

Викентьев И.В., Дамдинов Б.Б., Минина О.Р. и др. Классификация процессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS–SEDEX–MVT пример гиганского Озерного месторождения в Забайкалье, Россия // Геология рудных месторождений. 2023. № 3. С. 201–236.

Рожнов А.А. Сравнительная характеристика марганцевых месторождений Атасуйского и Никопольско-чиатурского типов // Геология и геохимия марганца. Отв. ред. И.М. Варенцов. М.: Наука, 1982. 116–121.

Холодов В.Н. Геохимия осадочного процесса. М.: ГЕОС, 2006. 608 с.

Leach D.L., Bradley D.C., Huston D., Pisarevsky S.A., Taylor R.D., Gardoll S.J. Sediment-hosted lead-zinc deposits in Earth history // *Economic Geology*. 2010. Vol. 105. P. 593–625.

Wilkinson J.J. Sediment-hosted zinc-lead mineralization: processes and perspectives // In: *Treatise on geochemistry*. Amsterdam: Elsevier. 2014. Vol. 13. P. 219–250.

**М.Т. Крупенин**

*Институт геологии и геохимии  
им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия  
krupenin@igg.uran.ru*

**Магнезиально-железистые карбонатные руды в рифейских отложениях  
Башкирского мегантиклинория  
(источники вещества, этапы и механизмы образования)**

**М.Т. Крупенин**

*Zavaritsky Institute of Geology and  
Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia*

**Magnesian-ferruginous carbonate ores in Riphean deposits  
of the Bashkirian Meganticlinorium: matter sources and stages  
and mechanisms of formation**

**Abstract.** The largest deposits of sparry magnesite and siderite are currently confined to the Bashkir meganticlinorium, which is part of the Hercynian Ural fold belt. However, the deposits were formed long before the Paleozoic in the Riphean terrigenous-carbonate sequence of the Urals pericratonic depression, located on the periphery of the Baltica paleocontinent. Ore formation was the result of metasomatic replacement of limestones (protolith) during the migration of buried evaporite brines heated during tectonothermal stages. The formation of brines is associated with episodes of evaporite sedimentation in the over-rift sedimentary basins of the Early and Middle Riphean (sedimentation interval 1750–1000 Ma). The source of magnesium for magnesite deposits was the buried brines themselves; iron for Fe-carbonates was extracted by brines from terrigenous-clay host rocks during long-term interaction during catagenesis. Three impulses of thermal activation are identified, with which the stages of ore genesis are associated: 1) the Mashak riftogenic plume-related stage with the formation of high-quality magnesites (~1380 Ma), 2) the Avzyan stage with the formation of Fe-magnesites, fluorites, SedEx barite-base metal occurrences (~1250 Ma), 3) the Pre-Zilmerdak stage with the formation of the world's largest accumulation of metasomatic siderites (~1000 Ma).

Месторождения кристаллического магнезита (МКМ) являются основным промышленно-генетическим типом магнезитового сырья для получения периклаза – основы огнеупорной и металлургической отрасли для большинства регионов мира. Во многих провинциях мира МКМ встречаются совместно с сидеритом (ценная железная руда), что предполагает их генетическую связь. В то же время, до сих пор существуют разные гипотезы образова-

ния магнезита и сидерита в карбонатных толщах: от осадочной до постмагматической. Этим, а также широким разнообразием Mg-Fe карбонатных пород в Башкирском мегантиклинории (БМА), являющимся удобным полигоном для разработки генетических моделей, определяется актуальность исследования данной проблемы.

Целью явилась разработка теоретических основ формирования крупных месторождений карбонатных Mg-Fe руд на примере объектов в терригенно-карбонатной последовательности типового разреза рифея, выяснение источников вещества и энергии, а также времени и процессов, определивших формирование этих руд. Задачи включали проведение типизации МКМ, а также сидеритовых месторождений, определение их возраста как сравнительно-геологическим, так и изотопными методами (Pb-Pb, Sm-Nd для карбонатных пород) и связи с этапами геологического развития региона, выяснение природы рудоносных растворов, корового и мантийного компонентов в их составе и роли эвапоритовых рассолов в рудных процессах с использованием распределения стабильных изотопов ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ , D,  $^{34}\text{S}$ ) и состава флюидных включений в рудных минералах. Результатом 30-летнего изучения явилось создание генетических моделей формирования МКМ, созданных на основе как комплекса геолого-минералогических и изотопно-геохимических данных, так и с помощью методов численного физико-химического моделирования.

Дискуссионность проблемы происхождения МКМ и сидерита в карбонатных толщах определяется различиями предлагаемых источников рудного вещества и механизмов рудоотложения. Осадочная гипотеза предполагала источник Mg и Fe из кор выветривания [Главнейшие..., 1993], гидротермально-метасоматическая – из постмагматических растворов [Заварицкий, 1920] и др., элизонно-катагенетическая [Анфимов, 1997] – собирание тонкорассеянного магнезита из вмещающих доломитов в рудные тела по латераль-секреторной гипотезе. Отметим декларативность упомянутых гипотез в доказательстве источника рудного компонента. Новый метод прецизионной ионной хроматографии вкупе с изучением солевого состава флюидных включений в магнезитах и сидеритах позволил выдвинуть инфильтрационно-рассольную модель (источник магния из эвапоритовых рассолов) на примере изучения МКМ Австрии [Prochaska, 2000]. Использование этого подхода для Mg-Fe карбонатов в БМА позволило нам создать термально-рассольную модель формирования МКМ Южно-Уральской провинции и сидеритов [Крупенин и др., 2017, 2021]. В обоих вариантах рассольных моделей приведены доказательства гидротермально-метасоматической природы оруденения на основании изучения взаимоотношений рудных тел и вмещающих карбонатных пород.

По нашим данным месторождения формировались задолго до палеозоя в отложениях типового разреза рифея (интервал 1750–600 млн лет) на востоке (в современных координатах) континента Балтики в составе Приуральской перикратонной впадины [Пучков, 2010]. Общая мощность отложений превышает 15 км. В интервале 1750–1000 млн лет мы выделяем повторение рифтового и надрифтового осадочных бассейнов в раннем и среднем рифее (Приуральская надрифтовая впадина) [Крупенин, 2021]. В позднем рифее сформировался обширный перикратонный прогиб, рассматриваемый как пассивная окраина Балтики. В настоящее время отложения Приуральской перикратонной впадины приурочены к БМА, входящему в герцинский Уральский ороген.

Заметный объем платформ занимают рифтогенные бассейны. В их строении выделяют две стадии: рифтовый бассейн и надрифтовую впадину [Беленицкая, 2007]. Рифтовый бассейн характеризуется линейной формой, большой мощностью вулканогенно-терригенных отложений; надрифтовый осадочный бассейн (НОБ) имеет более обширную площадь, высокую мощность глинисто-карбонатных отложений, на его развитие влияют глубинные рифтогенные процессы, характерна длительная сохранность захороненных бассейновых флюидов. Миграция флюидов в совокупности с эндогенным теплом служит главным фактором для

минерации НОБ. Влияние эпизодов эвапоритовой седиментации в НОБ приводит к образованию амагматических залежей полиметаллов, барита, флюорита (MVT, SedEx [Leach et al., 2010]). Новым, ранее не отмеченным рудным объектом в данном ряду, являются Mg-Fe карбонатные метасоматиты.

В раннем рифее (бурзяний) рифтогенный бассейн представлен трахибазальтами (1750 млн лет, U-Pb, циркон) и грубообломочными отложениями айской свиты [Стратотип..., 1982] мощностью до 1.6 км. Он формировался в континентальных обстановках в ограниченных линейных грабенах. Вышележащий НОБ (синеклиза 1) представлен глинисто-карбонатными отложениями шельфа (саткинская и бакальская свиты) мощностью до 5 км, к которым приурочены крупнейшие месторождения магнезита (саткинский и бакальский уровни) и сидерита (Бакальская группа), а также Суранское месторождение флюорита.

В среднем рифее (юрматиний) линейный рифтогенный бассейн представлен трахибазальтами и трахилипаритами (1380 млн лет, U-Pb, циркон) с прослоями конгломератов машакской свиты мощностью до 3 км и серией крупных интрузивных тел. Вышележащий НОБ (синеклиза 2) сложен глинисто-карбонатными отложениями авзянской свиты мощностью до 1–3 км, с месторождениями Fe-магнезита, полиметаллов и барита (SEDEX). В карбонатных отложениях верхнего рифея рудные залежи отсутствуют.

Изучение состава флюидных включений в магнезитах и сидеритах типовых месторождений показало их рассольную природу, минерализация достигает 27 % CaCl<sub>2</sub>-экв. [Крупенин, Кольцов, 2017], а данные ионной хроматографии водных вытяжек показали высокое содержание Br, подтверждающее формирование рудоносных флюидов из эвапоритовых рассолов [Prochaska, Krupenin, 2013].

В отложениях уральского рифея пласты эвапоритов отсутствуют, однако находки конкреций ангидрита и ряд литологических признаков указывают на их былое присутствие. Горизонты брекчий обрушения в доломитах и псевдоморфозы по гипсу свидетельствуют о полном растворении сульфатов в процессе биосульфат-редукции, которая подтверждается изотопно-легким составом серы в пиритах из таких брекчий (<sup>34</sup>S в интервале от –16 до –5 ‰).

Среди месторождений кристаллического магнезита по особенностям химического состава, набору некарбонатных минералов и зональности залежей выделено два подтипа: саткинский (I) и исмакаевско-семибратский (II). МКМ I подтипа формировались при миграции в толщах эвапоритовых доломитов бурзяния магнезильного рассольного флюида, нагретого до ~250 °C в ходе машакского рифтогенного события (1380 млн лет). МКМ II подтипа образованы при внедрении в известняки бурзяния и юрматиния Fe-Mg рассолов, сформированных в глинистых толщах и нагретых до ~220 °C на этапе тектоно-термальной активизации в авзянское время (~1250 млн лет). Методами численного физико-химического моделирования верифицированы параметры метасоматоза [Крупенин, Кольцов, 2017].

Месторождения гидротермально-метасоматического сидерита Бакальской группы образованы при внедрении в известняки одноименной свиты захороненных Mg-Fe рассолов, испытавших взаимодействие с глинистыми породами на предзильмердакском этапе (~1000 млн лет) тектоно-термальной активизации в надрифтовом бассейне в западном борту Машакского грабена. При Mg-Fe метасоматозе по известняковому протолисту возникала зональность: доломит-анкерит-сидерит при температурах преобразований в центральной части Бакальского рудного поля 250–270 °C, в периферической – не выше 190–220 °C.

Возникновение месторождений метасоматических магнезитов и сидеритов в рифейских толщах БМА обусловлено климатическим, литогенетическим, структурным и геодинамическим факторами. Их уникальное сочетание определяет критерии для поисков крупных объектов данного генетического типа. Позиция месторождений не связана с палеозойской линейной складчатостью и приурочена к трем этапам термально-рассольной активизации в

надрифтовой впадине на пассивной окраине палеоконтинента Балтика в позднем протерозое: I – Машакский (1400–1350 млн лет), магнезиты Саткинского и Бакальского рудных полей, плюм-связанный этап; II – Авзянский (1250–1200 млн лет), флюориты, Fe-магнезиты, барит и полиметаллы, вне связи с магматизмом; III – Предзильмердакский (1000–950 млн лет), сидериты Бакальского рудного поля, (анкериты, гематит?), вне связи с магматизмом.

*Исследования проведены в соответствии с темой государственного задания ИГГ УрО РАН (№123011800013-6).*

## Литература

*Анфимов Л.В.* Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 290 с.

*Беленицкая Г.А.* Опыт мелкомасштабного литогеохимического районирования и картирования осадочного чехла территории России // Литосфера. 2007. № 5. С. 3–37.

Главнейшие магнезитовые месторождения / Л.П. Урасина, Т.А. Другалева, П.П. Смолин. М.: Наука, 1993. 157 с.

*Заварицкий А.Н.* Результаты исследований магнезитовых месторождений в Саткинском районе в 1918 г. // Горное дело. 1920. № 2/3. С. 37–39.

*Крупенин М.Т., Кольцов А.Б.* Геологическое строение, состав и физико-химическая модель формирования месторождений кристаллического магнезита Южного Урала // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 1. С. 17–40.

*Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Червяковская М.В., и др.* Источник рудных флюидов и Sm–Nd возраст сидеритов крупнейшего Бакальского месторождения, Южный Урал // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 4. С. 334–363.

*Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

Стратотип рифея. Стратиграфия и геохронология. М.: Наука, 1982. 176 с.

*Leach D., Taylor R.D., Fey D.L., Diehl, S.F., Saltus R.W.* Deposit model for Mississippi valley-type lead-zinc ores. Sci. Investig. Rep., 5070–A, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2010. 52 p.

*Prochaska W.* Magnesite and talc deposits in Austria // Mineralia Slovaca. 2000. Vol. 32. P. 543–548.

*Prochaska W., Krupenin M.T.* Evidence of Inclusion Fluid Chemistry for the Formation of Magnesite and Siderite Deposits in the Southern Urals // Mineralogy and Petrology. 2013. Vol. 107. № 1. P. 53–65.

*Д.Л. Конопелько*

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия  
d.konopelko@spbu.ru*

*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

## Апатитоносные ультрамафиты в составе лампрофир-гранитоидных интрузий

*D.L. Konopelko*

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia  
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

## Apatite-bearing ultramafic rocks in lamprophyre-granitoid intrusions

**Abstract.** The complex of small lamprophyre-granitoid intrusions of the NW Ladoga region is part of a 600-km belt of postorogenic granitoids that were emplaced at ~1.8 Ga in a strip stretching from the Åland Islands in the west to Lake Ladoga in the east. The rocks of lamprophyre-granitoid intrusions vary in