

ЭТАПЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ РИФЕЯ СТРАТОТИПИЧЕСКОЙ МЕСТНОСТИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ) И ИХ ОТРАЖЕНИЕ В МИНЕРАГЕНИИ

© 2024 г. М. Т. Крупенин

Современная структура Башкирского мегантиклинория была сформирована в результате вовлечения мощной толщи докембрийско-палеозойских отложений Восточно-Европейской платформы (суммарной мощностью более 20 км) в герцинский Уральский ороген (карбон–пермь). В рифее территория БМА представляла собой область длительного платформенного дискретного прогибания и эволюционировала как последовательность интракратонных рифтовых и надрифтовых осадочных бассейнов в раннем и среднем рифее, формируя долгоживущую Приуральскую впадину. В верхнем рифее бассейн трансформировался в перикратонную впадину типа пассивной окраины, осадконакопление в которой периодически прерывалось (перерывы миньяр, ук), в том числе в связи с рифтогенезом (аршиний). Метод тектонического анализа мощностей позволил рассчитать длительность седиментации отложений бурзяния, соответствующую времени накопления отложений по данным геохронологии (370 млн лет); в юрматинии существовал длительный (до 150 млн лет) перерыв осадконакопления перед каратавием. Длительность накопления эвапоритовых доломитов в бурзянии составила около 150 млн лет, что значительно больше юрматинии (40 млн лет). Следовательно, основной объем высоко-Mg рассолов, захороненных в породах бурзяния, мог быть источником флюида для масштабного формирования магнетитов на рифтогенном машакском этапе. Приуральская надрифтовая впадина имеет характерную минерагению, обусловленную наличием эпизодов эвапоритовой седиментации и этапов рифтогенной активизации, с широким развитием в терригенно-карбонатных комплексах масштабных проявлений Mg-Fe метасоматоза, сформировавших Южно-Уральскую магнетитовую провинцию и крупнейшие сидеритовые месторождения, барит-полиметаллическую и флюоритовую минерализацию. Разработаны модели термально-рассольного формирования месторождений Mg-Fe метасоматических карбонатов (магнетита, сидерита) в рифейской долгоживущей надрифтовой впадине. Предполагается сходство условий формирования различных надрифтовых впадин с эвапоритами и Fe-Mg метасоматитами (Приуральская, Енисейского кряжа, Восточно-Китайская, Центрально-Европейская).

Ключевые слова: рифей, Башкирский мегантиклинорий, надрифтовый осадочный бассейн, эвапоритовый рассол, Fe-Mg метасоматиты

ВВЕДЕНИЕ

Осадочные образования в Башкирском мегантиклинории (БМА) слагают три структурных этажа: архейско-нижнепротерозойский, рифейский и венд-палеозойский, разделенные стратиграфическими и угловыми несогласиями. Согласно структурному районированию, предложенному В.Н. Пучковым [2010], рифейские отложения западного склона Южного Урала принадлежат восточной части Волго-Уральской области Восточно-Европейской платформы (в протерозое – палеоконтинент Балтика) и относятся к *Приуральской перикратонной впадине*, обнаженной в складчатой структуре Башкирского мегантиклинория. Рифейские отложения БМА прослеживаются на глубине по данным сейсмопрофилей и многих параметрических скважин в Волго-Уральской области, где они слагают систему авлакогенов, из которых наиболее близко к БМА по широте расположен Камско-

Бельский (рис. 1). Анализ геодинамической позиции, архитектуры строения, палеогеографии рифейских отложений БМА позволил нам рассматривать часть из них в составе *рифейской долгоживущей Приуральской надрифтовой впадины* [Крупенин, 2023; и др.].

Типовой разрез рифейской эонотемы в западной и центральной частях БМА является крупным стратиграфическим подразделением верхней части протерозойской акротемы продолжительностью около 1 млрд лет (1650–600 млн лет [Стратиграфический кодекс..., 2019]. По современным данным, основание рифея понижается до 1750 млн лет [Краснобаев и др., 2013]). В Международной стратиграфической шкале докембрия [www.stratigraphy.org/chart] рифейская эонотема сопоставляется с мезопротерозоем и частью неопротерозоя, даже палеопротерозоя. На севере БМА рифейские отложения перекрывают гранитогнейсовые образования тараташского метаморфического комплекса, который “является

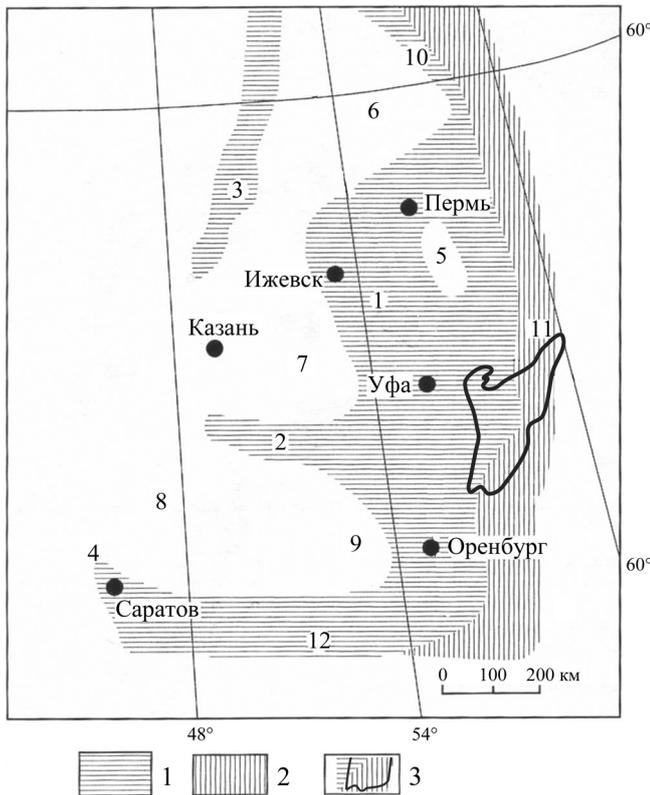


Рис. 1. Схема структурного районирования Волго-Уральской области по рифейскому структурному этажу [Пучков, 2010].

1 – области развития рифейских отложений; 2 – площади распространения рифейских отложений, подвергшихся складчатости и частично метаморфизму в венде; 3 – контур современных границ Башкирского мегантиклинория;

1–4 – авлакогены: 1 – Камско-Бельский, 2 – Серноводско-Абдулинский, 3 – Кажимский, 4 – Рязанско-Саратовский (Пачелмский); 5 – Красноуфимский выступ; 6–9 – своды: 6 – Прикамский, 7 – Татарский, 8 – Пугачевский, 9 – Оренбургский; 10–12 – докембрийские перикратонные впадины: 10 – Притиманская, 11 – Приуральская, 12 – Прикаспийская.

обломком раннедокембрийского фундамента”, находящимся в аллохтонном залегании [Зоненшайн и др., 1990, с. 103]. Метаморфиты имеют архей-нижнепротерозойский возраст (U-Pb возраст цирконов в интервале 2915–1800 млн лет [Краснобаев, Чередниченко, 2005; и др.]). Время образования бластомилонитов (эксгумация метаморфического комплекса) приходится на средний рифей [Тевелев и др., 2017; и др.]. Отложения рифея имеют мощность 15–17 км и объединяются в три крупные седиментационные серии (эратемы, стратоны) – бурзянскую, юрматинскую и каратаускую [Стратотип рифея..., 1983; и др.]. Рифей несогласно перекрывается терригенным вендом (ашинская серия), завершающим верхний докембрий, который в запад-

ной части БМА несогласно перекрывает отложениями девона. В центральной и восточной частях БМА венд отсутствует, терригенные отложения ордовика залегают на различных стратонах рифея.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Герцинская структура БМА в восточной части испытала также складчато-метаморфические преобразования, связанные с тиманской складчатостью [Пучков, 2010]. Протяженность БМА в меридиональном направлении более 300 км, ширина от 60 до 120 км. С запада мегантиклинорий граничит с Предуральским краевым прогибом и внешней зоной палеозойской складчатости, с северо-востока – с Уфалейским метаморфическим блоком, на востоке (по линии Главного Уральского разлома) – с палеозойскими вулканогенно-терригенными породами Тагило-Магнитогорской зоны, на юго-востоке – с антиклинорием Урал-Тау, на юго-западе и юге – с граувакковым флишем Зилаирского синклинория (синформы, реликтами которой, вероятно, являются Юрюзанская и Тирлянская мульды внутри БМА [Пучков, 2010]). БМА имеет антиклинорное асимметричное строение: в его центральной части расположены наиболее древние отложения. Породы бурзяния омолаживаются (средний, верхний рифей и венд) к западу и востоку, но на востоке эта последовательность редуцирована. Границами между тектоническими структурами БМА служит серия надвигов субмеридионального простирания. По линии Зюраткульско-Караташского разлома выделяются Западная и Восточная подзоны, разделяющие отложения по степени катагенетического преобразования: западнее – глубинный катагенез [Анфимов, 1997], восточнее – метагенез и метаморфизм (от зеленосланцевой до гранулитовой ступеней в белорецком комплексе, в связи с Тиманской складчатостью).

Магматические образования в БМА развиты ограниченно, приурочены в основном к осевой части и восточному крылу. Выделяются дорифейская, рифейско-вендская и ордовикско-пермская эпохи магматизма [Алексеев, 1984], этапы гранитоидного магматизма делятся более подробно [Шардакова, 2016]. Наиболее значимым на территории БМА в верхнем протерозое было машакское рифтогенное событие (1395–1380 млн лет), сопровождавшееся образованием как плутонических (Кусинская интрузия габбро, Бердяшский плутон рапакиви), так и вулканических и субвулканических (машакская свита, рой даек и силлов) образований, рвущих отложения нижнего рифея и входящих в состав плюмсвязанной крупной провинции изверженных пород. При этом ореол действия плюма охватывал часть суперконтинента Нуна-Коламбия [Пучков, 2010; и др.].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ строения и развития Приуральской впадины выполнен на геодинамической основе с выделением этапов образования и развития рифтовых и синеклизных осадочных интракратонных бассейнов, оценки их длительности (с использованием метода мощностей), условий осадконакопления (метод литолого-фациального анализа) и постседиментационных преобразований (стадиальный анализ). Комплекс современных физико-химических методов исследования флюидных включений, минеральных термометров (сидерит-анкерит), данных изучения изотопных систематик ^{13}C , ^{18}O , ^{34}S , D/H, U-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd карбонатных пород, руд и сульфидов использован для оценки параметров среды седиментации и наложенных гидротермально-метасоматических, в том числе рудоносных, процессов преобразования осадочных пород в истории осадочного бассейна. *Осадочный бассейн* понимается как стратифицированное осадочно-породное тело, выполняющее депрессионную палеоструктуру и сформировавшееся в конкретной геодинамической обстановке [Геологический словарь..., 2011].

СТРОЕНИЕ ПРИУРАЛЬСКОЙ НАДРИФТОВОЙ ВПАДИНЫ И ЕЕ СВЯЗЬ С МИНЕРАГЕНИЕЙ

Надрифтовые осадочные бассейны (НОБ) разного возраста широко развиты на кратонах. Они имеют ряд особенностей минерагении, закономерности которой требуют уточнения. Упомянутые бассейны, как правило, состоят из двух частей: относительно узкого линейного рифтового вулканогенно-осадочного бассейна и развитой над ним более широкой, но также мощной депрессии (синеклизы) с терригенно-карбонатным выполнением [Беленицкая, 2007]. В синеклизную стадию скорость прогибания заметно ниже, чем в рифтовую, а площадь и время формирования – гораздо больше. Этим определяется накопление на данной стадии осадочных тел значительной мощности. В геодинамическом ряду осадочных бассейнов НОБ имеет специфическую связь внутренних процессов и глубинных (внешних) плюмсвяванных событий (магматизм, тектонотермальная активизация). Надрифтовые области наиболее благоприятны для появления зон последующих тектонотермальных активизаций в связи со значительной деструкцией сплошности земной коры [Пучков, 2010]. Развитие НОБ зависит в том числе от климата: периоды аридной седиментации могут приводить к накоплению рассольных вод в поровом пространстве нижней части осадочных резервуаров. Рассолы определяют состав катагенетических флюидов в процессах эпигенеза. Также для НОБ характерна длительная сохранность захороненных

бассейновых флюидов. Погруженные и захороненные в поровом пространстве пород рассолы совместно с эндогенным тепловым потоком следующих стадий рифтогенеза/активизации служат главным фактором эпигенетических процессов. Эвапоритовые толщи не только содержат пласты сульфатов и других солей (галогенидов). С контрастными преобразованиями при взаимодействии карбонатных пород с эвапоритовыми рассолами связаны также амагматические залежи полиметаллов, барита, целестина, флюорита, примером которых являются месторождения типа долины р. Миссисипи (MVT). Нами к этому списку объектов добавляются Mg-Fe метасоматиты в составе карбонатных пород НОБ: месторождения кристаллического магnezита (МКМ), сидерита в карбонатных толщах древнее мезозоя. Сюда же относятся обширные зоны доломитизации в карбонатных подсолонных комплексах, характеризующиеся высокими коллекторскими свойствами.

Приуральская перикратонная впадина имеет все признаки долгоживущего надрифтового осадочного бассейна и рассматривается нами как Приуральский НОБ или надрифтовая впадина. На западе данная впадина соединялась с Камско-Бельским и Серноводско-Абдулинским авлакогенами (см. рис. 1), занимающими значительную часть верхнедокембрийского чехла Волго-Уральской области, где они погребены под палеозоем, изучены по данным сейсмичности и параметрических скважин. Авлакогены образовали широкие и мощные кратонные депрессии с общей толщиной отложений рифея до 15 км. Приуральская надрифтовая впадина рассматривается в объеме осадочных бассейнов раннего и среднего рифея (рис. 2). Это долгоживущий НОБ, этапы формирования которого состояли из относительно коротких импульсов рифтогенеза с последующим длительным развитием синеклизы и формированием мощного осадочного слоя. Всего выделяются два основных этапа: нижне- и среднерифейский.

Нижнерифейский этап начался импульсом “рассеянного рифтогенеза” [Маслов и др., 2001] с накоплением прибрежно-континентальных вулканогенно-терригенных толщ в айское время (1750 млн лет) и последующим формированием обширного (территория как Приуральской впадины, так и Камско-Бельского авлакогена) субизометричного бассейна “с раздробленным на блоки гетерогенным основанием, сложенным как кристаллическими, так и метаосадочными породами” [Маслов и др., 2001, с. 45]. Далее последовал длительный этап “квазистационарного” развития относительно мелководного эпикратонного осадконакопления в прибрежно-морских и лагунно-морских шельфовых условиях, во время которого сформировался мощный (более 6 км толщиной) терригенно-карбонатный комплекс отложений верхней части

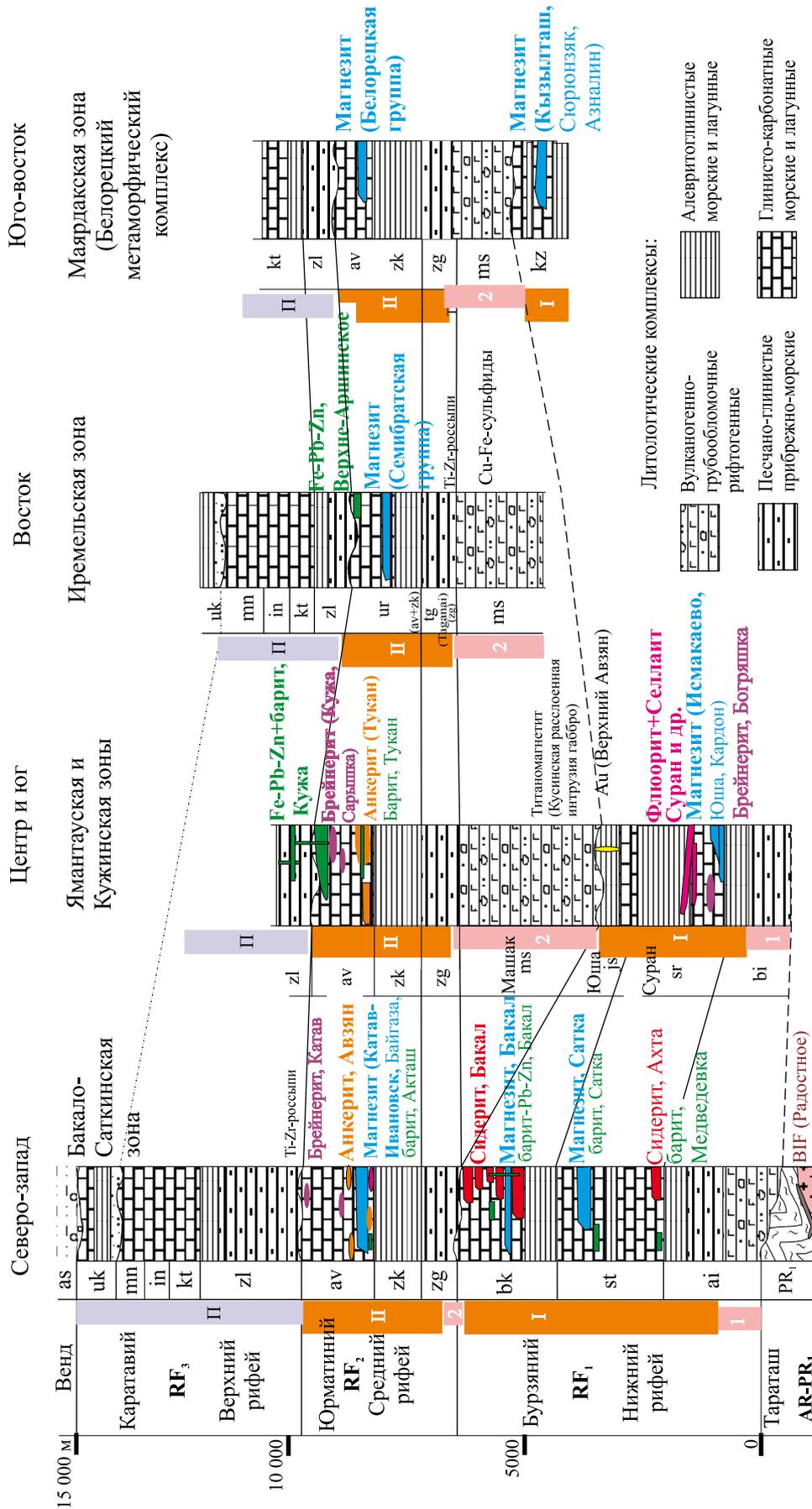


Рис. 2. Типовые разрезы Приуральской впадины в Башкирском магантиклинории (широтное пересечение).

Стадии развития осадочных бассейнов указаны слева от литологических колонок. Импульсы рифтогенной активности: 1 – айский (RF₁ai), 2 – машакский (RF₂ms); синеклизы: 1 – бурзянская, П – юрматинская; П – перикратонный верхнерифейский бассейн (пассивная окраина?); индексы свит: ai – айская, st – саткинская, bk – бакальская, bi – большейсинзерская, sr – суранская, js – юшинская, kz – кзылгашская, ms – машакская, zg – зигальгинская, av – авзянская, av – авзянская, zl – зильмердакская, kt – катавская, in – инзерская, mn – миньярская, uk – укуская.

айской, а также саткинской и бакальской свит бурзяния. Для карбонатных отложений саткинской и бакальской свит сохранились признаки существования эпизодов эвапоритовой седиментации в свитах нижнего (саткинская, бакальская) и среднего (авзянская) рифея, содержащих месторождения магнезита. Литологические признаки представлены горизонтами коллапс-брекчий растворения в доломитовых пластах и псевдоморфозами вторичного доломита по сульфатам. Геохимические признаки отражают высокие концентрации В, F, Cl в породах этих свит [Парначев, 1987], пониженные относительно значений для морской воды отношения Cl/Br, характерные для эвапоритовых рассолов, по данным прецизионного изучения флюидных включений [Prochaska, Krupenin, 2013; и др.].

Рифтогенез среднерифейского этапа после относительно короткого перерыва в осадконакоплении начался в машакское время (1380 млн лет) с образования линейного трога (мощность до 3 км) с контрастным вулканогенным и терригенным выполнением [Пучков, 2010]. В развитии последующей синеклизы с мощностью отложений до 3–5 км, превышающую по площади размеры БМА, преобладали морские мелководные, реже лагунные обстановки, а в конце данного этапа отмечены признаки эвапоритовых условий (эвапоритовые доломиты). После длительного перерыва в седиментации, связанного со сменой тектонического режима, осадконакопление продолжилось в верхнерифейском бассейне, вероятно представлявшим собой пассивную окраину палеоконтинента Балтика с мелководно-морским терригенно-карбонатным накоплением. В течение перерыва перед началом верхнего рифея эта часть территории Балтики испытала импульсы растяжения на фоне завершения гренвильской орогении [Shumlyanskyu et al., 2023].

На основе метода тектонического анализа мощностей [Гарецкий, Яншин, 1960; Сеславинский, 1984] выполнены расчеты длительности накопления отложений бурзяния и юрматиния. Применением данного метода наиболее корректна для полностью компенсированных относительно мелководных отложений шельфа без видимых перерывов в осадконакоплении. Детальные литолого-фациальные исследования рифея Южного Урала подтвердили условия осадконакопления в шельфовом бассейне [Маслов и др., 2001; и др.]. Метод основан на оценочных величинах скоростей накопления отложений различного литологического состава на базе обработки огромного массива литературных данных. Расчеты являются приближенными, что обусловлено как особенностями методики, так и использованием наших собственных фациальных интерпретаций. Расчетное значение длительности накопления отложений бурзяния составляет 369 млн лет при известной его длительности по данным геохронологии 370 млн лет [Семи-

хатов и др., 2015]. Подобным образом рассчитанное время седиментации в среднем рифее составляет 201 млн лет, что заметно короче интервала геологического времени, в течение которого должны были накапливаться отложения среднего рифея в соответствии со стратиграфической шкалой: граница между юрматинием и каратавием проводится на 1030 млн лет [Общая стратиграфическая..., 2019]). По имеющимся данным возраста самых молодых детритовых цирконов, накопление отложений каратавия началось с аркозовых песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты не позднее 964 млн лет назад [Маслов и др., 2018], соответственно между накоплением отложений юрматиния и каратавия существовал длительный, порядка 150 млн лет, период континентального развития. С ним были сопряжены тектонические перестройки, оказавшие влияние не только на смену тектонического стиля осадконакопления в верхнем рифее, но и на флюидную миграцию в отложениях всей Приуральской надрифтовой впадины, имеющей к тому времени мощность от 10 до 13 км. Не ясно, был ли этот перерыв связан с рифтогенезом, магматические образования этого возраста не обнаружены, но неоднократные термальные активизации в этот промежуток времени, имеющие геохронологическое подтверждение, сыграли важную минерагеническую роль [Крупенин и др., 2016, 2021]. Кроме того, на рубеже RF₂–RF₃ резко увеличиваются значения эpsilon Nd в терригенных отложениях зильмердакской свиты каратавия, что указывает на появление ювенильных источников в области сноса [Маслов и др., 2022].

Анализ соотношения средних мощностей по типам пород для бурзяния показывает последовательное нарастание от базальтов к обломочным породам (конгломераты и песчаники) и далее к сланцам и карбонатам в соотношении 1–10–40–49%. Грубообломочные и алевритоглинистые породы количественно сопоставимы с карбонатными (49 и 50%), и их мощности составляют соответственно 700, 2600 и 3200 м. В самих карбонатных породах бурзяния прослой раннедиагенетических стратифицированных эвапоритовых доломитов [Крупенин, 2018; и др.] преобладают над известняками (в соотношении 72 и 28%). Карбонатные породы развиты в средней и верхней частях разреза бурзяния, и в их составе доломиты в значительной мере слагают саткинскую свиту (около 2200 м). Доломитовый прослой до 100 м прослеживается и в разрезе бакальской свиты. Таким образом, высокая доля эвапоритовых карбонатных пород в разрезе бурзяния отражает длительные периоды существования аридных условий на протяжении раннего рифея (1750–1380 млн лет). В карбонатных породах юрматиния соотношение эвапоритовых доломитов и известняков равно (по 9% от общей совокупности пород). В юрматинии эвапоритовые от-

ложения были приурочены к верхней части разреза, где в верхах авзянской свиты развиты пестроцветные сланцы куткурской и тюльменской подсвит и пласт реветских доломитов мощностью более 500 м с признаками былого присутствия эвапоритовых минералов. Вероятно, в юрматинии аридные условия занимали значительно меньший промежуток геологического времени, чем в бурзянии: расчетная длительность накопления эвапоритовых доломитов в бурзянии и юрматинии составляет соответственно около 150 и 40 млн лет.

О ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭПИЗОДОВ ЭВАПОРИТОВОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ В ПРОТЕРОЗОЕ

Анализ отложений протерозоя разных регионов мира позволил установить, что в истории Земли существовал длительный этап без оледенений в интервале 2.20–0.72 млрд лет [Rasmussen et al., 2013]. Для этого периода характерны преобладание доломитов среди карбонатных пород, первое появление толщ сульфатов (пласты ангидрита в формации Дойчланд, кратон Каапваль в Южной Африке) на уровне 2.3 млрд лет [Buchanan et al., 1981; Yudovskaya et al., 2018], даже совместное нахождение пластов галита и ангидрита в терригенно-доломитовых отложениях (туломозерская свита ятулия в Карелии) на уровне 1.9 млрд лет [Морозов и др., 2010], а также более широкое распространение пластовых ангидритов начиная с 1.2 млрд лет [Kah et al., 2001; Guo et al., 2009; и др.]. Экспансия сульфатных отложений в протерозое связывается с постепенной оксигенизацией аноксического океана, которая начиналась с мелководно-морских отложений шельфа [Stüeken et al., 2021; и др.]. На широкое развитие сульфатно-доломитовых пород в этом возрастном интервале указывают многочисленные доломитовые псевдоморфозы по сульфатам, а также горизонты брекчий обрушения. Они образовались при диагенетическом растворении сульфатов в результате биосульфатредукции во вмещающих доломитах. Типичным примером таких отложений являются пласты диагенетических доломитов в саткинской и бакальской свитах бурзяния в типовом разрезе рифея на Южном Урале [Крупенин, 2018]. Эти особенности осадконакопления позволяют предполагать, что часть палеопротерозоя, мезопротерозой и первая половина неопротерозоя представляли собой хронологически весьма длительный отрезок геологической истории, суммарно около 1.5 млрд лет [Чумаков, 2015], с широким проявлением неактуалистических обстановок распространения на кратонах крупных мелководных морей в условиях теплого климата [Крупенин, Дуб, 2023] и широким проявлением эвапоритовых отложений. Аналогичные обстановки седиментации в обширных мелководных надплатформенных морях во время дли-

тельных периодов теплого климата известны также и для фанерозоя [Warren, 2016]. Для теплых периодов в результате таяния полярных шапок существенно повышался уровень океана, морские условия, в том числе эвапоритовые обстановки, занимали значительную площадь древних платформ по сравнению с современным климатом межледниковья, когда эвапоритовые бассейны приурочены только к узким зонам прибрежных лагун. В частности, обширные, протяженностью в сотни километров, мелководные надплатформенные моря со сменой фаций от известняков до ангидритов в центре бассейна описаны В.Г. Кузнецовым [2019] для пермского бассейна Волго-Уральской области.

МИНЕРАГЕНИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА ПРИУРАЛЬСКОЙ НАДРИФТОВОЙ ВПАДИНЫ

Минерагеническая специфика крупных интракратонных бассейнов с участием эвапоритов определяется возможностью захоронения в них огромных объемов высокомагнезиальных рассолов, которые могут сохраняться сотни миллионов лет. В случае с Приуральской впадиной сохранение рассолов в недрах предполагается до 400 млн лет (Бакальское рудное поле [Крупенин и др., 2021]). В зонах рифтогенной активизации (восстановительная среда, подогрев вмещающих карбонатных отложений) с участием рассолов возможно образование метасоматических магнезитов. Показательным примером является Саткинская группа месторождений, где добывается основное количество магнезита в России. С процессами эволюции захороненных рассолов связывается также формирование Fe-Mg карбонатных метасоматитов (брейнерита, сидероплезита), барит-полиметаллических руд и флюоритов (см. рис. 2). Неметаморфизованные отложения рифейской Приуральской долгоживущей надрифтовой впадины, содержащие крупные месторождения Южно-Уральской магнезитовой провинции и крупнейшие в мире скопления сидеритовых руд в Бакальском рудном поле, выступают удобным полигоном для разработки *генетических моделей термально-рассольного рудообразования*.

Месторождения приурочены к карбонатным отложениям и связаны с образованием (в седиментогенезе), захоронением (в литогенезе) и миграцией агрессивных рассолов на рифтогенных этапах в мезопротерозое. В палеозое рифейские отложения с рудными залежами были вовлечены в состав герцинской структуры Башкирского мегантиклинория на Южном Урале. Последующие тектонотермальные активизации территории в конце позднего рифея и венде (неопротерозой) привели к незначительной ремобилизации указанных месторождений. Палеозойский этап развития Уральско-го складчатого пояса слабо отразился на минера-

гении региона, поскольку осадочные толщи исчерпали ресурсы флюидогенерации. Последовательность появления карбонатных метасоматитов предполагает эволюцию захороненных рассолов с образованием из Mg-рассолов сначала низко-Fe высококачественных магнезитов, затем формирование Fe-Mg флюидов и образование Fe-магнезитов, брейнеритов и, наконец, Mg-Fe флюидов, послуживших агентом для отложения сидеритов [Крупенин, 2023; и др.].

СВЯЗЬ ИСТОЧНИКОВ РУДНОГО ВЕЩЕСТВА С РАССОЛАМИ (ИСТОЧНИК Mg-ФЛЮИДОВ)

Дивергентный режим способствовал как значительно повышению проницаемости осадочных пород за счет разуплотнения земной коры в зоне рифтинга и возрастанию миграции поровых вод в отложениях бурзiania из-за возникающих градиентов давления, так и увеличению теплового потока и прогрева вмещающих осадочных пород. Широкое развитие эвапоритов в отложениях бурзiania определило важную роль Mg-рассолов в формировании эпигенетических флюидов. Их активная миграция и нагрев в рифтовой зоне создали благоприятные условия для возникновения на первом этапе магнезитовых месторождений, в том числе крупнейших и высококачественных магнезитовых – саткинских, а также бакальских [Крупенин, Кольцов, 2017].

Месторождения кристаллического магнезита в карбонатных толщах Приуральского НОБ образуют крупную Южно-Уральскую провинцию. Среди МКМ по особенностям структур, химического состава, набору некарбонатных минералов и зональности залежей нами выделено два подтипа – саткинский (I) и исмакаевско-семибратский (II). МКМ первого подтипа формировались при миграции в толщах эвапоритовых доломитов бурзiania магнезиального рассольного флюида, нагретого в ходе машакского рифтогенного события (1380 млн лет) до ~250°C с образованием пластообразных залежей, сложенных магнезитом со стрелчатой крупнокристаллической структурой. МКМ второго подтипа образуют залежи сложной формы мелкокристаллического гранобластового магнезита и сформированы при внедрении в известняки бурзiania и юрматиния Fe-Mg рассолов, испытавших катагенетическое взаимодействие с глинистыми толщами и нагретых до ~220°C на этапе тектонотермальной активизации в авзянское время (~1250 млн лет). Параметры Mg-метасоматоза захороненных рассолов по карбонатному протолисту верифицированы методами численного физико-химического моделирования [Крупенин, Кольцов, 2017], что позволило уточнить ограничения по температуре, кинетике флюидной миграции и редокс-потенциалу среды рудоотложения.

ИСТОЧНИК ЖЕЛЕЗА ДЛЯ РАССОЛЬНОГО ФЛЮИДА

Железо для формирования метасоматических Fe-карбонатов извлекалось рассолами из терригенно-глинистых вмещающих пород в результате катионного обмена с Mg^{2+} при длительном взаимодействии в катагенезе. Хлоридный рассол при термодинамических параметрах катагенеза (или рифтогенном подогреве) является мощным катализатором экстракции металлов из вмещающих терригенно-глинистых пород в породных бассейнах. Рудообразование явилось результатом метасоматического замещения известняков (протолит) при миграции захороненных эвапоритовых рассолов, нагретых на тектонотермальных этапах и поступающих из глубокопогруженных участков надрифтового бассейна.

Инверсия тектонического режима и длительный период высокого стояния кратона на послевзянском-предзильмердакском этапе сопровождались процессами неоднократной тектонотермальной активизации в отложениях бурзiania и юрматиния. Активной миграции флюидов в мощной слоистой осадочной толще способствовало чередование терригенных и карбонатных пород. С указанным перерывом, согласно имеющимся данным, связаны, вероятно, два отдельных этапа активизации. Первый проявлен в конце авзянского времени в виде седиментационно-эксгальсионного барит-полиметаллического оруденения (SEDEX) и представлен многочисленными проявлениями, а также Верхне-Аршинским и Кужинским месторождениями на возрастном интервале завершения осадконакопления в авзянское время (порядка 1200 млн лет назад). По времени проявления к этому этапу привязано и формирование флюоритовой минерализации в карбонатных породах суранской свиты бурзiania, в том числе Суранского месторождения (~1230 млн лет [Крупенин и др., 2012]). С этим же этапом связаны Fe-магнезиты, брейнериты, в том числе крупного Исмакаевского МКМ, сформированные по данным Sm-Nd систематики на уровне 1250–1200 млн лет [Крупенин и др., 2016]. Следующий этап характеризует образование крупнейшего в мире скопления сидеритов Бакальских месторождений (порядка 1000 млн лет назад [Крупенин и др., 2021]). Логично предположить, что и многочисленные гидротермально-метасоматические Mg-Fe карбонатные залежи (анкериты) также были сформированы в это время. Как показывает изучение флюидных включений в карбонатных метасоматитах [Крупенин и др., 2013; и др.], все указанные минерогенетические объекты генетически связаны с эвапоритовыми рассолами и их эволюцией в результате взаимодействия с различными породами надрифтогенного бассейна. Флюориты формировались при взаимодействии эвапоритовых рас-

солов с гранитоидами в зоне машакского рифта. Mg-Fe карбонаты метасоматически отложились при миграции захороненных рассолов (состав которых эволюционировал с высоко-Mg на Fe-Mg и Mg-Fe за счет экстракции железа при взаимодействии агрессивных хлоридных рассолов с терригенными породами).

Месторождения гидротермально-метасоматического сидерита Бакальской группы, как показали комплексные исследования флюидных включений и изотопно-геохимические данные, образованы при внедрении в известняки одноименной свиты Mg-Fe рудоносных растворов, на предзильмердакском этапе (~1000 млн лет [Крупенин и др., 2021]) тектонотермальной активизации в надрифтовом бассейне в западном борту Машакского грабена. Растворы были сформированы из захороненных рассолов, испытавших длительное взаимодействие с терригенными породами в глубоких горизонтах грабена. При Mg-Fe метасоматозе по известняковому протолиту возникала зональность: доломит-анкерит-сидерит при температурах преобразований в центральной части Бакальского рудного поля до 250–270°C, в периферической – около 190–220°C.

Замещение магния железом при взаимодействии флюид-порода является общей закономерностью эволюции состава флюидов в земной коре [Kharaka, Thordsen, 1992; и др.]. В катагенезе высоким потенциалом к выщелачиванию металлов (в том числе железа) из терригенных отложений обладают хлоридные рассолы [Savard et al., 1998; и др.]. По результатам экспериментов и обработке обширной базы данных состава геотермальных рассолов, осадочных пластовых вод, флюидов из магматических и метаморфических пород и флюидных включений соотношение металл/хлорид в редокс-условиях недр возрастает на 5 порядков при повышении температуры рассольного флюида в интервале 60–400°C [Yardley, Bodnar, 2014]. Взаимодействие флюидов с песчано-глинистыми породами приводит к увеличению доли радиогенного стронция и уменьшению доли радиогенного неодима в растворах [Кузнецов и др., 2005; Крупенин и др., 2016, 2021]. Эволюция рассольного флюида в надрифтовом осадочном бассейне приводит к повышению его геохимической зрелости, что иллюстрируется изотопными данными углерода, кислорода, Sr-Nd систематики в соответствии с рудными этапами формирования Mg-Fe метасоматических карбонатов.

ВЫВОДЫ

Месторождения Mg-Fe метасоматитов в карбонатных толщах типового разреза рифея формировались в позднем протерозое в долгоживущей Приуральской надрифтовой впадине в пределах палео-

континента Балтика. Рудоносные процессы приурочены к трем этапам термально-рассольной активизации: I – Машакский (1400–1350 млн лет) – магнетиты Саткинского и Бакальского рудных полей, плюмсвященный этап; II – Авзянский (1250–1200 млн лет) – Fe-магнетиты, флюориты, барит и полиметаллы, амагматичный этап; III – Предзильмердакский (1000–950 млн лет) – сидериты Бакальского рудного поля (анкериты, гематит?), амагматичный этап [Крупенин, 2023]. С палеозойской линейной складчатостью они не связаны.

В получении новых данных по определению возраста и источников рудоносных флюидов для многочисленных изученных объектов Mg-Fe метасоматических залежей, в том числе крупнейших месторождений, неоценимую роль сыграло долговременное сотрудничество с чл.-корр. РАН А.Б. Кузнецовым и коллегами из лаборатории изотопной хемотратиграфии и геохронологии ИГГД РАН (Санкт-Петербург), проф. В. Прохаской (Горный университет Леобена, Австрия), а также ЦКП ИГГ УрО РАН.

Работа выполнена в рамках темы № 123011800013-6 государственного задания ИГГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.А.* Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. М.: Наука, 1984. 136 с.
- Анфимов Л.В.* Литогенез в рифейских осадочных толщах Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1997. 288 с.
- Беленицкая Г.А.* Опыт мелкомасштабного литогеодинимического районирования и картирования осадочного чехла территории России // Литосфера. 2007. № 5. С. 3–37.
- Гарецкий Р.Г., Янишин А.Л.* Тектонический анализ мощностей // Методы изучения тектонических структур. Вып. 1. М.: АН СССР, 1960. С. 115–333.
- Геологический словарь: в 3 т.: 3-е изд., перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. Т. 2. К–П. СПб.: ВСЕГЕИ, 2011. 480 с.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М.* Тектоника литосферных плит территории СССР. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 328 с.
- Краснобаев А.А., Пучков В.Н., Козлов В.И., Сергеева Н.Д., Бушарина С.В., Лепехина Е.Н.* Цирконология навьшских вулканитов айской свиты и проблема возраста нижней границы рифея на Южном Урале // Докл. АН. 2013. Т. 448. № 4. С. 437–442.
- Краснобаев А.А., Чердиченко Н.В.* Цирконовый архей Урала // Докл. АН. 2005. Т. 400. № 4. С. 510–514.
- Крупенин М.Т.* Коллапс-брекчии как признак бывшего присутствия эвапоритов (саткинская свита нижнего рифея, Южный Урал) // Вестн. Перм. ун-та. Геология. 2018. Т. 17. № 4. С. 342–358.
- Крупенин М.Т.* Эволюция состава Mg-Fe карбонатных метасоматитов в надрифтовых осадочных бассейнах (к проблеме месторождений кристаллического маг-

- незита и сидерита в карбонатных толщах) // Литогенез и минерагения осадочных комплексов докембрия и фанерозоя Евразии / Мат-лы X Междунар. совещ. по литологии. Воронеж: ВГУ, 2023. С. 192–196.
- Крупенин М.Т., Гараева А.А., Клюкин Ю.И., Балтыбаев Ш.К., Кузнецов А.Б. Флюидный режим магнетитового метасоматоза на Саткинских месторождениях Южно-Уральской провинции (термокриометрия флюидных включений) // Литосфера. 2013. № 2. С. 120–134.
- Крупенин М.Т., Дуб С.А. Неактуалистические обстановки седиментации в мезопротерозойских бассейнах: особенности климата и минерагении // Стратиграфия докембрия: проблемы и пути решения / Мат-лы VIII Рос. конф. по проблемам геологии докембрия. СПб.: Свое издательство, 2023. С. 80–83.
- Крупенин М.Т., Кольцов А.Б. Геологическое строение, состав и физико-химическая модель образования месторождений кристаллического магнетита Южного Урала // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 1. С. 17–40.
- Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В. Сравнительная Sr-Nd систематика и распределение РЗЭ в типовых магнетитовых месторождениях нижнего рифея Южно-Уральской провинции // Литосфера. 2016. № 5. С. 58–80.
- Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Червяковская М.В., Гуляева Т.Я., Константинова Г.В. Источник рудных флюидов и Sm-Nd возраст сидеритов крупнейшего Бакальского месторождения, Южный Урал // Геология руд. месторождений. 2021. Т. 63. № 4. С. 334–363.
- Крупенин М.Т., Прохаска В., Ронкин Ю.Л. Стадийность образования флюоритов месторождения Суран (Башкирский мегантиклинорий) по данным изучения лантаноидов, флюидных включений и Sr-Nd систематики // Литосфера. 2012. № 5. С. 126–144.
- Кузнецов А.Б., Крупенин М.Т., Овчинникова Г.В., Горохов И.М., Маслов А.В., Каурова О.К., Эльмис Р. Формирование и преобразование карбонатных пород и сидеритовых руд бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал): Sr-изотопная характеристика и Pb-Pb возраст // Литология и полез. ископаемые. 2005. № 3. С. 227–249.
- Кузнецов В.Г. Значение изучения эволюции осадочного породообразования в истории Земли для реконструкции изменений геохимических обстановок поверхности // Изв. вузов. Геология и разведка. 2019. № 2. С. 27–34.
- Маслов А.В., Ерохин Е.В., Гердес А., Ронкин Ю.Л., Иванов К.С. Первые результаты U-Pb LA-ICP-MS-изотопного датирования обломочных цирконов из аркозовых песчаников бирьянской подсвиты зильмердакской свиты верхнего рифея (Южный Урал) // Докл. АН. 2018. Т. 482. № 5. С. 558–561.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфимов Л.В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерагения, геологические памятники природы). Т. 1. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 351 с.
- Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Крамчианов А.Ю., Шпакович Л.В., Гареев Э.З., Подковыров В.Н., Ковалев С.Г. Источники сноса верхнедокембрийских глинистых пород Южного Урала: результаты геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2022. Т. 30. № 1. С. 33–54.
- Морозов А.Ф., Хахаев Б.Н., Петров О.В., Горбачев В.И., Тарханов Г.В., Цветков Л.Д. Общая стратиграфическая (геохронологическая) шкала фанерозоя и докембрия. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019.
- Парначев В.П. Фтор и хлор в позднедокембрийских осадочных породах Башкирского мегантиклинория в связи с вопросами их седиментации // Геохимия вулканических и осадочных пород Южного Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. С. 35–46.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16–27.
- Сеславинский К.Б. Скорости осадконакопления и состав отложений. Ст. 2. // Бюл. МОИП. Отд. геологии. 1984. Т. 59. № 3. С. 22–31.
- Стратиграфический кодекс России: 3-е изд., испр. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
- Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология / Под ред. Б.М. Келлера, Н.М. Чумакова. М.: Наука, 1983. 184 с.
- Тевелев А.В., Тевелев Арк.В., Федорчук В.А., Хотылев А.О., Кошелева И.А. Тараташский индентор и его роль в строении Урала // Вестн. Моск. ун-та. Геология. 2017. № 1. С. 3–12.
- Чумаков Н.М. Оледенения Земли: история, стратиграфическое значение и роль в биосфере. М.: ГЕОС, 2015. 160 с. (Тр. Геол. ин-та. Вып. 611).
- Шардакова Г.Ю. Геохимические особенности и изотопный возраст гранитоидов Башкирского мегантиклинория – свидетельства импульсов эндогенной активности в зоне сочленения Уральского орогена с Восточно-Европейской платформой // Геохимия. 2016. № 7. С. 607–622.
- Buchanan D.L., Nolan J., Suddaby P., Rouse J.E., Viljoen M.J., Davenport W.J. The genesis of sulfide mineralization in a portion of the Potgietersrus Limb of the Bushveld Complex // Econ. Geol. 1981. V. 76. P. 568–579.
- 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. V. 37. P. 399–402.
- 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 Res. 2001. V. 111. No. 1–4. P. 203–234.
- Kharaka Y.K., Thordsen J.J. Stable isotope geochemistry and origin of waters in sedimentary basins // Isotopic Signatures and Sedimentary Records: Lecture Notes in Earth Sciences. V. 47 / Ed. by S. Chaudhuri, N. Clauer. Berlin: Springer Verlag, 1992. P. 411–466.
- Prochaska W., Krupenin M.T. Formation of magnesite and siderite deposits in the Southern Urals – evidence of in-

- clusion fluid chemistry // *Mineral. Petrol.* 2013. V. 107. No. 1. P. 53–65.
- 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 Planet. Sci. Lett.* 2013. V. 382. P. 173–180.
- Savard M.M., Sangster D.F., Burt M.D. Isotope geochemistry of sideritized host rocks, Walton Ba deposit, Kennebec sub-basin, Nova Scotia, Canada // *Econ. Geol.* 1998. V. 93. No. 6. P. 834–844.
- Shumlyansky L., Bekker A., Tarasko I., Francovschi I., Wilde S.A., Melnychuk V. Detrital Zircon Geochronology of the Volyn-Orsha Sedimentary Basin in Western Ukraine: Implications for the Meso-Neoproterozoic History of Baltica and Possible Link to Amazonia and the Grenvillian–Sveconorwegian–Sunsas Orogenic Belts // *Geosciences*. 2023. V. 13. P. 152.
- Stüeken E.E., Kuznetsov A.B., Vasilyeva I.M., Krupenin M.T., Bekker A. Transient deep-water oxygenation recorded by rare Mesoproterozoic phosphorites, South Urals // *Precambrian Res.* 2021. V. 360. No. 15. P. 106242.
- Warren J.K. *Evaporites* // *A Geological Compendium*. Switzerland: Springer Int. Publ., 2016. 1822 p.
- Yardley W.D., Bodnar R.J. Fluids in the Continental Crust // *Geochem. Perspectives*. 2014. V. 3. No. 1. P. 1–127.
- Yudovskaya M.A., Sluzhenikin S.F., Costin G., Shatagin K.N., Dubinina E.O., Grobler D.F., Ueckermann H., Kinnaird A. Anhydrite Assimilation by Ultramafic Melts of the Bushveld Complex, and Its Consequences to Petrology and Mineralization // *Soc. Econom. Geol., Inc. SEG. Spec. Publ.* 2018. No. 21. P. 177–206.

THE STAGES OF GEOLOGICAL DEVELOPMENT OF SEDIMENTARY BASINS OF THE RIPHEAN STRATOTYPE AREA (SOUTHERN URALS) AND THEIR REFLECTION IN MINERAGENY

M. T. Krupenin

The modern structure of the Bashkir meganticlinorium (BMA) has been formed as a result of the involvement of a thick sequence of Precambrian-Paleozoic deposits of the East-European Platform (with a total thickness of more than 20 km) in the Hercynian Ural Orogen (Carboniferous-Permian). In the Riphean, the BMA territory was an area of a long-term platform discrete subsidence and evolved as a sequence of intracratonic rift and supra-rift sedimentary basins in the Early and Middle Riphean, forming the long-lived Priuralsky Basin. In the Upper Riphean, the basin has been transformed into a pericratonic basin of the passive margin type, sedimentation in which was periodically interrupted (Minyar, Uk breaks), including in connection with rifting (Arshinian). The method of tectonic analysis of thicknesses allowed to calculate the duration of accumulation of Burzyanian deposits, corresponding to the time of accumulation of deposits according to geochronology data (370 Ma); in Yurmatinian there was a long (130 Ma) break in sedimentation before the Karataviian. The duration of accumulation of evaporite dolomites in Burzyanian was about 150 Ma, which is significantly longer than Yurmatinian (40 Ma). Therefore, the main volume of high-Mg brines buried in Burzyanian rocks could have been a source of fluid for large-scale formation of magnesites at the riftogenic Mashak stage. The Priuralskaya supra-rift basin has a characteristic minerageny caused by the presence of episodes of evaporite sedimentation and stages of riftogenic activation, with widespread development in terrigenous-carbonate complexes of large-scale manifestations of Mg-Fe metasomatism, which formed the South Ural magnesite province and the largest siderite deposits, barite-polymetallic and fluorite mineralization. Models of thermal-brine formation of Mg-Fe metasomatic carbonate deposits (magnesite, siderite) in the Riphean long-lived supra-rift basin have been developed. Similarity of the formation conditions of various supra-rift basins with evaporites and Fe-Mg metasomatites is assumed (Priuralskaya, Yenisei Ridge, East-Chinese, Central European).

Keywords: *Riphean, Bashkir meganticlinorium, supra-rift sedimentary basin, evaporite brine, Fe-Mg metasomatites*

Для цитирования: Крупенин М.Т. Этапы геологического развития осадочных бассейнов рифея стратотипической местности (Южный Урал) и их отражение в минерагении // *Труды ИГГ УрО РАН*. 2024. Вып. 168. С. 27–36. <https://doi.org/10.24930/0371-7291-2024-168-27-36>