

ОСОБЕННОСТИ Sr-Nd СИСТЕМАТИКИ МАГНЕЗИТОВ ПАЛЕНИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (САТКИНСКОЕ РУДНОЕ ПОЛЕ, ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2013 г. М. Т. Крупенин, А. Б. Кузнецов*, Г. В. Константинова*

Изотопные исследования стронция и неодима в карбонатных породах и рудах могут иметь значение для определения генетической природы рудных флюидов, связанных с широкомасштабным магнетитовым метасоматозом, а также могут быть использованы для оценки возраста оруденения. Для месторождений кристаллического магнетита изотопная система Nd только начинает использоваться, поэтому любая новая информация представляет большой интерес. Первые результаты изучения Sr-Nd систематики магнетитов и вмещающих карбонатных пород саткинской свиты были представлены на примере Гологорского месторождения Саткинского рудного поля [3]. Были показаны особенности распределения стронция, самария и неодима в пределах рудного поля, а также оценен вклад корового и мантийного компонентов во флюидах (растворах), участвовавших в формировании карбонатных пород. Была рассчитана эрохрона возраста магнетита для Гологорского месторождения и сделан вывод о необходимости дополнительных исследований для поиска образцов с широкой “растяжкой” Sm-Nd отношения. С этой целью предпринято изучение Sr-Nd систематики карбонатных пород и магнетитов Паленихинского месторождения.

Паленихинское месторождение расположено в центральной части Саткинского рудного поля в основной полосе развития магнетитовых пластообразных залежей, приуроченных к нижней части карагайского горизонта верхнесаткинской подсвиты саткинской свиты. Такое же стратиграфическое положение характерно и для магнетитовых залежей в Карагайском и Гологорском месторождениях, расположенных западнее Паленихинского. Более того, рудное тело XVII проходит через все эти месторождения, имея общее протяжение 4.5 км [1]. Однако, в отличие от последних, в Паленихинском месторождении более широко развиты разнонаправленные послерудные дайки долеритов, вероятно, комагматичные машакскому рифтогенному событию в начале среднего рифея (1390–1370 млн. лет [9]). В связи с этими дайками на месторождении наблюдаются сравнительно активные контактовые явления, прежде всего – серпентинизация, мраморизация и бруситизация вмещающих доломитов и самих магнетитов, достигающие мощности 20 м.

Было изучено 14 проб магнетита, отобранных из материала массового взрыва по рудной массе по северной части магнетитовой залежи LVI. Эта отдельная сравнительно небольшая залежь магнетита мощностью 30–50 м протяженностью с СЗ на ЮВ 105 м имеет тупые метасоматические выклинивания во вмещающие доломиты (рис. 1). Она расположена в северной части Паленихинского карьера и занимает более низкое стратиграфическое положение относительно других залежей в месторождении (рис. 2). Залежь, как и большинство рудных тел в Саткинском рудном поле, падает согласно с вмещающими доломитами на ЮЗ, прослежена и отработана от горизонта 385 до горизонта 265 (к моменту опробования в 2009 г.). Данная залежь на изученном горизонте не имеет контактов с долеритами; дайки мощностью 5–10 м наблюдаются к северу и югу от залежи на расстоянии 20–30 м, но выше и ниже по разрезу пересекают ее (см. рис. 2). Магнетит представлен преимущественно крупнокристаллическими полосчатыми и гнездово-полосчатыми разностями, размер стреловидных кристаллов от 2–4 до 10–20 мм. Пробы МГ-4 и МГ-7 подвержены наложенной доломитизации, представленной светло-серыми нечеткими пятнами мелкозернистого доломита размером до 10–30 мм в крупнокристаллическом магнетите, поскольку попали в наложенную тектонизированную зону повышенной трещиноватости СЗ простирания.

Химический состав магнетитов Паленихинского месторождения определен рентгено-спектральным методом в ИГГ УрО РАН (СРМ-18). Изучение Rb-Sr и Sm-Nd систематики магнетитов проводилось в карбонатной составляющей образца после его растворения в 2.5 N HCl при $t = 60^{\circ}\text{C}$ (ИГГД РАН, С-Петербург). Концентрации Rb и Sr определялись методом изотопного разбавления с применением смешанного индикатора $^{87}\text{Rb}+^{84}\text{Sr}$, а концентрации Sm и Nd – при добавлении смешанного индикатора $^{150}\text{Nd}+^{149}\text{Sm}$. Изотопный анализ выделенных элементов выполнялся на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в режиме одновременной регистрации ионных токов всех изотопов. Измерение отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в стандартном карбонате стронция NIST SRM-987 в период рабо-

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

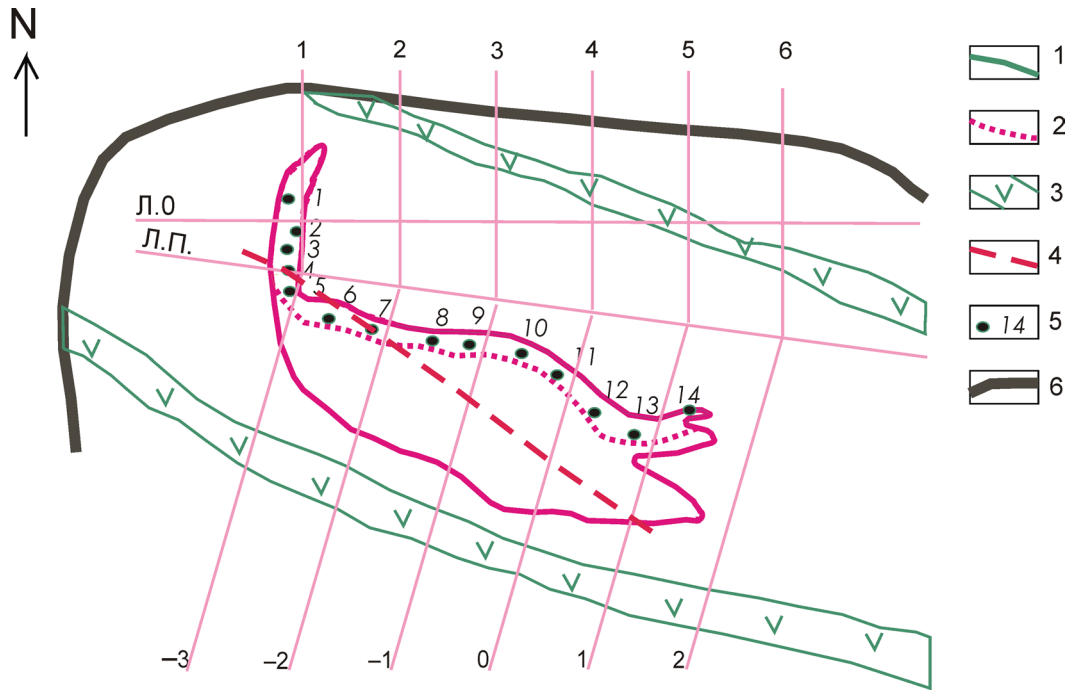


Рис. 1. Схематический геологический план горизонта 265 (на 24.09.2009) Паленихинского карьера Саткинского рудного поля (с разрешения ОАО “Комбинат Магnezит”).

1 – магнезит, 2 – магнезит из материала массового взрыва по рудной массе, 3 – дайки долерита, 4 – линейная зона редодомитизации, 5 – точки опробования, 6 – контур карьера; Л.О – положение координатной сетки Саткинского рудного поля; Л.П. – положение координатной сетки Паленихинского карьера. Расстояние между профилями 25 м.

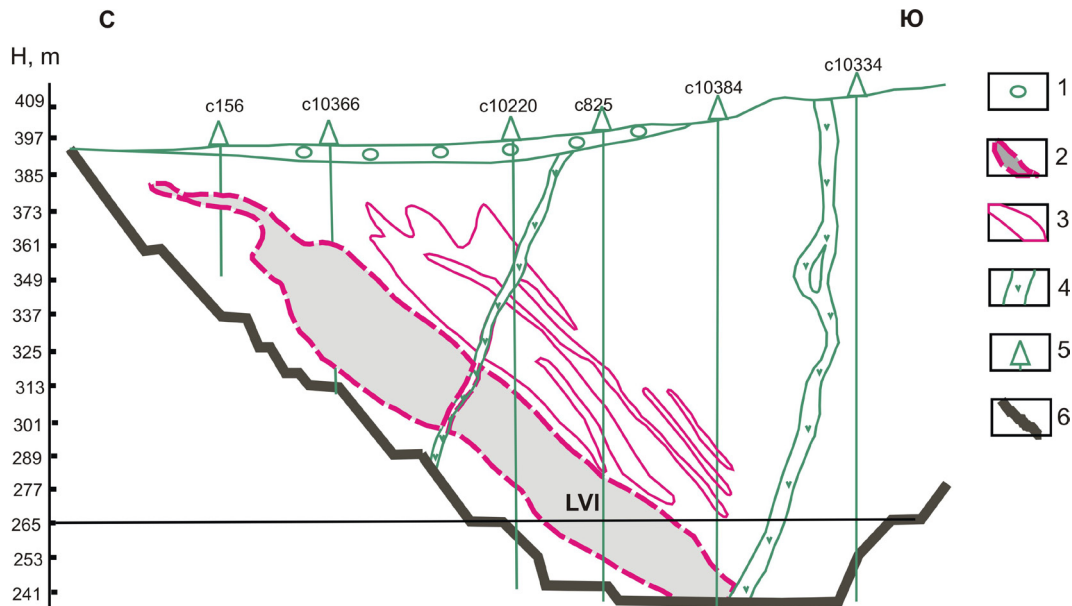


Рис. 2. Схематический геологический разрез № 1 (Л.О) Паленихинского карьера Саткинского рудного поля (с разрешения ОАО “Комбинат Магnezит”).

1 – рыхлые отложения, 2 – магнезит рудного тела LVI, 3 – другие тела магнезита в доломите, 4 – дайки диабазы, 5 – скважины, 6 – контур карьера.

ты дало значение 0.71028 ± 0.00001 ($2\sigma_{\text{средн}}$, $n = 9$). Среднее значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандартном образ-

це jNd-1 в период работы составляли соответственно 0.512098 ± 0.000003 ($2\sigma_{\text{средн}}$, $n = 9$).

Таблица 1. Химический состав магнезитов, Паленихинский карьер

№ пробы	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃ общ.	ППП	СУММА	FeO _{хим}
МГ-1	46.91	0.24	0.72	0.35	0.04	0.03	0.45	51.30	100.04	0.40
МГ-2	47.06	0.10	0.31	0.30	0.02	0.02	0.48	51.70	99.99	0.40
МГ-3	45.18	1.00	2.51	0.27	0.08	0.04	1.16	49.90	100.14	0.80
МГ-4	44.73	0.17	0.58	2.94	0.03	0.02	1.01	50.40	99.88	0.60
МГ-5	46.91	0.17	1.72	0.61	0.03	0.01	0.45	49.90	99.80	0.40
МГ-6	45.58	0.11	0.88	1.23	0.03	0.03	1.25	51.00	100.11	0.70
МГ-7	39.88	0.10	0.45	8.85	0.02	0.02	0.90	50.00	100.21	0.80
МГ-8	45.45	0.26	0.69	0.47	0.04	0.01	1.34	51.70	99.96	0.70
МГ-9	46.78	0.47	1.02	0.42	0.05	0.02	0.45	50.90	100.10	0.40
МГ-10	46.02	0.58	2.12	0.41	0.06	0.02	0.52	50.40	100.13	0.40
МГ-11	46.14	0.13	0.45	0.50	0.04	0.01	1.34	51.50	100.11	0.70
МГ-12	46.09	0.33	0.70	0.39	0.04	0.01	1.27	51.30	100.12	0.70
МГ-13	45.74	0.28	1.19	0.48	0.04	0.01	1.27	51.00	100.01	0.70
МГ-14	46.10	0.18	0.60	0.46	0.04	0.01	1.26	51.40	100.04	0.70
МГ-15	46.85	0.03	0.30	0.32	0.02	0.04	0.80	51.60	99.96	0.70
Среднее	45.69	0.28	0.95	1.20	0.04	0.02	0.93	50.93	100.04	0.60

Примечание. Анализы выполнены в ИГГ УрО РАН, (СРМ-18).

Магнезиты, как правило, хорошего и среднего качества, содержание MgO варьирует от 44.73% (МГ-4) до 47.06% (МГ-2), за исключением пробы МГ-7, где содержание MgO снижается до 39.88% (табл. 1). Соответственно, содержание технологически вредных примесей CaO повышается и варьирует от 0.27% (МГ-3) до 2.94 (МГ-4), в пробе МГ-7 составляет 8.85%, что связано с доломитизацией магнезита. Концентрация SiO₂ варьирует от 0.31% (МГ-2) до 2.51 (МГ-3). Содержание глинозема (Al₂O₃) изменяется в довольно узких рамках около предела определения от 0.10% до 1.0%, что указывает на низкое содержание алюмосиликатной примеси (хлорита и слюд, глины) в магнезитах (кроме пробы МГ-3 с повышенными концентрациями соответствующих компонентов). По этой же причине низкие концентрации TiO₂ от 0.017% (МГ-7) до 0.076 (МГ-3). Концентрации MnO изменяются в пределах от 0.007% (МГ-12) до 0.039% (МГ-3), корреляция с Fe₂O₃общ. слабо отрицательная (-0.28), а с FeO просто отсутствует (0.01). Концентрации Fe₂O₃общ. в магнезитах несколько выше, чем в Карагайском месторождении: от 0.45% (МГ-1, МГ-5, МГ-9) до 1.34% (МГ-11), среднее по объекту – 0.93%. Значения FeO_{хим} варьируют от 0.4% до 0.8%, среднее 0.61%, и возможно, несколько занижены, из-за невысоких концентраций железа в магнезитах (предел обнаружения 0.2%).

Результаты изотопно-геохимического изучения магнезитов Паленихинского месторождения представлены в табл. 2. Магнезиты имеют типичные значения концентраций стронция для этого типа пород в Саткинском рудном поле – на уровне 1.2–2.3 мкг/г [6]. Только два образца доломитизированных магнезитов, МГ-4 и МГ-7, имеют содержание Sr, повышенное до величин, присущих вмещающим доломитам (30.2 и 94 мкг/г). Величина отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr также находится в типич-

ном для магнезитов Саткинского рудного поля интервале значений 0.7135–0.7182, однако в доломитизированных магнезитах она резко повышается до 0.7333–0.736. Концентрации Sm и Nd в магнезитах также типовые и составляют соответственно 0.198–0.516 и 0.603–2.29 мкг/г. Отношение Sm/Nd варьирует от 0.225 до 0.408.

Отношения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в магнезитах Паленихинского месторождения демонстрируют типичные повышенные относительно вмещающих карбонатных пород саткинской свиты значения, заключенные в интервале от 0.51192 до 0.51298. Рассчитанные на возраст саткинской свиты (1550 млн. лет) значения эpsilon Nd (1550) в магнезитах варьируют в широких пределах. В большинстве образцов они находятся в пределах от -6.4 до -1.9 (среднее -3.8), в то время как для проб МГ-2 и МГ-14 значения эpsilon Nd (1550) составляют +5.6 и +9.4. Исходя из предположения, что магнезиты являются эпигенетическими образованиями, оторванными от осадконакопления, и связаны с рифтогенным этапом разуплотнения коры в начале среднего рифея (1350–1390 млн. лет, [8]), значения эpsilon Nd (1350) в основной группе магнезитов равно в среднем -3.7.

Ранее было показано [3], что известняки надрудной карбонатной толщи саткинской свиты содержат высокие концентрации стронция, сопоставимые с арагонитовыми илами современных морей, а по значению ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (0.7046) отвечают характеристикам раннерифейского океана [7]. В то же время, во вмещающих доломитах концентрация стронция падает на 2 порядка, составляя 45 г/т, а отношение ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr увеличивается до 0.708–0.709, указывая на проработку эпигенетическим флюидом при ранней доломитизации. В магнезитах концентрации стронция падают еще на порядок, а измеренные значения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr находятся на уровне 0.714–0.719 (табл. 2).

Таблица 2. Rb-Sr и Sm-Nd аналитические данные для магнезитов Паленихинского месторождения

№ проб	Rb, г/г	Sr, г/г	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr изм.	Sm, г/г	Nd, г/г	Sm/Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd изм.	143/144 Nd (1550)	ε Nd на 1550 CHUR	ε Nd на 1350 CHUR	T _{DM} Ga
Магнезиты с высоким ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (0.7167 ± 0.0012), близкие по этой величине (0.7168) и ε Nd (-4.9) к магнезитам Гологорского месторождения											
МГ-1	0.05	1.5	0.7145	0.418	1.36	0.307	0.51233	0.51044	-3.8	-4.1	4.4
МГ-3	0.13	1.8	0.7176	0.516	2.29	0.225	0.51192	0.51054	-1.9	-3.5	2.4
МГ-5	0.09	2.2	0.7169	0.406	1.69	0.24	0.51197	0.5105	-2.7	-4	2.6
МГ-6	0.06	11.4	0.7156	0.251	0.662	0.379	0.51278	0.51044	-3.7	-2.9	-3.6
МГ-8	0.07	2.3	0.7177	0.248	0.619	0.4	0.51283	0.51037	-5.2	-4	-1.7
МГ-9	0.13	1.9	0.7155	0.324	1.02	0.318	0.51235	0.5104	-4.6	-4.7	5.5
МГ-10	0.12	2	0.715	0.34	1.19	0.285	0.51228	0.51053	-2.1	-2.8	3.2
МГ-12	0.04	1.4	0.7182	0.247	0.605	0.408	0.5129	0.51039	-4.8	-3.5	-1.2
МГ-13	0.09	2.1	0.7176	0.274	0.704	0.389	0.51277	0.51037	-5.1	-4.1	-2.7
Магнезиты с пониженным ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr (0.7136 ± 0.0002) и мантийной меткой ε Nd (в среднем +6),											
МГ-2	0.07	1.2	0.7135	0.351	1.05	0.333	0.51298	0.51092	5.6	5.8	2.2
МГ-14	0.05	1.4	0.7138	0.198	0.9	0.219	0.51247	0.51111	9.4	7.8	1.3
Магнезиты с примесью доломита, повышено ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr до 0.735											
МГ-4	0.03	30.2	0.7333	0.234	0.643	0.364	0.51255	0.51031	-6.4	-5.8	-15.4
МГ-7	0.11	94	0.736	0.223	0.603	0.369	0.51275	0.51048	-3	-2.3	-6.4

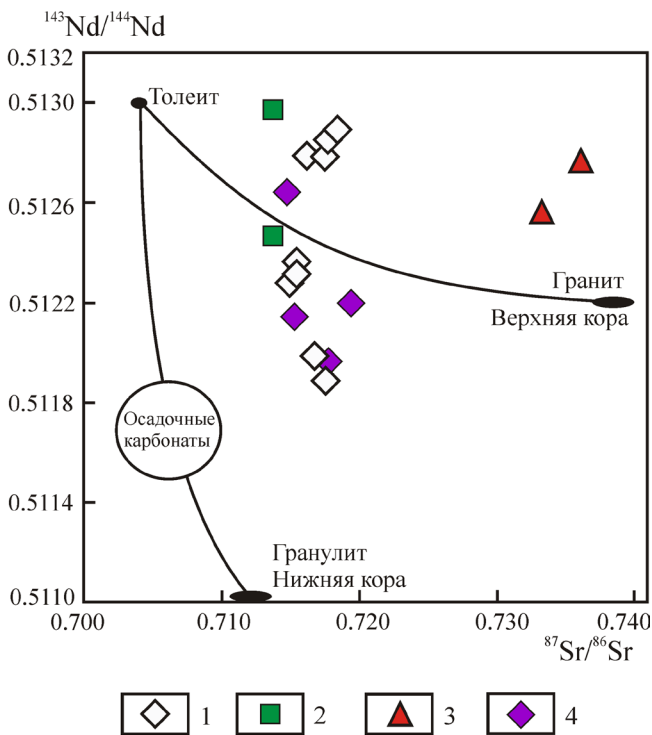


Рис. 3. Зависимость измеренного отношения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd от отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в магнезитах Саткинского рудного поля и сравнение с Sr-Nd характеристиками осадочных карбонатов саткинской свиты [3] и главных породных резервуаров [10].

1–3 – магнезит Паленихинского месторождения: 1 – аналогичный Гологорскому месторождению, 2 – из контактов рудной залежи, 3 – из зоны редоломитизации, 4 – магнезиты Гологорского месторождения.

Были установлены низкие средние концентрации Sm и Nd в известняках (0.40 и 1.78 мкг/г), в доломитах

та, удаленных от рудного поля (0.54 и 2.43 мкг/г) и в магнезитах (0.37 и 1.26 мкг/г) и некоторое обогащение концентрации Sm и Nd в крупнозернистых генерациях доломитов (1.54 и 6.9 мкг/г).

Отношение ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в надрудных известняках и вмещающих доломитах Саткинского рудного поля варьирует в пределах 0.51157–0.51179, в магнезитах оно повышается в интервале от 0.51195 до 0.51265. Рассчитанные на возраст саткинской свиты (1550 млн. лет) значения эpsilon Nd (1550) в известняках и вмещающих доломитах варьируют от -8.7 до -5.7. В образцах околорудных доломитов и крупнозернистых генерациях значение эpsilon Nd (1550) варьируют в пределах от -6.2 до -5.6, а в рудных магнезитах – от -5.6 до -4.0. Это позволило предположить, что магнезиты формировались из флюида, который был некогенетичен раствору, из которого кристаллизовались известняковые осадки и раннедиагенетические вмещающие доломиты [3].

Полученные данные Sr-Nd изотопной систематики магнезитов для Паленихинского месторождения объединяются в две группы (рис. 3). Основная группа (11 проб) представлена чистыми магнезитами с соответствующими Sr-Nd характеристиками совпадает с таковой в Гологорском месторождении [3]. Значения εNd в двух образцах из этой группы, рассчитанные на возраст 1550 и 1350 млн. лет, очень высоки: в среднем +7.5 и +6.8 соответственно (табл. 2). Эти пробы были отобраны из контактовых частей залежи, где могли оказать контактовое воздействие базитовые послерудные дайки, пересекающие залежь выше и ниже изученного горизонта (см. рис. 2). Вторая группа (два образца) представляет магнезиты, подверженные редоломитизации. В этих образцах значительно повышено отношение ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr до 0.7346, что, вероятно, демонстриру-

ет позднее воздействие на магнезит флюидов с высокорadioгенным стронцием. Редоломитизация магнезита проявлена в виде секущей зоны, приуроченной к линейному тектоническому нарушению в рудной залежи. Такое обогащение доломитизированных пород радиогенным стронцием характерно для вендских тектоно-термальных перестроек в регионе, сопровождавшихся калиевым метасоматозом (серицитизация и калишпатизация) [2, 5]. Линейные зоны вторичных доломитов фиксируются как во вмещающих доломитах, так и в магнезитах в Саткинском рудном поле, а также в доломитах и сидеритах в Бакальском рудном поле в 20 км южнее. Сравнение Sr-Nd изотопной характеристики осадочных карбонатных пород саткинской свиты и рудных магнезитов показывает (см. рис. 3), что рудные генерации формировались при участии растворов, формировавшихся в разных породных резервуарах.

Средняя величина отношения Sm/Nd в саткинских известняках (0.23) и доломитах (0.22) согласуется с этими значениями в осадочных карбонатных породах и современной морской воде [10], но ниже, чем в магнезитах (0.25–0.37). Заметная амплитуда вариаций данного отношения является благоприятным фактором для изохронного определения возраста магнезита Sm-Nd методом. На материале Гологорского месторождения было установлено, что в координатах $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ образцы магнезитов группируются около линии, отвечающей возрасту 1460 ± 150 млн. лет (1 сигма). Большая погрешность рассчитанного значения не позволяет принимать его как возраст образования магнезитовых пород.

Серия магнезитов Паленихинского месторождения имеет заметные вариации отношения Sm/Nd (0.22–0.40), что может быть предпосылкой для вычисления возраста. Расчет Sm/Nd эрохроны по 9 образцам Паленихинского месторождения и 4 образцам Гологорского месторождения, имеющим типичные коровые (отрицательные, среднее –4.1) значения ϵNd и типичные для магнезитов Саткинского месторождения значения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.714–0.718) дал возраст 1400 ± 270 млн. лет (рис. 4). В первом приближении полученный возраст совпадает с данными Pb-Pb метода (1380 ± 14 млн. лет [8]) и указывает на связь по времени образования со среднерифейским (машакским) рифтогенным событием.

Таким образом, Sr-Nd систематика магнезитов из двух месторождений Саткинского рудного поля подтверждает смешанную мантийно-коровую природу рудного флюида. Влияние мантийных растворов в связи с внедрением послерудных базитовых даек усложнило распределение изотопных отношений радиогенного неодима в наиболее подверженных изменениям контактовых частях залежей. В то же время, полученный ранее вывод по данным Sr-Nd систематики о разных источниках флюидов для формирования вмещающих осадочных пород (мор-

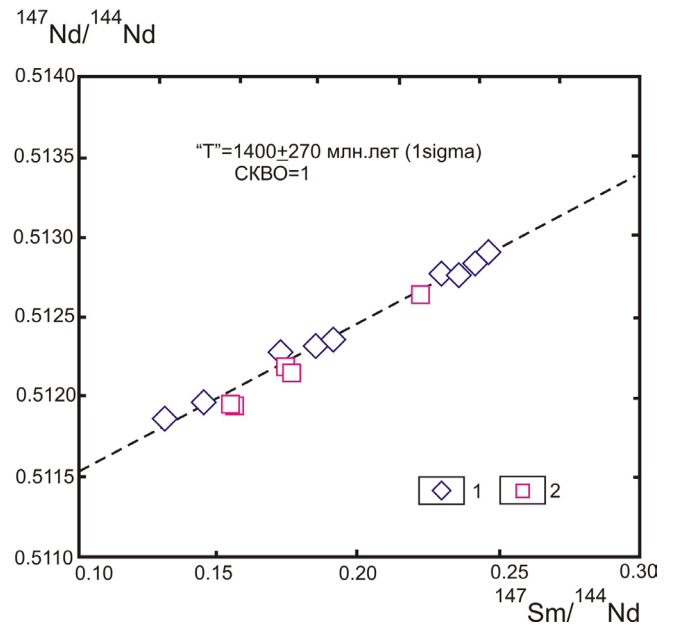


Рис. 4. Sm-Nd эрохрона возраста магнезитов Саткинского рудного поля.

1 – магнезиты Паленихинского месторождения, 2 – магнезиты Гологорского месторождения.

ская вода) в диагенезе и эпигенетических метасоматических магнезитов (коровой флюид, испытавший определенное взаимодействие с алюмосиликатными породами разреза и незначительно обогатившийся мантийным материалом) получает дальнейшее подтверждение. Этот вывод не противоречит идее высокомагнезиального эвапоритового рассола, мигрировавшего через осадочную толщу [3, 4].

Авторы выражают благодарность главному геологу ОАО "Комбинат Магнезит" Д.Ж. Мосейкину и старшему геологу Мельнично-Паленихинского карьера Т.Л. Выломовой за помощь в проведении полевых исследований в карьерах Саткинского рудного поля.

Исследование выполняется при финансовой поддержке грантов РФФИ 06-05-64592, 09-05-00964 и 12-05-00977 и Программы № 4 ОНЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфимов Л.В., Бусыгин Б.Д., Демина Л.Е. Саткинские месторождения магнезитов. М.: Наука, 1983. 87 с.
2. Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б. Sr-изотопная характеристика магнезитов и вмещающих карбонатных пород, нижний рифей, Южно-Уральская провинция // Литосфера, 2009. № 5. С. 56–71.
3. Крупенин М.Т., Кузнецов А.Б., Константинова Г.В. РЗЭ и Sr-Nd систематика магнезитов и вмещающих карбонатных пород Саткинского рудного поля, Южный Урал // Ежегодник-2011. Тр. Ин-та геол. им. акад. А.Н. Заварицкого. Вып. 159. 2012. С. 163–168.

4. Крупенин М.Т., Прохаска В. Эвапоритовая природа флюидных включений в кристаллических магнетитах саткинского типа // Докл. РАН. 2005. Т. 403, № 5. С. 661–663.
5. Кузнецов А.Б., Крупенин М.Т., Овчинникова Г.В. и др. 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.
6. Кузнецов А.Б., Крупенин М.Т., Горохов И.М. и др. Изотопный состав Sr в нижнерифейских карбонатных породах магнетитосодержащей саткинской свиты, Южный Урал // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 2. С. 233–238.
7. Кузнецов А.Б., Овчинникова Г.В., Семихатов М.А. и др. 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.
8. Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Горохов И.М. и др. U-Pb систематика рифейских магнетитов саткинской свиты, Южный Урал // V Российская конференция по изотопной геохронологии. Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов. М.: ИГЕМ РАН. 2012. С. 262–265.
9. Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Матуков Д.Н. и др. Граница среднего и нижнего рифея на Южном Урале: новые изотопные U-Pb SHRIMP ограничения // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 3. С. 370–376.
10. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.