

Континентальный рифтогенез как рудообразующий процесс

A.I. Brusnitsyn
St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Continental rifting as an ore-forming process

Abstract. The formation conditions of hydrothermal and hydrothermal-sedimentary Ba, Pb, Zn, Fe and Mn deposits in sedimentary complexes in frame of continental rifting in hot arid climate are considered. The formation of metal-bearing hydrothermal fluids is contributed by a higher heat flow, deep faults, a high thickness of clastic deposits, a low degree of chemical weathering, and a high groundwater salinity. The metalliferous fluids discharge in relatively isolated areas of marine basins. The metal deposition is controlled by the concentrations of oxygen, sulfate ion and hydrogen sulfide in bottom waters. The Fe and Mn oxides are precipitated under oxidizing conditions, whereas Pb and Zn sulfides form in reducing conditions containing hydrogen sulfide. Precipitation of barite depends on the concentration of sulfate ion. Barite deposits can be associated with both Fe and Mn oxides and Pb and Zn sulfides.

Геотектонические обстановки растяжения литосферных плит с формированием континентальных рифтов в сочетании с жарким аридным климатом создают предпосылки для образования гидротермальных и гидротермально-осадочных месторождений Ba, Pb, Zn, Fe и Mn (табл.).

Предполагается, что рудообразующий процесс развивается в два этапа. На начальных стадиях развития рифта в условиях повышенного теплового потока в толще обломочных отложений происходит захоронение соленых вод и/или эвапоритовых осадков. Смешение их с грунтовыми водами и взаимодействие с не подвергшимися химическому выветриванию конгломератами, песчаниками и подобными породами способствует образованию насыщенных рудными элементами хлоридных рассолов. При дальнейшем растяжении рифта и заполнении его морской водой тектонические нарушения вскрывали погребенные в осадочных толщах горизонты рудоносных растворов и давали выход гидротермам на поверхность морского дна, где осуществлялась их разгрузка и формирование металлоносных отложений.

Благоприятным фактором для накопления металлоносных осадков является «клавишная» структура рифтов – образование на смежных участках серии поднятий и впадин (грабен) второго и более высоких порядков, служащих эффективными ловушками для рудного вещества. Кроме того, спокойный гидродинамический режим в отдельных изолированных от открытого моря бассейнах и активное протекание биохимических реакций приводят к стратификации водной толщи – разделению ее на субгоризонтальные зоны с различными окислительно-восстановительными характеристиками. За счет этого происходит дифференциация рудных элементов и концентрация каждого из них на специфических геохимических барьерах. Так, приповерхностные воды насыщены кислородом, что способствует осаждению оксидов Fe и Mn. С увеличением глубины концентрация кислорода снижается, а, начиная с какого-то уровня, запускается процесс бактериальной сульфат-редукции, приводящий к появлению сероводорода в придонных или иловых водах. В такой обстановке происходит образование сульфидов Fe, Pb, Zn и других сульфофильных металлов. Осаждение барита контролируется концентрациями сульфат-иона в морской воде. Из-за очень низкой растворимости барита его образование происходит непосредственно в зоне смешения гидротермальных растворов

Факторы развития рудоносных (Ba, Pb, Zn, Fe и Mn) гидротермальных систем в осадочных комплексах

Процесс / условия	Следствия	Рудогенерирующее значение
Континентальный рифтогенез	Повышенный тепловой поток	Источник энергии для образования магм и активизации гидротермальных процессов.
	Формирование разломов глубокого заложения	Пути миграции магматических расплавов и гидротермальных растворов.
	«Клавишная» структура региона: образование смещенных друг относительно друга по вертикали и горизонтали тектонических блоков разных порядков	Образование «ловушек» для рудного вещества. Появление замкнутых участков морских бассейнов, препятствующих рассеянию вещества, принесенного гидротермальными растворами.
		Дифференциация рудных элементов. Образование относительно изолированных бассейнов со спокойным гидродинамическим режимом и стратификацией водной толщи. Осаждение металлов в разных Eh-pH условиях.
	Быстрое проседание крупных участков земной коры, высокая скорость седиментогенеза	Источники рудных элементов. Накопление мощных толщ обломочного материала, являющегося источником рудных элементов (полевые шпаты и слюды – Ba, Pb; темнокветные минералы – Zn, Fe, Mn).
		Источники растворов. Возможность захоронения в осадочных толщах больших масс грунтовых вод.
Высокая металлоносность растворов. Высокая пористость грубообломочных отложений, создающая а) пути циркуляции в осадочных толщах грунтовых вод различного происхождения; б) возможность активного взаимодействия растворов с окружающими породами.		
Жаркий аридный климат	Интенсивное испарение поверхностных вод	Высокая металлоносность растворов. Формирование солоноватых вод и рассолов, обогащенных Na, Ca, Mg, Cl и другими элементами как главное условие образования агрессивных гидротермальных растворов, способных выщелачивать рудные элементы из окружающих пород и переносить их на значительные расстояния .
	Слабая степень химического выветривания обломочного материала осадков	Источники вещества. Сохранение в осадочных толщах большого ресурса рудных элементов.

Примечание. Составлено по материалам [Холодов, 2006; Leach et al., 2010; Wilkinson, 2014].

с придонными водами. Это может происходить в широком диапазоне окислительно-восстановительных условий. Поэтому барит может ассоциировать как с оксидами Fe и Mn, так и с пиритом и сульфидами цветных металлов.

Приуроченные к палеорифтам месторождения обладают характерным набором признаков [Холодов, 2006; Leach et al., 2010; Wilkinson, 2014; Викентьев и др., 2023]. Помимо локализации в пределах грабеновых структур, к ним относятся: 1) трансгрессивный тип осадочного разреза с континентальными отложениями в основании и морскими – в верхней части; 2) ограниченное развитие в регионе магматических пород, отсутствие прямой связи рудных залежей с магматическими комплексами; 3) тяготение месторождений к зонам глубинных конседиментационных разломов; 4) приуроченность месторождений к осадкам узкого возрастного интервала; 5) стратиформный характер залегания рудных тел; 6) преобладание среди вмещающих пород карбонатно-кремнисто-глинистых и карбонатных отложений, часто обогащенных органическим веществом; 7) отсутствие околорудных изменений вмещающих пород; 8) широкое развитие в рудах слоистых, ритмично-полосчатых текстур, чередование слоев, обогащенных рудными минералами и веществом вмещающих пород. Обладающие этими признаками сульфидные свинцово-цинковые месторождения относят к объектам SEDEX (sedimentary exhalative deposits) типа. В отношении месторождений Ba, Fe и Mn термин SEDEX в силу сложившихся традиций используется редко, хотя по геологическим условиям залегания и генезису эти месторождения имеют много общего.

Различные по масштабам залежи баритовых, железных, марганцевых и свинцово-цинковых руд часто участвуют в строении единых осадочных комплексов. При этом обычно они разобщены либо территориально (в пространстве), либо в разрезе (во времени), но есть и исключения из этого правила. По-видимому, самым ярким из них служат месторождения атасуйской группы в Центральном Казахстане, приуроченные к Жайльминской эпиконтинентальной грабен-синклинали. Здесь на небольшой территории в осадочных отложениях узкого стратиграфического интервала (D_2) расположены залежи, объединяющие несколько типов руд [Рожнов, 1982; Брусницын и др., 2022]. Например, на месторождении Ушкатын-III развиты барит-свинцовые (барит-галенитовые), железные (гематитовые) и марганцевые (браунитовые и гаусманнитовые) руды, а на месторождении Жайрем – баритовые, барит-свинцовые (барит-галенитовые) и свинцово-цинковые (пирит-галенит-сфалеритовые) руды.

Изучение месторождений Ушкатын-III и Жайрем показывает, что, скорее всего, они образовались в ходе развития однотипных гидротермальных систем, а различия между ними обусловлены фациальными и физико-химическими условиями в области разгрузки металлоносных растворов. В свою очередь, оба этих фактора определялись смещением друг относительно друга тектонических блоков в фундаменте палеорифта. За счет этого рифт приобрел неровные очертания и сложную внутреннюю структуру. В нем сочетались приподнятые участки и депрессии, отличающиеся разным уровнем насыщения придонных вод кислородом, сульфат-ионом и сероводородом. Сонахождение таких локально разнородных участков при активно протекавших в каждом из них гидротермальных процессах способствовало образованию ассоциации разных по составу металлоносных отложений. Таким образом, пример, месторождений атасуйской группы показывает, что даже близкие по металлоносности и другим характеристикам гидротермальные растворы могут продуцировать разное оруденение.

Литература

Брусницын А.И., Садыков С.А., Перова Е.Н., Верещагин О.С. Генезис барит-галенитовых руд комплексного (Fe, Mn, Pb, BaSO₄) месторождения Ушкатын-III, Центральный Казахстан: анализ геологических, минералогических и ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) данных // Геология рудных месторождений. 2022. № 3. С. 247–275.

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-