

МОДЕЛЬ МЕТАСОМАТИЧЕСКОГО МАГНЕЗИТООБРАЗОВАНИЯ В САТКИНСКОМ РУДНОМ ПОЛЕ В СВЯЗИ С РИФТОГЕННЫМ ПОДОГРЕВОМ ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНЫХ ЭВАПОРИТОВЫХ РАССОЛОВ

М. Т. Крупенин

Проблема генезиса стратиформного магнезито-вого оруденения определяется совмещением признаков осадочного (приуроченность к определенным карбонатным горизонтам в мощных карбонатных последовательностях рифея) и явного эпигенетического (наложенная форма рудных тел) генезиса. Предлагаемые ранее модели как осадочные, так и эпигенетические метасоматические, в основном, базировались на изучении эталонного объекта – Саткинского рудного поля, являющегося основным промышленным центром для получения периклазовых огнеупоров (90% производства России) с запасами магнезита до 300 млн. т. Разработке генетических моделей способствует детальная изученность геологического строения этого уникального объекта, обилие горных выработок (карьеры и шахта). Пластообразные залежи кристаллического магнезита мощностью до 40 м локализованы в нижней части стратиграфического горизонта брекчиевидных доломитов (карагайский горизонт верхнесаткинской подсвиты саткинской свиты) и прослеживаются на расстояние до 12 км. Вся рудная полоса расположена в западном борту Саткинской синклинали, залежи падают на юго-восток и разделены серией секущих тектонических нарушений и диабазовыми дайками.

Осадочная модель предполагает накопление магнезита среди карбонатных фаций прибрежной лагуны, источником магния являются гипотетические коры выветривания ультраосновных пород в условиях гумидного теплого климата [6, 22]. Метасоматические модели различаются по источнику магния: постмагматическая – предполагает, что магнезиальные флюиды отделялись при внедрении диабазов [7], гранитоидов Бердяшского плутона [21], элизионно-катагенетическая – рассматривает источником магния тонкорасеянный магнезит во вмещающих доломитах, а источником флюида – элизионные растворы из глинистых толщ рифейского разреза [1, 2]. Кроме того, была выдвинута седиментогенно-диагенетическая гипотеза, предполагавшая стадийное формирование магнезитов: осадочное накопление высокомагнезиальных гидрокарбонатов в особых условиях засоленных лагун в результате поступления магния из кор выветривания по гипербазитам, с последующим обезвоживанием в диагенезе и раннем катагенезе с прояв-

лением холодноводного метасоматоза в периферических частях залежей [12]. Все приведенные представления не рассматривали конкретного механизма рудоотложения и отражали лишь отдельные стороны сложной картины рудообразования.

Новые данные по Cl-Br-Na систематике магнезитов указали на эвапоритовую природу метасоматических флюидов и новый источник магния и флюидов – эвапоритовые рассолы [19] и позволили разработать инфильтрационно-рассольную модель. Первый вариант ее предполагал холодноводный метасоматоз в проницаемой толще коллапс-брекчий на ранних стадиях литификации пород [13, 14], однако, полученные в последнее время данные позволяют несколько уточнить вероятный механизм метасоматоза. Термо-криометрическое изучение газово-жидких включений в магнезитах и околорудных кварц-карбонатных породах дало два температурных пика гомогенизации рассольных включений: около 150 и 300°C [16]. Данные по химическим геотермометрам на базе отношений Na/K и Na/Li по методике [25], полученные на основе измерений состава флюидных включений на хроматографе (Dionex 1050, Леобен, Австрия), показывают температуры в интервале 110–170°C [16] и соответствуют расчету температур образования магнезита Саткинских месторождений по изотопному составу кислорода в интервале от 100–115 до 250–280°C в зависимости от свойств заложеного в расчет раствора (пресного, морского или эвапоритового) [17]. Наиболее удовлетворительный результат показывает морская вода и эвапоритовый рассол.

Предварительные данные, полученные при изучении U-Pb изотопной системы магнезитов Сатки, указывают на возраст метасоматоза на уровне 1350 ± 190 млн. лет (СКВО = 240) (Pb-Pb метод, ИГГД РАН, С-Петербург). Все перечисленные факты подтверждают параметры магнезиального метасоматоза на уровне низкотемпературных гидротерм и позволяют увязать этот процесс с локальным подогревом высокомагнезиальных эвапоритовых рассолов в проницаемой толще доломитовых коллапс-брекчий карагайского горизонта верхнесаткинской подсвиты на рифтогенном этапе в начале среднего рифея (машакское событие). Однако, до последнего времени не было получено данных относительно возможного направления миграции магнезиаль-

ных флюидов, поскольку в масштабах рудного поля не удавалось уловить какой-либо тренд геохимических или минеральных изменений.

Геологами ОАО “Комбинат Магnezит” [4] на основе большого массива статистических данных (более 5000 анализов) опубликована сводка по качеству магнезитов основных месторождений Саткинской группы, с юго-запада на северо-восток: Каргинское, Северо-Карагайское, Карагайское, Гологорское, Мельнично-Паленихинское, Березовское. Анализ этих данных позволил нам выявить закономерное увеличение содержаний MgO и падение концентраций CaO и кремнезёма в рудах от периферии к центру рудного поля (рис. 1). Следовательно, максимальное развитие магнезитового метасоматоза произошло в центральной части рудной полосы, от которой в стороны на ЮЗ и СВ шло затухание метасоматического замещения, сопровождаемое сохранением примесей доломита, кварца и алюмосиликатов (ухудшение качества магнезита). Это позволяет нам предполагать, что источник рудного процесса находился именно в центре рудного поля (месторождения Карагайское и Гологорское). Относительно конкретного механизма, повлекшего масштабное замещение доломита магнезитом в достаточно узком стратиграфическом горизонте, пока можно только предварительно рассуждать. Однако ясно, что, с учетом накопленных данных, этот механизм должен быть связан с внедрением Бердяшского плутона гранитов рапакиви и общим рифтогенным подогревом этой части осадочного бассейна на рубеже 1350 млн. лет (согласно совпадению возраста внедрения гранитов, диабазовой дайковой генерации и предварительных данных по возрасту саткинских магнезитов Pb-Pb методом). Учитывая, что магнезитовые залежи расположены только в карагайском горизонте верхне-саткинской подсистемы и не обнаружены детальными разведочными работами в почти 2-км толще нижележащих доломитов, не может идти речи о масштабном конвективном подтоке горячих флюидов снизу. Это, кстати, подтверждается и отсутствием в магнезитах специфических микроэлементов-индикаторов связи с постмагматическими флюидами [3, 24]. В то же время, можно предположить кондуктивную теплопередачу в отложения карагайского горизонта снизу и прохождение в нём метасоматических процессов. Агентом метасоматоза являются высокомагниево-эвапоритовые рассолы, заполнившие поры и пустоты во вмещающих доломитах, образованных в результате растворения эвапоритовых минералов (коллапс-брекчии). Вероятно, метасоматоз был связан с градиентом температуры и режима кислотности-щелочности в рудовмещающей толще, что является критическим фактором для метасоматического минералообразования [9, 10] и привел к развитию вертикального тренда метасоматических изменений в породах, обуслов-

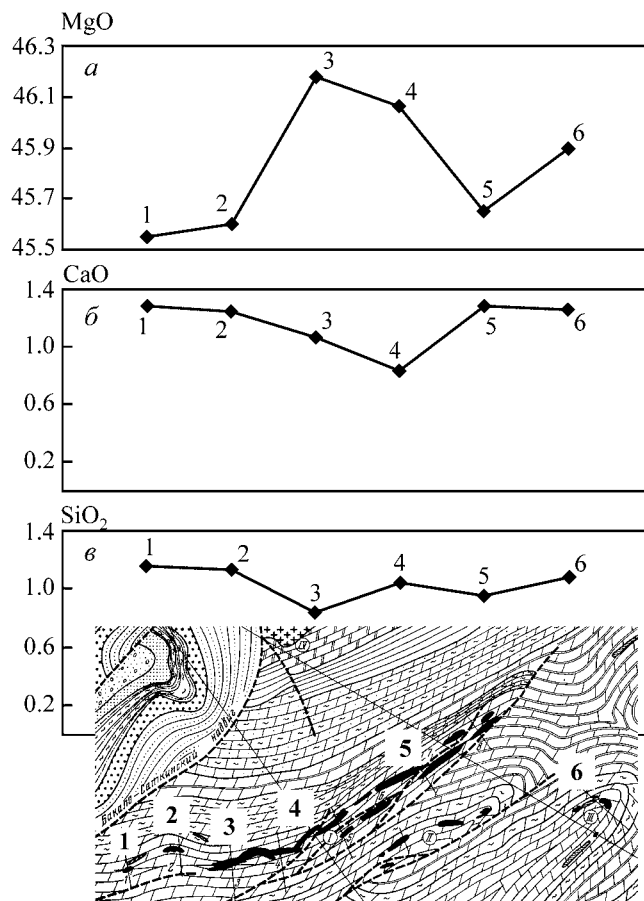


Рис. 1. Распределение технологических параметров в магнезитах Саткинской группы месторождений.

Месторождения (с юго-запада на северо-восток): 1 – Каргинское, 2 – Северо-Карагайское, 3 – Карагайское, 4 – Гологорское, 5 – Мельнично-Паленихинское, 6 – Березовское; а – MgO; б – CaO; в – SiO₂. Выкопировка карты из [1].

ленного не поступательным латеральным движением флюидов через толщу брекчиевидных доломитов, а, вероятно, радиально-концентрическим изменением свойств порового флюида (высокомагнезиального эвапоритового рассола) без значительного линейного перемещения.

Подобный предложенному тренд распределения MgO (ухудшение качества от центра к периферии) наблюдался в Саткинских месторождениях для отдельных магнезитовых залежей (рис. 2) [5]. Такое строение залежи можно объяснить либо направленным движением флюида вкост разреза по узкой зоне нижней части карагайского горизонта, либо медленным перераспределением компонентов. Есть в данном случае определенное сходство с сидеритовыми телами Бакальских месторождений, но там центр тел обозначает подводящий канал, который идет или снизу по разломам, или сверху-сбоку по зоне несогласия [11]. Здесь по другому: в нижележащих карбонатных горизонтах мощностью до 2

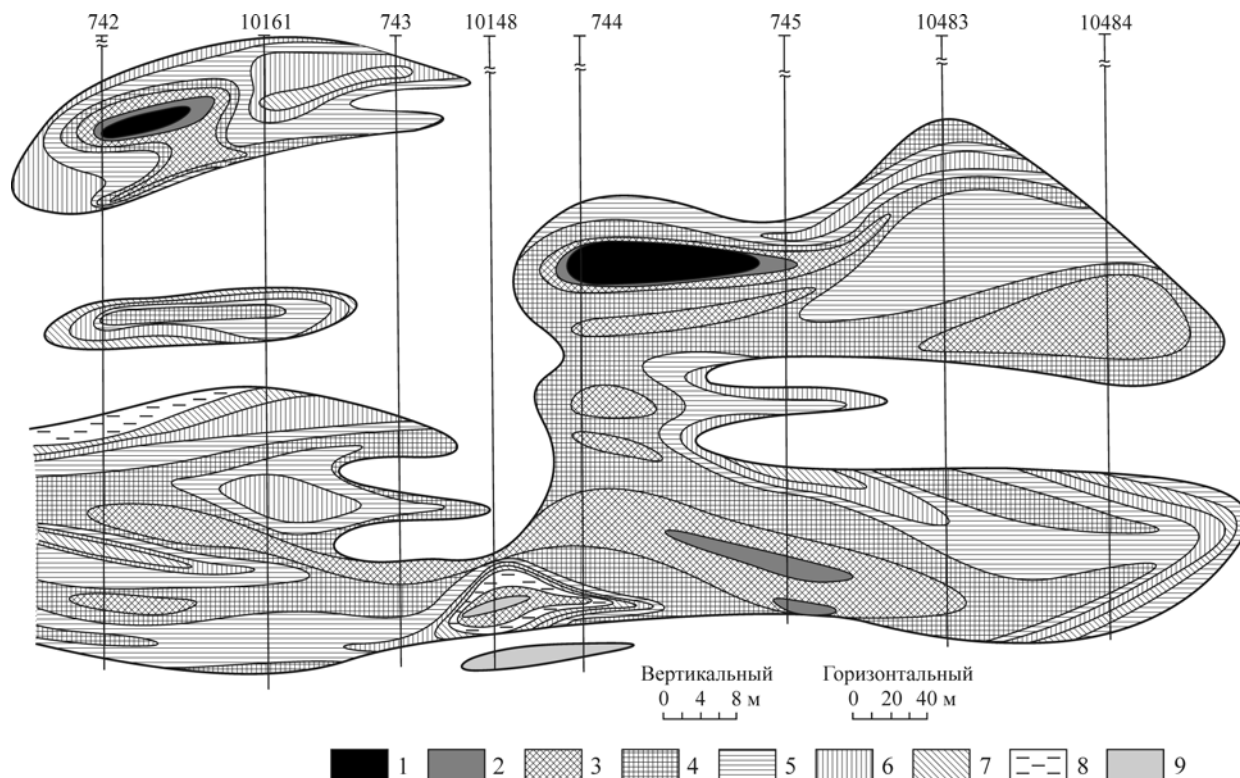


Рис. 2. Концентрически зональное распределение MgO в рудных телах Карагайского месторождения.

Градации концентраций MgO (мас. %): 1 – > 47.6, 2 – 47.2–47.6, 3 – 46.8–47.2, 4 – 46.4–46.8, 5 – 46.4–46.0, 6 – 45.6–46.0, 7 – 45.2–45.6, 8 – 44.8–45.2, 9 – <44.9.

км (!) разведочными работами не обнаружено залежей [2], в отличие от Бакала, где сидеритовые залежи расположены многоэтажно в зонах крутопадающих разломов или около поверхности стратиграфического несогласия в соответствии с повторением в разрезе карбонатных пачек [11]. Поэтому, можно предположить, что в Саткинском рудном поле градиент создавался не вертикальной или латеральной миграцией Mg-носного флюида, а градиентом температуры, который и возбуждал метасоматические изменения (магнезитообразование) при наличии избытка магния во флюиде. Возможность метасоматического минералообразования при градиенте температуры показана в работах Д.С. Коржинского [10], А.Б. Кольцова [9]. В приложении к образованию магнезита можно упомянуть эксперименты А.В. Казакова с соавторами [8], в которых образование магнезита в щелочном растворе с избытком катиона магния начиналось только при повышении температуры, в холодноводных условиях происходило образование доломита или водномагнезиальных эфемерных карбонатных минералов.

Возможность предлагаемого механизма не противоречит ряду геологических особенностей строения залежей, минералогического состава магнезитов и вмещающих доломитов, а также их геохимических признаков. Так, например, в рудных зале-

жах наблюдается слабая миграция SiO_2 , при которой кремнезем скапливается только в контактовых зонах магнезит-доломит в виде гнезд талька, секреторных выполнений в коллапс-брекчиях и футляровидных кристаллов кварца, в то же время, в магнезитовых залежах гнезда кварца также присутствуют. Кроме того, статистически отмечается преимущественное накопление SiO_2 в верхних частях залежей, что можно объяснить отгонкой кремнезема щелочным флюидом вверх [15] в соответствии с вертикальным градиентом температуры.

Сохранение изотопной системы $d^{13}\text{C}$ в саткинских магнезитах на уровне морских карбонатов, в том числе, и вмещающих доломитов и перекрывающих известняков (вариации не более 0.7‰), подтверждает, что аутигенной угольной кислоты во флюиде было мало. Следовательно, остается предположить, что это был существенно сульфатно-хлоридный флюид, что и подтверждается термокриометрией и изучением Cl-Br-Na систематики. То, что при формировании саткинских магнезитов не было длительной миграции флюида, подтверждается рядом геологических и минералогических, в том числе изотопных, факторов. Для гидротермальных карбонатов по мере увеличения дальности переноса флюидов отношение Y/No уменьшается относительно первичноосадочных карбонатов [23]. Высокие (как во вмещающих кар-

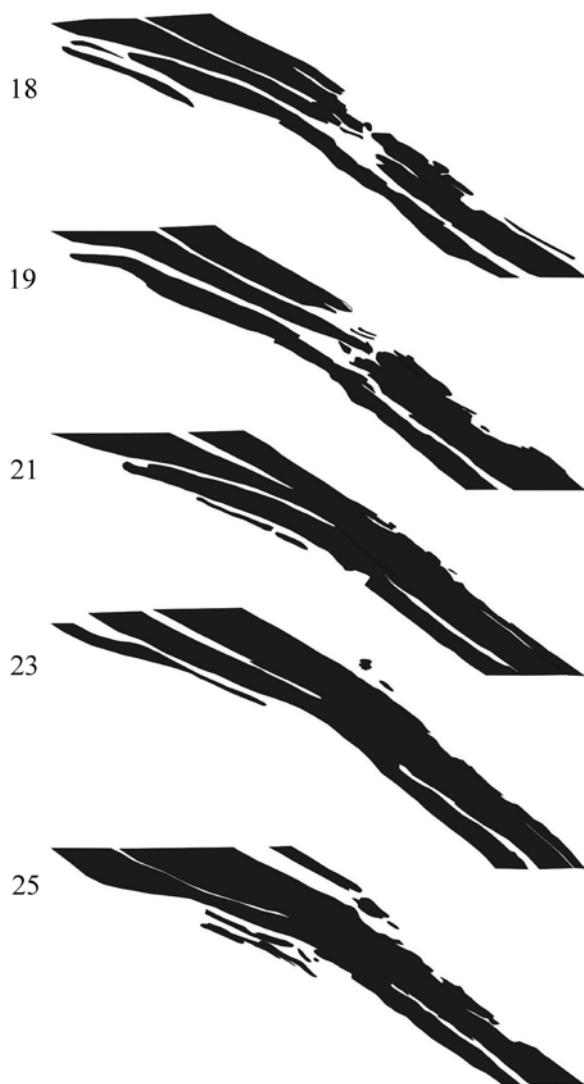


Рис. 3. Вертикальная проекция магнезитовых залежей в центральной части Карагайского карьера по результатам отработки в XX в. (глубина отработки около 300 м).

Расстояние между профилями 25 м (номера слева – возрастание с юго-запада на северо-восток).

бонатных породах и морской воде) значения $\delta^{18}\text{O}$ на уровне 50–54 в саткинских магнезитах отличаются от пониженных значений для других подтипов магнезитовых месторождений: Исмакаевский – 29, Семибратский – 32–38 [14]. Высокая степень фракционирования изотопов кислорода с деплетированием ^{18}O до 10‰ в магнезитах Саткинского рудного поля относительно вмещающих доломитов может быть обусловлена высоким отношением флюид/порода, возникающим в закрытых системах с многократной циркуляцией флюида [20].

Отсутствие значительного поступательного движения метасоматического флюида отмечается и в особенностях формы рудных тел, имеющих более ровный нижний и сложный верхний контакты. Об-

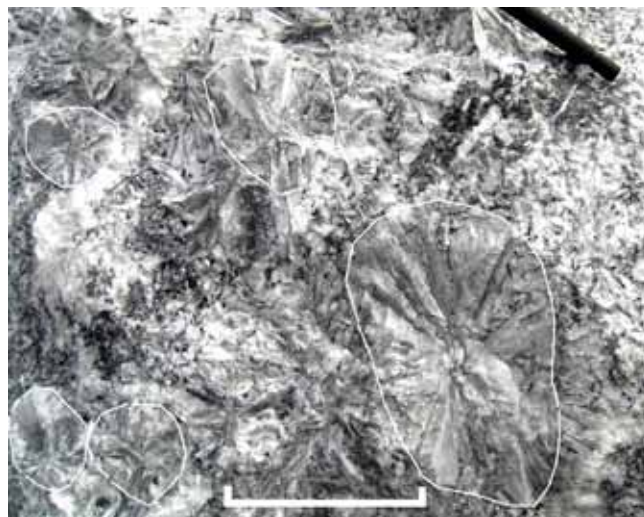


Рис. 4. Звездчатая структура крупнокристаллических магнезитов, Карагайский карьер.

Линейка 10 см, контуры звездчатых скоплений помечены белой штриховой линией.

щее строение рудоносной пачки (нижняя часть карагайского горизонта) определяется отсутствием магнезитовых залежей ниже горизонта брекчиевидных доломитов и наличием мелких метасоматических гнездовых тел выше основных продуктивных пластообразных залежей с вертикальным размахом магнезитовой минерализации до 100 м (рис. 3).

Особенностью магнезитового метасоматоза в Саткинском месторождении является рост крупных кристаллов (до 150–200 мм), что указывает на медленную скорость кристаллизации из насыщенного раствора при сохранении длительное время состояния насыщения. Более того, часто развиваются звездчатые кристаллы, растущие во все стороны, что нелогично было бы при направленном движении флюида, но объяснимо при медленном росте в гомогенном пересыщенном по магнию субстрате, который представляли собой пористые насыщенные эвапоритовым рассолом брекчированные доломиты (рис. 4). Расположение магнезитовых залежей в нижней части 700-метрового пронизываемого горизонта брекчиевых доломитов может быть обусловлено накоплением здесь наиболее концентрированных и относительно тяжелых эвапоритовых рассолов, не имеющих такой концентрации на гипсометрически более высоких уровнях карагайского горизонта.

Весьма однородный изотопный состав серы в пиритах (+5...–7‰ $\delta^{34}\text{S}$), сингенетичных магнезитам, в отличие от этого параметра в пиритах из вмещающих доломитов и доломитистых сланцев (–5.8... –16.6‰), диабазов (–1.1...+1.7‰), указывает на определенную температуру и одноактность процесса формирования изотопного состава серы пиритов в результате термосульфатредукции [18], что также укладывается в представления

о формировании магнезитов в результате подогрева эвапоритовых высокомагнезиальных сульфатно-хлоридных рассолов в высокопроницаемой толще коллапс-брекчий на этапе рифтогенной гидротермальной активизации.

Выполняется при поддержке гранта РФФИ № 09-05-00964а, интеграционного проекта “Реконструкция источников поступления вещества в осадочные бассейны Северной Евразии: обстановки седиментогенеза, потенциальная рудоносность” и Программы ОНЗ РАН № 2 (проект № 09-Т-5-1011)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфимов Л.В. Магнезитоносные стратифицированные уровни и их литологическая природа в доломитовых рифейских толщах Южного Урала // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 1. С. 33–44.
2. Анфимов Л.В., Бусыгин Б.Д., Демина Л.Е. Саткинское месторождение магнезитов на Южном Урале. М.: Наука, 1983. 86 с.
3. Анфимов Л.В., Крупенин М.Т., Вострокнутов Г.А. и др. Микроэлементы в карбонатных толщах рифея Башкирского мегантиклинория (Ю. Урал). Екатеринбург: УИФ “Наука”, 1993. 73 с.
4. Афонин Ю.А., Марясов И.Г., Ковалев А.М., Неоднородности качественного состава Саткинских магнезитов // Минеральное сырье Урала и его использование. Вып. 3. Екатеринбург: Уральский институт минерального сырья, 2009. С. 3–18.
5. Бусыгин Б.Д. Магнезитовая формация нижнего рифея в Саткинском районе на Южном Урале. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 1991. 181 с.
6. Главнейшие магнезитовые месторождения / Л.П. Урасина, Т.А. Другалева, П.П. Смолин. М.: Наука, 1993. 157 с.
7. Заварицкий А.Н. Результаты исследования магнезитовых месторождений в Саткинском районе в 1918 г. // Горное дело. 1920. № 2/3. С. 37–39.
8. Казаков А.В., Тихомирова М.М., Плотникова В.И. Система карбонатных равновесий (доломит, магнезит) и выводы о парагенезисе сидеритов и фосфоритов // Тр. ИГН АН СССР. Сер. Геол. 1957. Вып. 152. № 64. С. 13–58.
9. Кольцов А.Б. Метасоматическое воздействие раствор-порода в условиях переменных температур и давлений // Геохимия. 2006. № 7. С. 712–721.
10. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. 104 с.
11. Крупенин М.Т. Условия формирования сидеритонной бакальской свиты нижнего рифея (Южный Урал). Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 256 с.
12. Крупенин М.Т. Минерогения осадочных последовательностей рифея // Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерогения, геологические памятники природы). Т. 1. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С. 124–244.
13. Крупенин М.Т. Геолого-геохимические и генетические различия месторождений Южно-Уральской магнезитовой провинции // Ежегодник-2002. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2003. С. 272–280.
14. Крупенин М.Т. Геолого-геохимические типы и систематика РЗЭ месторождений Южно-Уральской магнезитовой провинции // Докл. АН. 2005. Т. 405, № 2. С. 243–246.
15. Крупенин М.Т. Поведение кремнезема при щелочном метасоматозе в магнезитах и доломитах саткинской свиты // Уральская минералогическая школа – 2006. Сборник статей студентов, аспирантов, научных сотрудников академических институтов и преподавателей ВУЗов геологического профиля. Екатеринбург: УГГГУ, 2006. С. 69–77.
16. Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Балтыбаев Ш.К. Газово-жидкие включения в кристаллических магнезитах и вмещающих брекчиевидных доломитах Саткинского рудного поля // Геология, полезные ископаемые и проблемы палеоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: мат-лы 7-ой Межрегион. научно-практической конф. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. С. 190–192.
17. Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Крылов Д.П. и др. Изотопные индикаторы магнезиального метасоматоза в нижнерифейских отложениях Южно-Уральской провинции // Ежегодник-2009. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 157. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. С. 146–152.
18. Крупенин М.Т., Мичурин С.В. Изотопно-геохимические характеристики пирита из магнезитовых месторождений Южного Урала // Петрогенезис и рудообразование: XIV Чтения памяти академика А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 269–274.
19. Крупенин М.Т., Прохаска В. Эвапоритовая природа флюидных включений в кристаллических магнезитах саткинского типа // Докл. АН. 2005. Т. 403, № 5. С. 661–663.
20. Тейлор Х.П. Изотопы кислорода и водорода в гидротермальных рудных месторождениях // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1982. С. 200–237.
21. Тимесков В.А. К научным основам прогноза и поисков магнезитовых месторождений // Советская геология. 1983. С. 73–80.
22. Шевелев А.И., Зуев Л.В., Федоров В.П. Минерально-сырьевая база магнезита и брусита России. Казань: Новое знание, 2003. 161 с.
23. Bau, M. Controls of the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf and lanthanide tetrad effect // Contributions of the Mineralogy and Petrography. 1996. 123. P. 323–333.
24. Ellmies R., Voightlaender G., Germann K., et al. Origin of giant strata bound deposits of magnesite and siderite in Riphean carbonate rocks of the Bashkir mega-anticline, western Urals // Geologische Rundschau. 1999. 87. P. 589–602.
25. Kharaka Y.K., Mariner R.H. Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins, in Thermal History of Sedimentary Basins, Methods and Case Histories // eds. N.D. Naeser, T.H. McCulloh. NY: Springer-Verlag, 1989. P. 99–117.