинковой минерализации хребта Туора-Сис, по данным К.Б. Куликова (1978 г., не опубликовано), считается раннепалеозойским. Раннекембрийский пояс, сложенный рифейскими терригенными и карбонатными толщами, вендскими доломитами, содержащими стратиформную свинцово-цинковую минерализацию (Менгенилер, Агакукан), и песчаниками, а также нижнекембрийскими терригенными и карбонатными комплексами, формировался как пассивная окраина после неопротерозойского этапа рифтообразования.

Южнее в 100 км выделена Западно-Верхоянская (Орулганская) металлогеническая зона, которая включает в себя большое число полиметаллических рудопроявлений, расположенных в осевой части Западно-Верхоянского мегантиклинория, на расстоянии в сотни километров по простиранию структуры. Эта зона детально охарактеризована Ю.П. Ивенсенем, В.А. Амузинским, Г.Г. Невойсой (1975 г., не опубликовано). Рудопроявление Ага-Кукаан представлено послойной вкраплено-прожилковой минерализацией пирита, сфалерита, галенита в раннекаменноугольных известняках агакуканской свиты турнейского возраста. Содержания в штуфах составляют Cu – 1–3%, Au – 0.15 г/т и Ag – 400 г/т (Мельников, Израилев, 1975). Рудопроявления Куоланда и Арычин – жильные тела галенит-сфалеритового состава среди каменноугольных терригенно-карбонатных пород. Оруденение локализовано вблизи крупных диапиров девонских гипсов, протрудирующих позднепалеозойские отложения. Площадь таких диапиров на поверхности достигает 12 км<sup>2</sup>.

С проявлениями стратиформного MVT-оруденения в слабо опосредованных карбонатных разрезах Омолона соседствуют известные свинцово-цинковые колчеданные объекты в вулканогенно-терригенных породах (VMS), приуроченные к окраине локального нефтегазоносного бассейна в районе Омулевского поднятия (Шишкин, Ганов, 2010). Это также составляет дополнительный потенциал для наращивания минерально-сырьевой базы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности руд месторождения Сардана указывают на то, что оно является продуктом ранних метаморфогенных (катагенетических) процессов в рудообразующей системе. Рудообразование протекало на верхнекоровом уровне, что подтверждается в свинцово-цинковых рудах преобладанием LREE, источником которых служили вмещающие карбонатно-терригенные толщи.

Приведенная информация имеет значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки месторождений миссисипского типа не только на Северо-Востоке, но и в других металлогенических провинциях России и мира. Проведение ревизионно-поисковых и поисково-оценочных работ с применением современных геохимических и геофизических методов и с учетом критериев и признаков, выработанных за многие годы, позволиткратно увеличить минерально-сырьевую базу свинца и цинка Республики Саха (Якутия), Хабаровского края и Магаданской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимова Г.С., Лыткин С.Ф. (2013) Коренная золотоносность и сереброносность Ыныкчанского рудно-россыпного поля Аллаха-Юньской металлогенической зоны. *Отчет геология*, **5**, 10-19.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Аристов В.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю. (2016) Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов России: состояние и перспективы развития. *Геология руд. месторождений*, **58**(2), 97-119.
- Галямов А.Л. (1986) Влияние складчатости на размещение свинцово-цинковых руд в карбонатных породах Юдомо-Майского поднятия (Юго-Восточная Якутия). *Структурный контроль гидротермального оруденения в слоистых толщах*. М.: Наука, 41-50.
- Галямов А.Л., Волков А.В., Мурашов К.Ю., Сидоров А.А. (2018) Новые данные по геохимии руд миссисипского типа месторождения Сардана (Северовосток России). *Докл. АН*, **481**(5), 517-520.
- Давыдов Ю.В. (1980) Карбонаты стратиформных свинцово-цинковых месторождений Юдомо-Майского складчато-глыбового поднятия. *Эндогенные карбонаты Якутии*. Новосибирск: Наука, 186-201.

- Давыдов Ю.В. (1981) Пирокластические и кремнистые породы юдомской серии Юдомо-Майского складчато-глыбового поднятия. *Геология и геофизика*, (5), 61-68.
- Давыдов Ю.В. (2002) Сардана. Структурные условия формирования богатых Ag, Au, Sn, Sb и Pb-Zn руд месторождений Якутии. Якутск: ЯФ СО РАН, 143-159.
- Давыдов Ю.В., Лескова Н.В. (1981) Связь постседиментационных образований в карбонатных породах со свинцово-цинковым оруденением. *Изв. АН СССР, сер. геол.*, (12), 106-118.
- Давыдов Ю.В., Галямов А.Л., Мельцер М.Р. Чиряев А.Г. (1982) Рудоконтролирующие факторы и прогноз локализации рудных тел на стратиформных свинцово-цинковых месторождениях Юго-Восточной Якутии. *Геология и геофизика*, (1), 101-107.
- Давыдов Ю.В., Чиряев А.Г., Костин А.В., Соболев А.Е. (1988) Стратиформное оруденение Якутии (свинец, цинк, медь). *Стратиформное оруденение Якутии*. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 5-24.
- Донец А.И. (2003) Стратиформные свинцово-цинковые месторождения в карбонатных толщах: типизация и основы прогноза. Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. М.: 51 с.
- Донец А.И., Ручкин Г.В., Конкин В.Д. (2017) Геолого-промышленные типы и региональные геологические особенности стратиформных свинцово-цинковых месторождений в карбонатных толщах. *Отеч. геология*, (6), 31-39.
- Зайцев А.И., Костин А.В. (1999) Источники свинца серебряных и серебросодержащих месторождений основных геолого-промышленных типов Северо-Востока России. *Серебряное оруденение Якутии*. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 13-27.
- Иогансон А.К., Кропачев А.Л. (1976) Свинцово-цинковое стратиформное оруденение в вендских отложениях северной части Майско-Кыллахской зоны (Южное Верхоянье). *Геология и геофизика*, (9), 126-134.
- Мельников Б.Д., Израилев Л.М. (1975) О стратиформном свинцово-цинковом оруденении Верхоянского мегантиклинория. *Геология рудн. месторождений*, (1), 101-104.
- Минеев Д.А. (1974) Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. М.: Наука, 237 с.
- Ольков В.В., Рассказов Ю.П. (1977) Стратиформное свинцово-цинковое оруденение в междуречье Юдомы и Май. *Стратиформные месторождения цветных металлов и золота Сибири и Дальнего Востока*. Чита: Заб ФГО СССР, 93-94.
- Павлов Д.И., Галямов А.Л. (1988) Геологические соотношения стратиформного свинцово-цинкового оруденения и нефтепродуцирующих толщ (на примере Южного Верхоянья). *Литология и полезн. ископаемые*, (3), 89-100.
- Ручкин Г.В., Боговин В.Д., Донец А.И., Исакович И.З., Конкин В.Д., Крутий В.М. (1977) Свинцово-цинковая минерализация в вендских карбонатных толщах Юго-Восточной Якутии (Сарданский рудный район). *Геология рудн. месторождений*, (4), 3-20.
- Стратиформные свинцово-цинковые месторождения в отложениях венда Юго-Восточной Якутии. (1979) Новосибирск: Наука, 232 с.
- Скрипченко Н.С. (1970) Классификация стратиформных свинцово-цинковых месторождений на литолого-фациальной основе. *Геология рудн. месторождений*, 6, 3-15.
- Соловьев Е.Б. (1981) Литолого-геохимические особенности локализации свинцово-цинкового оруденения и германиеносность Сарданского рудного узла (Восточная Якутия). Автореф. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ЦНИГРИ, 22 с.
- Сухоруков В.И. (2003) Геология верхнерифейских и вендских образований Сетте-Дабана (Якутия). Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 230 с.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 384 с.
- Шишкин В.А., Ганов А.П. (2010) Перспективы нефтегазоносности южной части Тасканской структурной зоны Омuleвского поднятия. *Вестник Сев.-Вост. науч. центра ДВО РАН*, (2), 8-13.
- Bouman J., Ebbing J., Meekes S. et al. (2015) GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.*, 35, 16-30.
- Leach D.L., Bradley D.C., Huston D., Pisarevsky S.A., Taylor R.D., Gardoll S.J. (2010a) Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History. *Econ. Geol.*, 105, 593-625.
- Leach D., Taylor R.D., Fey D.L. et al. (2010b) Deposit Model for Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Ores. *Sci. Invest. Rep.*, 5070-A, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 52 p.
- Paradis S., Hannigan P., Dewing K. (2007) Mississippi Valley-Type lead-zinc deposits. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, (5), 185-203.
- Tikkanen G.D. (1986) World resources and supply of lead and zinc. (Ed. W.R. Bush). *Economics of Internationally Traded Minerals: Society of Mining Engineers*, 242-250.
- Verplanck P.L., Hitzman M.W. (2016) Introduction: Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. *Rev. Econ. Geol.*, 18, 1-4.

## REFERENCES

- Anisimova G.S., Lytkin S.F. (2013) Lode gold- and silver-dearing in the Ynykchan ore-placer field of Allah-Yun metallogenic zone. *Otech. Geol.*, (5), 10-19. (In Russian)
- Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikent'ev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. (2016) Mineral resources of high-tech metals in Russia: state and development prospects. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, 58(2), 97-119. (In Russian)
- Bouman J., Ebbing J., Meekes S., Chiryaev A.G. (2015) GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.*, 35, 16-30.
- Davydov Yu.V. (1980) Carbonates of stratiform lead-zinc deposits in the Udomo-Maysky folded-block uplift. *Endogennyye karbonaty Yakutii* [Endogenous carbonates of Yakutia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 186-201. (In Russian)
- Davydov Yu.V. (1981) Pyroclastic and siliceous rocks of the Yudoma series of the Yudomo-May folding-block uplift.

- Geol. Geofiz.*, (5), 61-68. (In Russian)
- Davydov Yu.V., Chiryayev A.G., Kostin A.V., Sobolev A.E. (1988) Stratiform mineralization of Yakutia (lead, zinc, copper). *Stratiformnoe orudnenie Yakutii* [Stratiform ores of Yakutia]. Yakutsk, Yacutian branch of Akad. Nauk SSSR, 5-24. (In Russian)
- Davydov Yu.V., Leskova N.V. (1981) Connection of post-sedimentary formations in carbonate rocks with lead-zinc mineralization. *Izv. AN USSR, ser. geol.*, (12), 106-118. (In Russian)
- Davydov Yu.V., Galyamov A.L., Mel'tser M.R., Chiryayev A.G. (1982) Ore-controlling factors and ore body localization forecast in stratiform lead-zinc deposits in South-Eastern Yakutia. *Geol. Geofiz.*, (1), 101-107. (In Russian)
- Donets A.I. (2003) *Stratiformnye svintsovo-tsinkovye mestorozhdeniya v karbonatnykh tolshchakh: tipizatsiya i osnovnyy prognoza*. Diss. ... dokt. geol.-min. nauk [Stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata: classification and forecast principles. Dr. geol. and min. sci. diss.]. Moscow, 51 p. (In Russian)
- Donets A.I., Ruchkin G.V., Konkin V.D. (2017) Geological and industrial types and regional geological features of stratiform lead-zinc deposits in carbonate strata. *Otech. Geol.*, (6), 31-39. (In Russian)
- Galyamov A.L. (1986) The effect of folding on the placement of lead-zinc ores in carbonate rocks of the Yudoma-May uplift (Southeast Yakutia). *Strukturnyi kontrol' gidrotermal'nogo orudneniya v sloistykh tolshchakh* [Structural control of hydrothermal mineralization in the layered strata]. Moscow, Nauka Publ., 41-50. (In Russian)
- Galyamov A.L., Volkov A.V., Murashov K.Yu., Sidorov A.A. (2018) New data on the geochemistry of Mississippian-type ores of the Sardana deposit (North-East Russia). *Dokl. Akad. Nauk*, **481**(5), 517-520. (In Russian)
- Ioganson A.K., Kropachev A.L. (1976) Lead-zinc stratiform mineralization in Vendian sediments of the northern part of the May-Kyllakh zone (South Verkhoyansk). *Geol. Geofiz.*, (9), 126-134. (In Russian)
- Leach D.L., Bradley D.C., Huston D., Pisarevsky S.A., Taylor R.D., Gardoll S.J. (2010a) Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits in Earth History. *Econ. Geol.*, **105**, 593-625.
- Leach D., Taylor R.D., Fey D.L. et al. (2010b) Deposit Model for Missisipi Valley-Type Lead-Zinc Ores. *Sci. Invest. Rep.*, **5070-A**, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 52 p.
- Mel'nikov B.D., Izrailev L.M. (1975) On the stratiform lead-zinc mineralization of the Verkhoyansk meganticlinorium. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (1), 101-104. (In Russian)
- Mineev D.A. (1974) *Lantanoidy v rudakh redkozemel'nykh i kompleksnykh mestorozhdenii* [Lanthanides in ores of rare-earth deposits]. Moscow, Nauka Publ., 237 p. (In Russian)
- Ol'kov V.V., Rasskazov Yu.P. (1977) Stratiform lead-zinc mineralization in the interfluvium of Yudoma and Mal'tina Sibiri i Dal'nego Vostoka [Stratiform deposits of non-ferrous metals and gold from Siberia and the Far East]. Chita, Zab FGO SSSR Publ., 93-94. (In Russian)
- Paradis S., Hannigan P., Dewing K. (2007) Missisipi Valley-Type lead-zinc deposits. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication **5**, 185-203.
- Pavlov D.I., Galyamov A.L. (1988) Geological ratios of stratiform lead-zinc mineralization and oil-producing strata (on the example of the Southern Verkhoyansk). *Litol. Polezn. Iskop.*, (3), 89-100. (In Russian)
- Stratiformnye svintsovo-tsinkovye mestorozhdeniya v otlozheniyakh venda Yugo-Vostochnoi Yakutii* [Stratiform lead-zinc deposits in Vendian sediments of South-Eastern Yakutia]. (1979) Novosibirsk, Nauka Publ., 232 p. (In Russian)
- Ruchkin G.V., Bogovin V.D., Donets A.I., Isakovich I.Z., Konkin V.D., Krutii V.M. (1977) Lead-zinc mineralization in the Vendian carbonate strata of Southeastern Yakutia (Sardana ore region). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (4), 3-20. (In Russian)
- Shishkin V.A., Ganov A.P. (2010) Petroleum potential of the southern part of the Tuskan structural zone of the Omulevsky uplift. *Vestnik Sev.-Vost. nauchn. tsentra DVO RAN*, (2), 8-13. (In Russian)
- Skripchenko N.S. (1970) Classification of stratiform lead-zinc deposits on a lithofacial basis. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (6), 3-15. (In Russian)
- Solov'ev Ye.B. (1981) *Litologo-geokhimicheskie osobennosti lokalizatsii svintsovo-tsinkovogo orudneniya i germanienosnost' Sardanskogo rudnogo uzla (Vostochnaya Yakutiya)*. Avtoref. ... kand. geol.-min. nauk [Lithologic-geochemical features of the localization of lead-zinc mineralization and germanium content of the Sardana ore cluster (East Yakutia), Cand. Diss.]. Moscow, TSNIIGRI, 22 p. (In Russian)
- Sukhorukov V.I. (2003) *Geologiya verkhnerifeiskikh i vend-skikh obrazovaniy Sette-Dabana (Yakutiya)*. Diss. ... kand. geol.-min. nauk [Geology of Upper Riphean and Vendian Formations of Sette-Daban (Yakutia). Cand. Diss.]. Yakutsk, 230 p. (In Russian)
- Taylor S.R., Mak-Lennan S.M. (1988) *Kontinental'naya korra: ee sostav i evolyutsiya* [Continental crust: its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russian)
- Tikkanen G.D. (1986) World resources and supply of lead and zinc. (Ed. W.R. Bush). *Economics of Internationally Traded Minerals: Society of Mining Engineers*, 242-250.
- Verplanck P.L., Hitzman M.W. (2016) Introduction: Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits. *Rev. Econ. Geol.*, **18**, 1-4.
- Zaitsev A.I., Kostin A.V. (1999) Sources of lead for silver and silver-containing deposits of the main geological and industrial types of the North-East of Russia. *Serebryano orudnenie Yakutii* [Silver mineralization of Yakutia]. Yakutsk, YAC SB RAS, 13-27. (In Russian)