

УДК 551+553.63

Эвапоритовые сульфатно-карбонатные отложения в мезопротерозое (типовой разрез рифея) и связь с периодами теплого климата

М. Т. Крупенин

Институт геологии и геохимии УрО РАН

620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15. E-mail: krupenin@igg.uran.ru*(Статья поступила в редакцию 23.12.2025 г.)*

Генезис крупнейших месторождений магнезита, сидерита, флюорита в рифейских отложениях Башкирского мегантиклинория определялся миграцией рассолов эвапоритовой природы на тектоно-термальных этапах развития в структуре Приуральской надрифтовой впадины в интервале времени 1400–1000 млн лет. Масштабное образование и захоронение рассолов в мезопротерозое связывается с развитием эвапоритовых обстановок, отличающихся от современных. Формирование терригенно-карбонатных шельфовых бассейнов проходило в длительные периоды теплого климата, широкого развития надплатформенных морей с преобладанием мелководных рассольных застойных обстановок, обусловивших широкое развитие биосульфатредукции и растворение аутигенных сульфатов. Формирование и захоронение рассолов в осадочных толщах протерозоя определило специфику минерации.

Ключевые слова: *эвапоритовые обстановки, рассолы, биосульфатредукция, надрифтовая впадина, мезопротерозой, магнезит.*

DOI: 10.17072/psu.geol.25.1.62

Введение

Изучение карбонатных руд (магнезиты Южно-Уральской провинции, крупнейшие в мире месторождения сидеритов), а также флюоритов в отложениях рифея на западном склоне Южного Урала в структуре Башкирского мегантиклинория (БМА) показало важную роль рассолов эвапоритовой природы в образовании рудоносных растворов. Все указанные рудные скопления с уникальными запасами были сформированы в терригенно-карбонатных шельфовых комплексах раннего и среднего рифея (1750–1200 млн лет, мезопротерозой) в результате рифтогенных и тектоно-термальных этапов на уровне 1400, 1250, 1000 млн лет, датированных с помощью изотопно-геохронологических методов (Rb-Sr, U-Pb, Sm-Nd) (Крупенин, 2024). Анализ геодинамической позиции БМА, архитектуры осадочного бассейна, палеогеографии рифейских отложений показал, что Mg-Fe карбонатные метасоматиты, флю-

ориты, а также проявления и месторождения полиметаллов и барита формировались во время тектоно-термальных импульсов в долгоживущей Приуральской надрифтовой впадине. Эвапоритовые рассолы, изначально несущие большое количество магния, в условиях глубинного катагенеза послужили источником формирования высококачественных магнезитов. При длительном взаимодействии с вмещающими терригенными толщами химически агрессивные рассолы обогащались железом для формирования залежей сидеритов в области флюидной разгрузки. Предполагается, что подобные процессы происходили и при мобилизации фтора из рифтогенных гранитоидов, полиметаллов и бария из терригенных толщ.

Роль рассолов в специфике минерации отложений рифея

Изучение термометрии флюидных включений как в околорудных метасоматических

© Крупенин М. Т., 2026



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

доломитах и кварце, так и в магнезитах, сидеритах и флюорите, подтверждает высокую соленость рассолов (на уровне 20–28 % экв. NaCl) (Крупенин и др., 2013). Изучение Cl-Br-Na-систематики пород и руд с помощью ионной хроматографии стало доказательством эвапоритовой природы этих рассолов и базируется на линейном накоплении брома в процессе эвапоритового сгущения морской воды (McCaffrey et al., 1987; Prochaska, Krupenin, 2013; и др.). Таким образом, мезопротерозойские терригенно-карбонатные толщи в восточной части палеоконтинента Балтика в интервале 1400–1000 млн лет были подвержены воздействию эвапоритовых рассолов, которые, скорее всего, и формировались в осадочных бассейнах того времени. Эвапоритовых залежей, содержащих пласты сульфатов и галогенов, в рифее Приуральской впадины не обнаружено, однако в нижнерифейских отложениях прилегающих к ней авлакогенов (Камско-Бельский, Серноводско-Абдулинский) отмечены находки ангидрита и гипса, частично преобразованного в пирит с изотопно тяжелой серой (Мичурин и др., 2009). В то же время в отложениях нижнего и среднего рифея Башкирского мегантиклинория (1750–1250 млн лет) обнаружены признаки былого присутствия эвапоритовых обстановок. Наиболее выразительно такие признаки наблюдаются в протяженных доломитовых горизонтах, достигающих мощности сотен метров. В саткинской свите нижнего рифея карагайская пачка мощностью до 700 м, в бакальской свите нижнешуйдинская пачка до 100 м, в авзянской свите среднего рифея реветская пачка до 500 м. Подобные условия можно предполагать и для бассейна накопления отложений суранской свиты (бердагуловская пачка) центральных районов Башкирского мегантиклинория.

Выделены группы признаков, указывающих на образование эвапоритовых условий: литологические, минералогические, геохимические. К литологическим признакам относятся различные текстурные особенности: брекчии обрушения (коллапс-брекчии), псевдоморфозы по эвапоритовым минералам, следы атектонических хрупко-

пластических деформаций (энтеролитовые текстуры). К минералогическим признакам относятся находки сульфатов (барит, гипс) и соли в отложениях, а также минералы-спутники эвапоритовых обстановок. К последним следует отнести кремнезем из палеоповерхностей окремнения, тонкую вкрапленность гематита, различные формы аутигенного магнезиального хлорита, аутигенный низкотемпературный микроклин в карбонатных отложениях (Крупенин и др., 2009). В отложениях разные группы признаков встречаются совместно, подчеркивая неслучайный характер их проявления.

Основным литологическим признаком является наличие специфических текстур, связанных с образованием в карбонатном субстрате эвапоритовых минералов. Чаще всего наблюдаются псевдоморфозы по кристаллам гипса, выполненные вторичным крупнокристаллическим доломитом во вмещающем тонкокристаллическом. Форма псевдоморфоз зависит от кристаллических агрегатов гипса и ангидрита: сечения имеют форму остроугольных многогранников, таблитчатую, клиновидную, призматическую, звездчатую; сложную многоугольную, округлую (рис. 1). Доломитовые псевдоморфозы по кристаллам гипса всегда имеют секреторное строение (рост кристаллов доломита от границы с вмещающим тонкокристаллическим доломитом к центру гнезда).

Закономерная форма гнезд и их строение указывают на то, что их формирование происходило в пустотах, образованных при растворении минералов, форма и положение которых соответствует раннедиагенетическому гипсу в толще частично литифицированного карбонатного осадка. Следовательно, гнезда представляют собой псевдоморфозы вторичного доломита по выделениям первичных раннедиагенетических эвапоритовых минералов, скорее всего, кристаллов и кристаллических агрегатов гипса и ангидрита, которые были растворены в ходе диагенеза и заполнены эпигенетическими минералами. Доказательством этого может служить скопление нерастворимого остатка, состоящего из тонких обломков кварца, хлорита, гематита, в нижней части наиболее крупных гнезд.

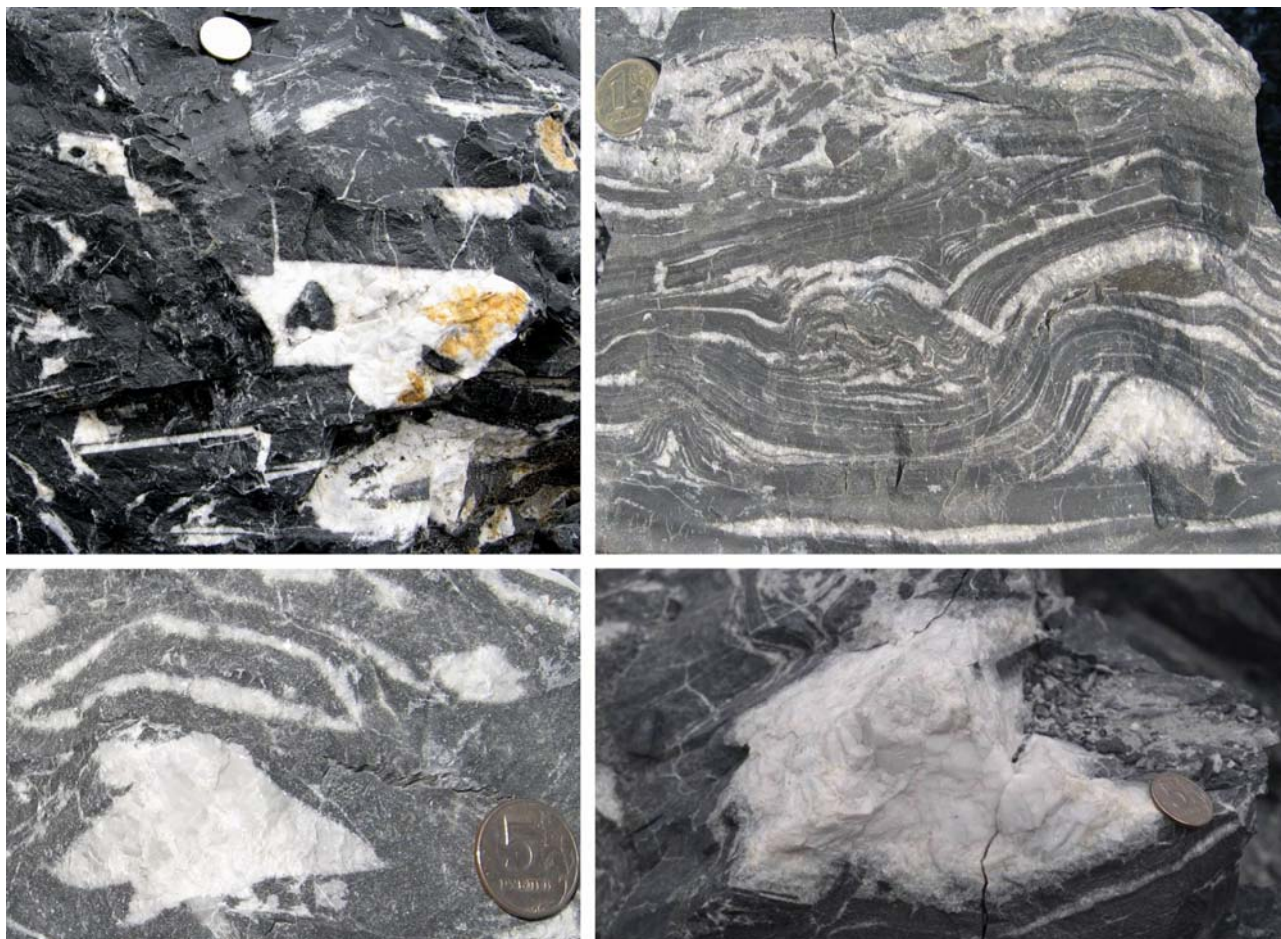


Рис. 1. Псевдоморфозы вторичного крупнокристаллического доломита по эвапоритовым минералам (магнетитовмещающая карагайская пачка саткинской свиты $RF_{1st}z^5$). Диаметр монеты 25 мм

В некоторых брекчированных прослоях карагайской пачки среди темно-серых доломитов развиты двойные слойки (дуплеты), содержащие в нижней части буровато-серый доломитовый матрикс, обогащенный силикокластикой, а в верхней – слоев белого доломита. Дуплеты имеют сходство с карбонатно-сульфатными тонкослоистыми отложениями гиперсоленых тиховодных лагун (Сонненфельд, 1988).

Брекчии обрушения при диагенетическом растворении эвапоритовых минералов широко проявлены в эвапоритовых горизонтах нижнего рифея. Брекчии данного типа, в отличие от других осадочных брекчий (темпеститов-флейкстоунов, околорифовых шлейфов), состоят из трех основных компонентов: 1) обломки вмещающих доломитов; 2) тонкозернистый доломитовый матрикс; 3) гнезда, линзы и неправильной формы выделения вторичного крупнокристаллического доломита. Обломки совершенно неокатаны, часто имеют плитчатую форму и пред-

ставлены теми же мелкослоистыми серыми доломитами, что и в небрекчированных участках, с различной степенью перемещения (иногда незначительной) относительно своего первоначального положения в прослое. Размеры плиток варьируют в широких пределах и составляют, как правило, первые сантиметры, форма их уплощенная. Отмечено послойное чередование горизонтов с интенсивным брекчированием мощностью до 20 м и тонкослоистых темно-серых доломитов без признаков нарушения слоистости и без гнезд вторичного крупнокристаллического доломита (Крупенин, 2018).

Изотопные исследования серы сульфидов в отложениях раннего рифея Волго-Уральской области (Горожанин и др., 2006) и БМА показали их обогащение тяжелым изотопом S ($\delta^{34}S$ от +8 до +24 ‰), что указывает на образование сульфидов в результате сульфатредукции по эвапоритовым сульфатам (Мичурин и др., 2009). В сарапульской свите кырпинской серии при изучении раз-

реза параметрической скважины 1 Сарапульская в пелитоморфных доломитах и алевролитах обнаружено большое количество идиоморфных кристаллов ангидрита и гипса, в том числе и в виде сростаний типа «ласточкиных хвостов», и мелкозернистых агрегатов ангидрита. Очень тяжелый изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S}$ от +22,3 до +23,0 ‰) резко отличается данные сульфаты от аналогичной характеристики сульфатов пермского возраста ($\delta^{34}\text{S}$ от +9 до +13 ‰) и предполагает их раннерифейское время образования. Минимальные значения $\delta^{34}\text{S}$ составляют 20 ‰ и, вероятно, отражают первичный изотопный состав серы осадочных сульфатов, поскольку известно, что процессы перекристаллизации приводят к утяжелению изотопного состава серы. В то же время в терригенных отложениях суранской свиты (НГС и мергели, бердагуловская подсвита), а также в большеинзерской свите в Ямантауском антиклинории БМА известно большое количество пиритовых стяжений с утяжеленным изотопным составом серы ($\delta^{34}\text{S}$ от +8 до +24 ‰) (Мичурин и др., 2009). Ранее высокие положительные значения изотопного состава серы были получены и для бакальской свиты (Анфимов, 1997). При этом среди доломитов саткинской свиты исследованиями различных авторов установлены только отрицательные значения $\delta^{34}\text{S}$ от -16,6 до -3,8 ‰ (Крупенин, Мичурин, 2018). Это определенно указывает на формирование сульфидов (пиритов и халькопиритов) на раннедиагенетическом этапе в результате биосульфатредукции (БСР). Форма выделения сульфидов в виде тонкозернистых стяжений в черных доломитах и мергелях подтверждает возможность их образования с участием сульфатредуцирующих бактерий. Кроме того, в гнездах коллапс-брекчий нижней, подрудной, части карагайской пачки обнаружены включения пирита, играющие роль минералогических уровней (расположены в нижней части гнезд относительно первичной слоистости). Нижняя часть «кокардовых» выделений пирита относительно обогащена легким ^{32}S изотопом до значений $\delta^{34}\text{S}$ -16,6 ‰, в то время как в верхней части таких выделений $\delta^{34}\text{S}$ варьирует от -11,0 до -9,1 ‰. Низкие значения $\delta^{34}\text{S}$ (до -16,6 ‰) предполагают их связь с процессами БСР. Гомодромный тренд утяжеления изотопного

состава серы по мере роста пиритовых конкреций указывает на закрытую систему (Крупенин, Мичурин, 2018).

Важным геохимическим индикатором эвапоритовых условий седиментации карбонатных пород является изотопный состав кислорода. Раннедиагенетические эвапоритовые доломиты, как правило, наследуют изотопно-тяжелый кислород морских вод и характеризуются значениями $\delta^{18}\text{OSMOW} > 25$ ‰. Карагайские доломиты саткинской свиты имеют повышенные значения $\delta^{18}\text{OSMOW}$ (от 22,52 до 27,36 ‰) (Крупенин и др., 2011) по сравнению с вышележащими известняками казымовского горизонта, где значения $\delta^{18}\text{OSMOW}$ лежат в узком интервале (22,0 до 24,37 ‰), что характерно для рифейских морских известняков. В верхней части авзянской свиты среднего рифея (реветская подсвита, RF_{2av5}) развит мощный горизонт эвапоритовых доломитов, с псевдоморфозами вторичного доломита по сульфату. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет 26,5 ‰, стандартное отклонение 1,6 (Bartley et al., 2007), отдельные значения достигают 29 ‰, ниже средних значений для известняков этой свиты (20,78 ‰). Приведенные данные подчеркивают возможную эвапоритовую природу ряда карбонатных горизонтов раннего и среднего рифея и важную роль микробиальных сообществ. Сульфатредуцирующие бактерии могли стать агентом масштабного поглощения осадочных сульфатов, уничтожая уже на стадии диагенеза вещественные доказательства образования эвапоритовых минералов.

Причины широкого развития эвапоритов в отложениях шельфа

Отличиями раннерифейской и современной БСР являются масштабы данного явления. В раннерифейской низкооксигенизированной атмосфере с повышенной температурой водоемов процессы БСР в осадках имели более широкое распространение по сравнению с современностью. Это предполагает ведущую роль механизма удаления твердых сульфатов в результате снижения их концентрации в поровом растворе при БСР. Для ряда докембрийских формаций, содержащих доломиты с признаками брекчирования и

гнездовыми текстурами псевдоморфоз по гипсу, также предполагается присутствие эвапоритовых условий при отсутствии самих характеристических минералов: «исчезнувшие эвапориты (vanished evaporite)» (Wright, Kirkham, 2010).

В Волго-Уральской области (Камско-Бельский авлакоген) возрастным и стратиграфическим аналогом саткинской свиты является калтасинская свита нижнего рифея (Сергеева и др., 2021), представленная преимущественно доломитами. Re-Os-возраст пиритов из доломитов этой свиты (Sperling et al., 2014) совпадает с доломитами саткинской (около 1500 млн лет (Кузнецов и др., 2008)). Большое площадное распространение доломитов позволяет предполагать существование единого эвапоритового бассейна в калтасинско-саткинское время.

Бассейн саткинского времени можно сравнить с крупным мелководным лагунно-морским бассейном нижнепермского возраста на Русской платформе, где, по данным В. Г. Кузнецова (2003), в дистальных фациях на расстоянии в сотни километров от береговой линии накапливались сульфатно-доломитовые отложения. В проксимальных фациях эвапоритового бассейна шло накопление сульфатно-галитовых отложений (Кузнецов, 1992). Последние формировались в условиях, удаленных от береговой линии обширных лагун среди крайне мелководных морей на шельфе Русской платформы (Кузнецов, 2003). Подобные обширные зоны карбонатно-эвапоритовой седиментации описаны также для позднедевонского Западно-Уральского бассейна (Чувашов, 1968). В мелководных надплатформенных (эпиконтинентальных) морях протяженностью до сотен км (Waggen, 2016) был затруднен активный водообмен с открытым океаном, а жаркий климат способствовал процессам эвапоритового сгущения морской воды. Выделенные литотипы (доломиты брекчиевидные, с псевдоморфозами) можно рассматривать как соответствующие генетическим типам сульфатно-доломитовых осадков фациального комплекса удаленной мелководной осоложняющей лагуны.

Преобладающим типом карбонатных отложений в протерозое были доломиты (Куз-

нецов, 2019 и др.). Начиная с палеопротерозоя, в них присутствуют рассеянные сульфаты (Carbonate-associated sulfates), о чем свидетельствуют результаты изучения формации Дойчланд (Deutschland Formation, Transvaal Supergroup) в ЮАР с возрастом порядка 2,3 млрд лет (Guo et al., 2009). В более молодых отложениях, например в туломозерской свите ятулия Карелии (2,1 млрд лет), уже фиксируется наличие толщ ангидритов и каменных солей (Морозов и др., 2010). Еще более широкое распространение эвапориты получили на уровне 1,2 млрд лет (Kah et al., 2001), в том числе они описаны из формации Сэсайэти Клифс (Баффинова Земля), до 15 % объема которой представлено гипсом. Сульфатно-доломитовые породы обнаружены и в раннепротерозойской формации Дашицяо, провинция Ляонин, Северо-Китайская платформа (Chen et al., 2002). В протерозойских терригенных породах и доломитах кроме прослоев и стяжений ангидрита и гипса наблюдаются многочисленные доломитовые и кварцевые псевдоморфозы по сульфатам, а также горизонты коллапс-брекчий, образованных при диагенетическом растворении сульфатов и послойном брекчировании (Жарков, 2005; Мичурин и др., 2009; Крупенин, 2018; Grotzinger, Kasting, 1993; Melezhik et al., 2001).

Предполагается, что часть палеопротерозоя (карелий), мезопротерозой и часть неопротерозоя (рифей) представляли собой весьма длительный отрезок геологической истории с широким проявлением неактуалистических обстановок существования крупных мелководных морей в условиях теплого климата. Высокое стояние уровня моря способствовало развитию обширных шельфовых бассейнов с устойчивыми периодами мелководной эвапоритовой седиментации. Для этого длительного интервала времени 2,2–0,72 млрд лет не отмечены эпизоды оледенений (рис. 2).

Серия оледенений, маркированных тиллитами в супергруппах Гурон и Трансвааль, после великого окислительного события (GOE) завершилась на уровне 2,22 млрд лет (Чумаков, 2015; Rasmussen et al., 2013). Существование длительных периодов теплого климата и высокого стояния моря в мезопротерозое

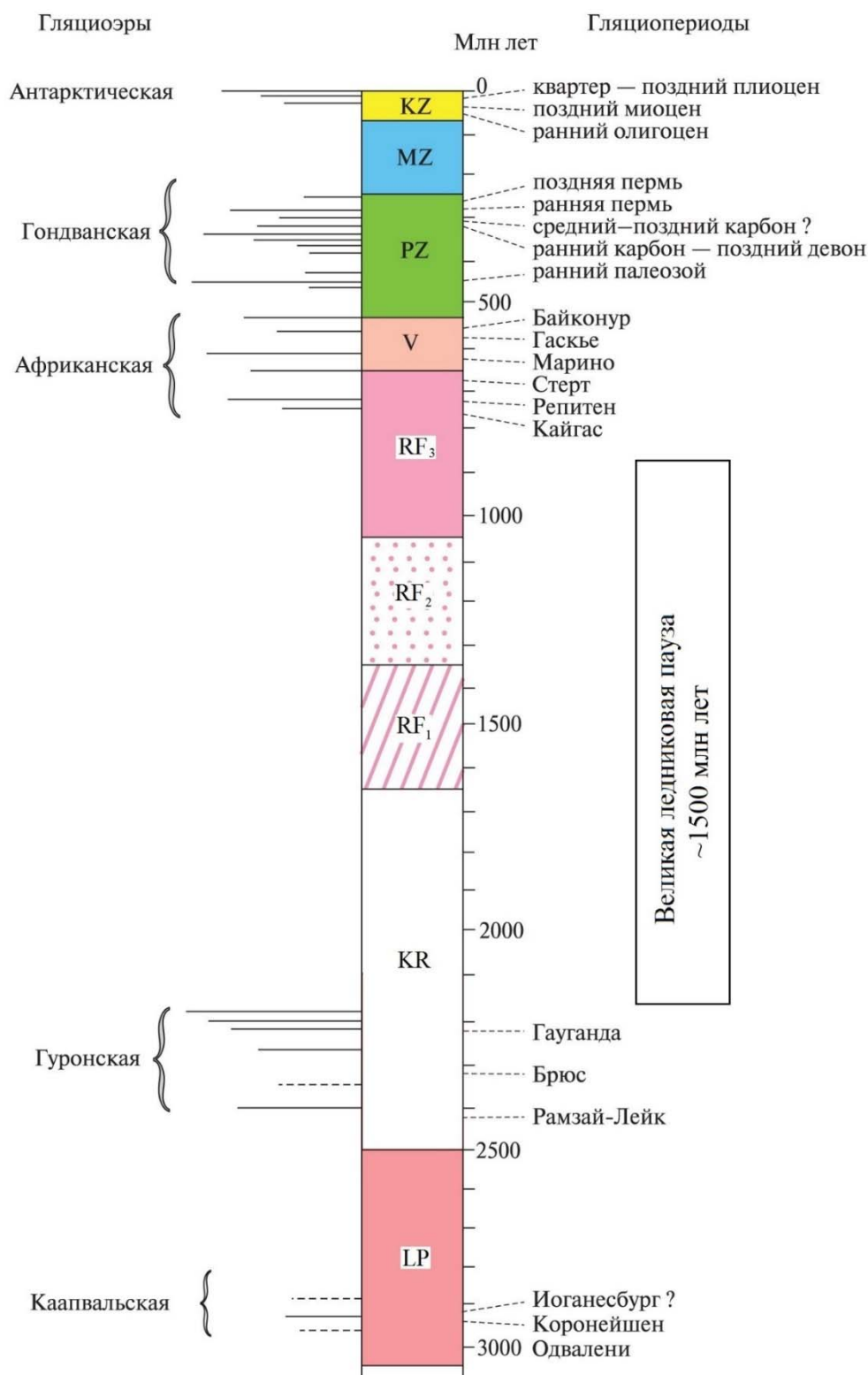


Рис. 2. Распределение по времени гляциоэры и гляциопериодов (по Чумакову, 2015). Стратиграфическая шкала по (Стратиграфический кодекс..., 2019). Верхний архей: LP – лопий; нижний протерозой: KR – карелий; верхний протерозой: RF₁ – нижний рифей; RF₂ – средний рифей; RF₃ – верхний рифей; V – венд; PZ – палеозой; MZ – мезозой; KZ – кайнозой. Горизонтальные линии слева – положение гляциопериодов на шкале времени

терозое и, вероятно, в начале неопротерозоя также вписывается в этот тренд. Верхняя граница устойчивого теплого периода связы-

вается с наступлением гляциоэпизода Стёрт (~717 млн лет, неопротерозой, криогений) в российской шкале верхний рифей. Таким об-

разом, в протерозое «великая ледниковая пауза» продолжалась примерно с 2220 до 720 млн лет, то есть около 1,5 млрд лет.

Для фанерозоя подобные длительные интервалы существования обширных мелководных надплатформенных морей также известны. В фундаментальной сводке по условиям формирования эвапоритов Дж. Уорреном (Warren, 2016) приведены убедительные примеры мегабассейнов, занимающих значительную площадь древних платформ и несопоставимых с современными эвапоритовыми бассейнами, приуроченными к узким зонам прибрежных лагун. Площадь венд-кембрийского соленосного Восточно-Сибирского бассейна на Сибирской платформе, пермских бассейнов Восточно-Европейской и Северо-Американской платформ достигала более 1 млн км² (Кузнецов, 2019; Warren, 2016). Существование таких гигантских эвапоритовых палеобассейнов, не имеющих аналогов в современных обстановках (составляющих $n \cdot 10^4$ км² (Warren, 2016)), связано, вероятно, с климатическими особенностями древних эпох, в том числе протерозоя (Крупенин, Дуб, 2023).

Заключение

Образование очень крупных ископаемых эвапоритовых бассейнов на континентах в периоды теплого климата определяется, прежде всего, палеогеографическими особенностями. Выделено три основных варианта стилей отложения древних крупных эвапоритовых эпи- и перикратонных бассейнов мира: рампы (иногда с подводным изломом склона на глубине) и 2 варианта окаймленного шельфа: с барьером на краю и отмелью в средней части (Warren, 2016). Рассмотренные варианты предполагают, что гидрографическая связь между открытым океаном и перикратонным морским бассейном могла быть потеряна по одной из причин: нарастание песчаной отмели на краю платформы, небольшое падение уровня моря или тектонический наклон. Длительное существование эвапоритовых условий в устойчиво погружающихся пери- и интракратонных бассейнах протерозоя способствовало как накоплению мощных карбонатных горизонтов, так и образованию, а также захоро-

нению рассолов в поровом пространстве отложений. Этапы рифтогенной или термальной активизации инициировали миграцию рассолов и в зонах нагрева провоцировали формирование термально-рассольных метасоматических процессов с проявлением особой минерагении: образования залежей кристаллического магнетита, сидерита, флюорита полиметаллов и барита.

Исследования выполнены в рамках темы государственного задания ИГГ УрО РАН (номер госрегистрации 123011800013-6).

Библиографический список

- Жарков М. А. Эволюция эвапоритов в докембрии в связи с преобразованиями биосферы и химического состава мирового океана. Статья 1. Эвапориты архея и раннего протерозоя // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2005. Т. 13, № 2. С. 19–29. EDN: HSI ZVP
- Крупенин М. Т. Коллапс-брекчии как признак бывшего присутствия эвапоритов (саткинская свита нижнего рифея, Южный Урал) // Вестник Пермского Университета. Геология. 2018. № 17(4). С. 342–358. DOI: 10.17072/psu.geol.17.4.342 EDN: YTAZQL
- Крупенин М. Т. Этапы геологического развития осадочных бассейнов рифея стратотипической местности (Южный Урал) и их отражение в минерагении // Труды ИГГ. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2024. Вып. 168. С. 27–36. DOI: 10.24930/0371-7291-2024-168-27-36 EDN: IPTYUG
- Крупенин М. Т., Дуб С. А. Неактуалистические обстановки седиментации в мезопротерозойских бассейнах: особенности климата и минерагении // Стратиграфия докембрия: проблемы и пути решения: материалы VIII Российской конференции по проблемам геологии докембрия. СПб: Свое издательство, 2023. С. 80–83.
- Крупенин М. Т., Гараева А. А., Клюкин Ю. И. и др. Флюидный режим магнетитового метасоматоза на Саткинских месторождениях Южно-Уральской провинции (термокриометрия флюидных включений) // Литосфера. 2013. № 2. С. 120–134. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. № 6. С. 70–78.
- Крупенин М. Т., Мичурин С. В. Индикаторные изотопно-геохимические характеристики сульфидов из Саткинского магнетитового месторождения (Южно-Уральская провинция) // Докл. РАН. 2018. Т. 478, № 3. С. 328–331.

DOI: 10.7868/S0869565218030179

EDN: YKWDQD

Крупенин М. Т., Кузнецов А. Б., Крылов Д. П., Маслов А. В. Стабильные изотопы углерода и кислорода как индикаторы магнезиального метасоматоза в отложениях нижнего рифея Южного Урала // Докл. РАН. 2011. Т. 439, № 5. С. 660–664. EDN: OCSXMDZ

Кузнецов А. Б., Овчинникова Г. В., Семихатов М. А., Горохов И. М., Каурова О. К., Крупенин М. Т., Васильева И. М., Гороховский Б. М., Маслов А. В. Sr-изотопная характеристика и Pb-Pb возраст карбонатных пород саткинской свиты, нижнерифейская бурзянская серия Южного Урала // Стратиграфия. Геол. Корреляция. 2008. Т. 16, № 2. С. 16–34. EDN: IJKMPP

Кузнецов В. Г. Значение изучения эволюции осадочного породообразования в истории Земли для реконструкции изменений геохимических обстановок поверхности // Известия вузов. Геология и разведка. 2019. № 2. С. 27–34. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-2-27-34

EDN: QKIPDG

Кузнецов В. Г. Природные резервуары нефти и газа карбонатных отложений. М.: Недра, 1992. 240 с. ISBN: 5-247-02162-2 EDN: TOAKQR

Мичурин С. В., Ковалев С. Г., Горожанин В. М. Генезис сульфидов и сульфатов в нижнерифейских отложениях Камско-Бельского авлакогена и Башкирского мегантиклинория. Уфа: ООО ДизайнПолиграфСервис, 2009. 192 с.

Морозов А. Ф., Хахаев Б. Н., Петров О. В., Горбачев В. И., Тарханов Г. В., Цветков Л. Д., Эринчек Ю. М., Ахмедов А. М., Крупенин В. А., Свешникова К. Ю. Толща каменных солей в разрезе палеопротерозоя Онежского прогиба Карелии (по данным Онежской параметрической скважины) // Докл. РАН. 2010. Т. 435, № 2. С. 230–233. EDN: NBTBOB

Сергеева Н. Д., Пучков В. Н., Карасева Т. В. Верхний протерозой (рифей и венд) Волго-Уральской области в параметрических и глубоких скважинах. Уфа: Книга-Принт, 2021. 196 с.

Сонненфельд П. Рассолы и эвапориты. М.: Изд-во Мир, 1988. 480 с.

Чувашов Б. И. История развития и биоэкономическая характеристика позднедевонского бассейна на западном склоне Среднего и Южного Урала. М.: Наука, 1968. 132 с.

Чумаков Н. М. Оледенения Земли: История, стратиграфическое значение и роль в биосфере // Труды Геологического института. М.: ГЕОС, 2015. Вып. 611. 160 с. EDN: USGSFW

Bartley Ju. K., Kah L. C., McWilliams Ju. L., Stagner A. F. Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan For-

mation, Southern Urals, Russia): Signal recovery in a fold-and-thrust belt // Chem. Geol. Vol. 237. 2007. P. 211–232.

Chen C., Lu A., Cai K., Zhai Yu. Sedimentary characteristics of Mg-rich carbonate formations and minerogenic fluids of magnesite and talc occurrences in early Proterozoic in eastern Liaoning Province, China // Science In China (Series B). 2002. Vol. 45. P. 84–94.

Grotzinger J. P., Kasting J. F. New constraints on Precambrian Ocean composition // J. Geol. 1993. Vol. 101. P. 235–243.

Guo Q., Strauss H., Kaufman A. J., Schröder S., Gutzmer J., Wing B., Baker M. A., Bekker A., Jin Q., Kim S-T., Farquhar J. Reconstructing Earth's surface oxidation across the Archean-Proterozoic transition. Geology. 2009. Vol. 37, No. 5. P. 399–402. DOI: 10.1130/G25423A.1 EDN: MYOHMZ

Kah L. C., Lyons T. W., Chesley J. T. Geochemistry of a 1.2 Ga carbonate-evaporite succession, northern Baffin and Bylot Islands: implications for Mesoproterozoic marine evolution // Precambrian Research. 2001. Vol. 111, No. 1-4. P. 203–234. DOI: 10.1016/S0301-9268(01)00161-9 EDN: PMYXFF

Melezhik V. A., Fallick A. E., Medvedev P. V., Makarikhin V. V., Palaeoproterozoic magnesite: lithological and isotopic evidence for playa/sabkha environments // Sedimentology. 2001. Vol. 48. P. 379–397. DOI: 10.1046/j.1365-3091.2001.00369.x EDN: LGSDID

McCaffrey M. A., Lazar B., Holland H. D. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br⁻ and K⁺ with halite // J. Sedim. Petrol. 1987. Vol. 57, No. 5. P. 928–937.

Prochaska W., Krupenin M. T. Evidence of Inclusion Fluid Chemistry for the Formation of Magnesite and Siderite Deposits in the Southern Urals // Mineral. Petrol. 2013. Vol. 107, No. 1. P. 53–65. DOI: 10.1007/s00710-012-0251-5 EDN: REYYEB

Rasmussen B., Bekker A., Fletcher I. R. Correlation of Paleoproterozoic glaciations based on U–Pb zircon ages for tuff beds in the Transvaal and Huronian Supergroups // Earth and Planetary Science Letters. 2013. Vol. 382. P. 173–180.

Warren J. K. Evaporites. A Geological Compendium. Second Edition. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 1822 p.

Wright D. T., Kirkham A. The role of bacterial sulphate reduction in carbonate replacement of vanished evaporites: examples from the Holocene, Jurassic and Neoproterozoic // SP43 – Quaternary carbonate and evaporite sedimentary facies and their ancient analogues / Christopher G. St C. Kendall, Abdulrahman Alsharhan (eds). Wiley, 2010. P. 362–379.

Evaporite Sulfate-Carbonate Deposits in the Mesoproterozoic (Typical Riphean Section) and the Relationship with Warm Climate Periods

M.T. Krupenin

Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Ac. Vonsovskogo Str., Yekaterinburg 620016, Russia

E-mail: krupenin@igg.uran.ru

The genesis of the largest magnesite, siderite, and fluorite deposits in the Riphean deposits of the Bashkir megaanticlinorium was governed by the migration of evaporite brines at the tectonic-thermal stages of development of the structure of the Urals supra-rift basin in the time interval of 1400-1000 million years. Large-scale formation and burial of brines in the Mesoproterozoic is associated with the development of evaporite environments that differ from modern ones. Formation of terrigenous-carbonate shelf basins occurred under conditions of long-term existence of warm climate, wide development of supra-platform seas with prevalence of shallow stagnant conditions, which caused wide development of biosulfate reduction and dissolution of authigenic sulfates.

Key words: *evaporite conditions; brines; biosulfate reduction; supra-rift basin; Mesoproterozoic; magnesite.*

References

- Zharkov M.A.* 2005. Evolyutsiya evaporitov v dokembrii v svyazi s preobrazovaniyami biosfery i khimicheskogo sostava mirovogo okeana. Statya 1. Evapority arkheya i rannego proterozoya. [Evolution of Evaporites in the Precambrian in Connection with Transformations of the Biosphere and Chemical Composition of the World Ocean. Paper 1. Evaporites of Archean and Early Proterozoic]. Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya. 13(2):19–29. (in Russian)
- Krupenin M.T.* 2018. Kollaps-brekhii kak priznak bylogo prisutstviya evaporitov (satkinskaya svita nizhnego rifeya, Yuzhnyj Ural) [Collapse Breccias as an Indicator of the Former Presence of Evaporites (Lower Riphean Satka Formation, Southern Urals)]. Vestnik Permskogo Universiteta. Geologiya. 17 (4):342–358. (in Russian)
- Krupenin M.T.* 2024. Etapy geologicheskogo razvitiya osadochnykh basseynov rifeya stratotipicheskoy mestnosti (Yuzhnyy Ural) i ikh otrazhenie v mineragenii [Stages of Geological Development of Riphean Sedimentary Basins in the Stratotype Locality (Southern Urals) and Their Reflection in Minerageny]. Ekaterinburg. Trudy IGG. 168:27-36. (in Russian)
- Krupenin M.T., Dub S.A.* 2023. Neaktualisticheskie obstanovki sedimentatsii v mezoproterozoyskikh basseynakh: osobennosti klimata i mineragenii [Non-Actualistic Sedimentation Environments in Mesoproterozoic Basins: Features of Climate and Minerageny]. In: Stratigrafiya dokembriya: problemy i puti resheniya. Materialy VIII Rossijskoy konferentsii po problemam geologii dokembriya. SPb, Svoyo izd., pp. 80-83. (in Russian)
- Krupenin M.T., Garaeva A.A., Klyukin Yu.I. et al.* 2013. Flyuidnyy rezhim magnezitovogo metasomatoza na Satkinskikh mestorozhdeniyakh Yuzhno-Ural'skoy provintsii (termokriometriya flyuidnykh vklucheniy) [Fluid regime of magnesite metasomatism at the Satka deposits of the South Urals province (thermocryometry of fluid inclusions)]. Litosfera. 2:120–134. (in Russian)
- Krupenin M.T., Michurin S.V.* 2018. Indikatornye izotopno-geokhimicheskie kharakteristiki sulfidov iz Satkinskogo magnezitovogo mestorozhdeniya (Yuzhno-Ural'skaya provintsia) [Indicator isotope-geochemical characteristics of sulfides from the Satka magnesite deposit (South Urals province)]. Dokl. RAN. 478(3):328–331. (in Russian)
- Krupenin M.T., Kuznetsov A.B., Krylov D.P., Maslov A.V.* 2011. Stabilnye izotopy ugleroda i kisloroda kak indikatory magnezialnogo metasomatoza v otlozheniyakh nizhnego rifeya Yuzhnogo Urala [Stable carbon and oxygen isotopes as indicators of magnesian metasomatism in the Lower Riphean sediments of the Southern Urals]. Dokl. RAN. 439(5):660-664. (in Russian)
- Kuznetsov A.B., Ovchinnikova G.V., Semikhatov M.A., Gorokhov I.M., Kaurova O.K., Krupenin M.T., Vasil'eva I.M., Gorokhovskiy B.M., Maslov A.V.* 2008. Sr-izotopnaya kharakteristika i Pb-Pb vozrast karbonatnykh porod satkinskoy svity, nizhnerifeyskaya burzyanskaya seriya Yuzhnogo Urala [Sr-isotope characteristics and Pb-Pb age of carbonate rocks of the Satka Suite, Lower Riphean Burzyan Group of the Southern Urals]. Stratigrafiya. Geol. Korrelyatsiya. 16(2):16–34. (in Russian)
- Kuznetsov V.G.* 2019. Znachenie izucheniya evolyutsii osadochnogo porodoobrazovaniya v istorii Zemli dlya rekonstruktsii izmeneniy geokhimicheskikh obstanovok poverkhnosti [Importance of Studying the Evolution of Sedimentary Rock Formation in the Earth's History for Reconstructing Changes in Surface Geochemical Environments].

- Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka. 2:27–34. (in Russian)
- Kuznetsov V.G.* 1992. Prirodnye rezervuary nefi i gaza karbonatnykh otlozheniy [Natural Reservoirs of Oil and Gas in Carbonate Deposits]. Nedra, p. 240. (in Russian)
- Michurin S.V., Kovalev S.G., Gorozhanin V.M.* 2009. Genezis sulfidov i sulfatov v nizhnereyfeyskikh otlozheniyakh Kamsko-Belskogo avlakogena i Bashkirskogo megantiklinoriya [Genesis of Sulfides and Sulfates in the Lower Riphean Deposits of the Kama-Belsk Aulacogen and Bashkir Meganticlinorium]. Ufa, p. 192. (in Russian)
- Morozov A.F., Khakhaev B.N., Petrov O.V., Gorbachev V.I., Tarkhanov G.V., Tsvetkov L.D., Erinchek Yu.M., Akhmedov A.M., Krupenik V.A., Sveshnikova K.Yu.* 2010. Tolshcha kamennykh soley v razreze paleoproterozoya Onezhskogo progiba Karelii (po dannym Onezhskoy parametricheskoy skvazhiny) [Rock salt thickness in the Paleoproterozoic section of the Onega trough of Karelia (according to data from the Onega parametric well)]. Dokl. RAN. 435(2):230–233. (in Russian)
- Sergeeva N.D., Puchkov V.N., Karaseva T.V.* 2021. Verkhniy proterozoy (rifey i vend) Volgo-Uralskoy oblasti v parametricheskikh i glubokikh skvazhinakh [Upper Proterozoic (Riphean and Vendian) of the Volga-Ural region in parametric and deep wells]. Ufa, Kniga-Print, p. 196. (in Russian)
- Sonnenfeld P.* 1989. Brines and evaporites. Washington D.C. American Geophysical Union, p. 126.
- Chuvashov B.I.* 1968. Istoriya razvitiya i bionomicheskaya kharakteristika pozdnedevonskogo basseyna na zapadnom sklone Srednego i Yuzhnogo Urala [Development History and Bionomic Characteristics of the Late Devonian Basin on the Western Slope of the Middle and Southern Urals]. Nauka, p. 132. (in Russian)
- Chumakov N.M.* 2015. Oledeneniya Zemli: Istoriya, stratigraficheskoe znachenie i rol v biosfere [Glaciations of the Earth: History, Stratigraphic Significance, and Role in the Biosphere]. In: Trudy Geologicheskogo instituta. Nauka, p. 160. (in Russian)
- Bartley Ju.K., Kah L.C., McWilliams Ju.L., Stagner A.F.* 2007. Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle Riphean type section (Avzyan Formation, Southern Urals, Russia): Signal recovery in a fold-and-thrust belt. Chem. Geol. 237:211–232.
- Chen C., Lu A., Cai K., Zhai Yu.* 2002. Sedimentary characteristics of Mg-rich carbonate formations and minerogenic fluids of magnesite and talc occurrences in early Proterozoic in eastern Liaoning Province, China. Science In China (Series B). 45:84–94.
- Grotzinger J.P., Kasting J.F.* 1993. New constraints on Precambrian Ocean composition. J. Geol. 101:235–243.
- Guo Q., Strauss H., Kaufman A.J., Schröder S., Gutzmer J., Wing B., Baker M.A., Bekker A., Jin Q., Kim S-T., Farquhar J.* 2009. Reconstructing Earth's surface oxidation across the Archean-Proterozoic transition. Geology. 37:399–402.
- Kah L.C., Lyons T.W., Chesley J.T.* 2001. Geochemistry of a 1.2 Ga carbonate-evaporite succession, northern Baffin and Bylot Islands: implications for Mesoproterozoic marine evolution. Precambrian Research. 111(1-4):203–234.
- Melezhik V.A., Fallick A.E., Medvedev P.V., Makarikhin V.V.,* 2001. Palaeoproterozoic magnesite: lithological and isotopic evidence for playa/sabkha environments. Sedimentology. 48:379–397.
- McCaffrey M.A., Lazar B., Holland H.D.* 1987. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br⁻ and K⁺ with halite. J. Sedim. Petrol. 57(5):928 – 937.
- Prochaska W., Krupenin M.T.* 2013. Evidence of Inclusion Fluid Chemistry for the Formation of Magnesite and Siderite Deposits in the Southern Urals. Mineral. Petrol. 107(1):53–65.
- Rasmussen B., Bekker A., Fletcher I.R.* 2013. Correlation of Paleoproterozoic glaciations based on U–Pb zircon ages for tuff beds in the Transvaal and Huronian Supergroups. Earth and Planetary Science Letters. 382:173–180.
- Warren J.K.* 2016. Evaporites. A Geological Compendium. Second Edition. Springer International Publishing. Switzerland, p. 1822.
- Wright D. T., Kirkham A.* 2010. The role of bacterial sulphate reduction in carbonate replacement of vanished evaporites: examples from the Holocene, Jurassic and Neoproterozoic // SP43 - Quaternary carbonate and evaporite sedimentary facies and their ancient analogues. Christopher G. St C. Kendall, Abdulrahman Alsharhan (Eds). Wiley, pp. 362-379.