

## ТЕРМОБАРОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРОВАНИЯ АПОКАРБОНАТНЫХ ТАЛЬКИТОВ В ПЕРИФЕРИИ БЕЛОРЕЦКОГО МЕТАМОРФИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2018 г. М. Т. Крупенин, А. А. Гараева, Е. О. Калистратова\*, Н. В. Грановская\*\*, Т. Я. Гуляева, В. Г. Петрищева, И. А. Готтман

Методами термо- и криометрии изучены метасоматические апокарбонатные талькиты отнурского типа Белорецкой тальконосной провинции в периферии Белорецкого метаморфического комплекса. По составу включений в оталькованных магнезитах и кварце установлены температуры метасоматической перекристаллизации в интервале 140–290°C. Растворы имели переменную минерализацию на уровне 2–14% экв. NaCl, обусловленную присутствием реликтового эвапоритового флюида в магнезитах и разбавляющим влиянием пресной метаморфической воды. По анализу относительно высокотемпературных трехфазных включений, содержащих CO<sub>2</sub>, выполнена оценка общего давления флюида в интервале 834–1803 бар при максимальных единичных значениях 2213 бар. Вероятность такого давления подтверждается теоретическими расчетами. Рассчитанное давление соответствует глубинам 5–6 км процесса метасоматической перекристаллизации при образовании талькитов, при условном принятии приоритета литостатического давления.

Апокарбонатные талькиты Белорецкой тальконосной провинции, выявленной в ходе поисковых работ 2013–2015 гг. в Белорецком метаморфическом комплексе и его обрамлении [Савченко и др., 2015], формируют рудные тела двух типов: 1 – “отнурского” – небольшие тела моноталькитов; 2 – “кызылташского” – крупные стратиформные тела талькитов (включают > 75% талька), содержащих примесь хлорита, хлорит-тальковые и тальк-хлоритовые камни (включают 55–75% талька) [Татаринов и др., 1975]. Среди тальксодержащих пород обоих типов широко распространены и тальк-карбонатные камни. Талькиты отнурского и кызылташского типов приурочены к месторождениям и проявлениям кристаллического магнезита Белорецкой и Сюрюньзякской групп месторождений соответственно Южно-Уральской магнезитовой провинции [Анфимов, Бусыгин, 1982]. В данной работе приведены результаты исследования флюидных включений в карбонатных минералах и синрудном кварце из пород, вмещающих талькиты отнурского типа.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Проявления магнезитов и талькитов приурочены к хлорит-мусковит-биотитовой зоне метаморфизма в северной периферии Белорецкого метаморфического комплекса. В ядре комплекса метаморфизм достигает гранулитовой фации [Алексеев

и др., 2006, 2009]. Характерной особенностью метаморфического комплекса являются ярко выраженный зональный характер регионального метаморфизма и постепенная закономерная смена метаморфических фаций в разрезе. Магнезитовые тела Белорецкой группы, с которыми связаны талькиты отнурского типа, развиваются среди доломитов в пределах карбонатных пачек авзянской свиты среднего рифея. Кроме того, в авзянской свите здесь известны и прослои мраморизованных известняков. Магнезиты Белорецкой группы относятся к семирбратскому подтипу (тип – кристаллические магнезиты) и имеют среднекристаллическое сложение (1–3 мм) с гранобластовой структурой. Магнезиты Сюрюньзякской группы, с которыми связаны талькиты кызылташского типа, приурочены к нижнерифейским отложениям и относятся к саткинскому подтипу кристаллических магнезитов с крупнокристаллической стрелчатой структурой [Крупенин, 2005]. Магнезиты Белорецкой группы образуют тела пластообразной и сложной формы мощностью до десятков метров, содержат примесь доломита в интерстициях магнезитовых кристаллов, имеют секущие метасоматические контакты с вмещающими мелкозернистыми доломитами (0.1–0.5 мм) через зону густой вкрапленности.

Типичным представителем рудных талькитов отнурского типа служит проявление Абовское. Карбонатные прослои залегают среди кварцевослюдистых, полевошпат-кварцево-слюдистых и

\* ООО “Уральское горно-геологическое агентство”, г. Уфа

\*\* Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

углеродисто-кварцево-слюдистых сланцев. Доломиты и магнезиты залегают в ядрах опрокинутых сопряженных антиклинальных и синклиналиных складчатых структур, характеризующихся резкой ундуляцией осей. Центральная часть Абововского проявления тальцитов пространственно совпадает с одноименной залежью магнезитов. Процесс оталькования развивался и по магнезитам, и по доломитам. Тальк образует как отдельные прожилки различной мощности в магнезите и доломите, так и массивные агрегаты чешуйчатого сложения (талькиты). Прослои вмещающих серицит-хлоритовых и полевошпат-кварц-хлорит-серицитовых сланцев подвержены оталькованию незначительно. В гнездах встречается белый, кремевый тальк, в прожилках – светло-серый. Апробированные прогнозные ресурсы на Абововском проявлении по категории  $P_2$  составили, тыс. т: тальцитов – 90, талькового камня – 1030. Менее интенсивно процессы оталькования данного типа развиты на проявлениях Новодоломитовое и Отнурок.

#### МЕТОДЫ

Для оценки параметров метасоматических стадий изменения карбонатных пород, в том числе процессов талькообразования, выполнено комплексное изучение с акцентом на анализ флюидных включений (ФВ). Петрографическое описание шлифов выполнено в ООО “УГГА”, микроскоп Carl Zeiss Amplitval. В ЦКП “Геоаналитик” (ИГГ УрО РАН) выполнены термический и рентгенографический анализ проб (Diamond TG-DTA (PerkinElmer), XRD-7000 (Shimadzu)) и исследования криометрии и последующей термометрии каждого из найденных ФВ по стандартной методике в препаратах (полированных с двух сторон пластинок), в диапазоне температур от  $-196$  до  $+600^\circ\text{C}$  на термокриостолке LinkamTHMSC-600, уста-

новленном на микроскопе ZeissAxiolab с дальнефокусными объективами Olympus LMPLFLN50x, LMPLFLN100x; минеральный состав препаратов контролировался на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы Jeol. Гомогенизация флюидных включений в кварце проводилась в лаборатории изотопной геологии Института геологии и геохронологии докембрия РАН с использованием микроскопа Leica DMLP и среднетемпературной термокамеры Leica с диапазоном измерений до  $360^\circ\text{C}$  и видеосистемой GVC. Для нескольких проб кварца в ФГАУО ВПО ЮФУ осуществлены вакуумная декрепитация и газовая хроматография на вакуумном декрептометре ВД-5, газовом хроматографе CROM-5. Микрозондовый анализ самих минералов и твердых фаз трехфазных флюидных включений проведен там же на растровом электронном микроскопе VEGA II LMU (фирмы Tescan) с использованием системы энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT и волнодисперсионного микроанализа INCA WAVE 700 фирмы Oxford Instruments Analytical.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Из Отнурского проявления изучен образец (скважина 101, глубина 70 м) контакта магнезита (10110-1) и доломита (10110-2), не подверженный оталькованию; из Абововского проявления – два образца оталькованного (скважина 304, глубина 43 м) и доломитизированного (скважина 304, глубина 19 м) магнезита и образец гигантокристаллического кальцита (канавка 330); а также образец мрамора (скважина 204, глубина 12 м) из проявления Новодоломитовое. Образцы из Отнурского проявления (табл. 1) представлены (обр. 10110-1) магнезитом (97%), а обр. 10110-2 – доломитом (97%). Пробы из Абововского проявления сложены: (обр. 30443) магнезитом (77%) доломитизиро-

**Таблица 1.** Минеральный состав препаратов Отнурского сектора Белорецкой тальконосной провинции (рентгенофазовый и термический анализ)

№ п/п	№ пробы	Mgs	FeO, %	Dol	Cal	Tc	Qtz	Chl	Ms	ОВ	Сумма
Отнурок											
5	10110-1	97	–	3	–	–	–	Сл.	Сл.	–	100
6	10110-2	3	–	97	–	–	–	–	–	–	100
Абововское											
1	30419	24	6–7 1.3–2.0	62	–	–	10	3	Сл.	–	99
2	30443	77	3	11	–	8	Сл.	3	–	–	99
3	33019	–	–	5	95	–	Сл.	–	–	–	100
Новодоломитовое											
4	20412	–	–	–	93	–	Сл.	–	6 Bi?	0.5 ( $460^\circ\text{C}$ ) 0.5 ( $630^\circ\text{C}$ )	100

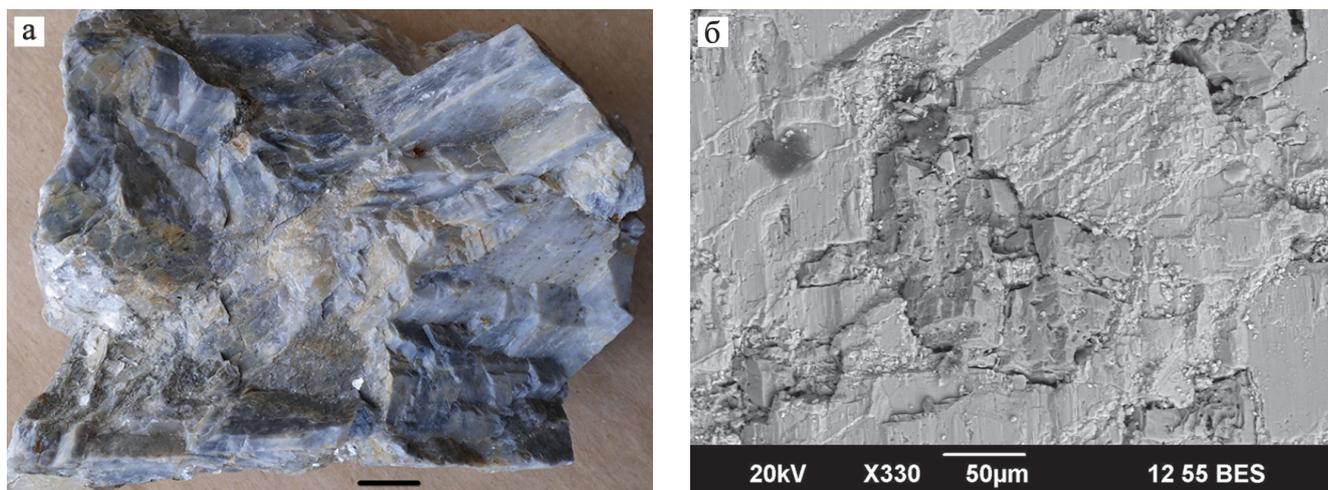
Примечание. Mgs – магнезит; содержание FeO, % в генерациях магнезита по расчетным данным рентгеновского анализа; Dol – доломит; Cal – кальцит; Tc – тальк; Qtz – кварц; Chl – хлорит; Ms – мусковит; Bi – биотит; ОВ – органическое вещество, выгорающее при разных температурах.

ванными (11%) и оталькованными (8%) с примесью магнезиального хлорита (3%) и (обр. 30419) доломитом (62%) с примесью магнезита (24%), сильно окварцованным (10%), хлоритизированным (3%), (обр. 33019) гигантокристаллическим кальцитом с примесью доломита (5%). Крупнокристаллический кальцитовый (93%) мрамор из проявления Новодоломитовое (обр. 20412) содержит небольшую примесь биотита (6%) и тонкодисперсной органики.

По степени идиоморфизма, характеру взаимоотношений между минералами, структурам коррозии и замещения в Отнурском секторе надежно устанавливается следующая последовательность выделения карбонатных минералов: кальцит (известняк) → доломит → магнезит → Fe-доломит → кальцит крупнокристаллический. Оталькование развивается по магнезиту и доломиту, сопровождается активным развитием прожилков и мелких гнезд кварца в карбонатных минералах и наложенных идиоморфных выделений кальцита. Изометричные кристаллы магнезита часто имеют зональное строение [Калистратова и др., 2016]: по данным микрозондирования в центральной части зерен магнезит соответствует составу  $(\text{Fe}_{0.03}\text{Mg}_{0.97})[\text{CO}_3]$ , в то время как в краевой части –  $(\text{Fe}_{0.07}\text{Mg}_{0.93})[\text{CO}_3]$ , или представлены кристаллами с переменным содержанием железа (0–7%). Доломит в магнезите имеет две генерации, в более поздней по данным СЭМ незначительно выше содержание железа. Крупнокристаллический кальцит обладает спорадической примесью магнезита, содержание MgO в среднем (71 определение – здесь и далее без  $\text{CO}_2$ ) 1.24%, изменяется от 0 до 10.44%, содержание FeO в среднем 0.11, варьирует от 0 до 2.86%. Резорбированные реликты кристаллов доломита в кальците (рис. 1) имеют нестехиометрический состав и повышенное содержание железа. Содержание MgO в доломите в сред-

нем (41 определение) 41.05%, меняется от 21.63 до 47.11%, среднее содержание CaO – 56.41%, FeO в среднем 2.25%, колебания от 1.52 до 4.92%. Кроме талька и кварца, в составе метасоматических образований присутствуют алюмосиликаты: мусковит, биотит, хлорит. По данным петрографического изучения пород мусковит образовался раньше других слюдястых минералов. Биотит и хлорит всегда представляют собой магнезиальные разновидности минералов. Присутствие во вмещающих породах хлорита отрицательно сказывается на процессах талькогенерации, так как на его формирование уходит значительная часть общего магнезия.

Трудоемкость изучения ФВ в карбонатных породах обусловлена их малым количеством, мелкими размерами (на границе разрешения метода, 4–10 мкм). Кроме того, в карбонате с высоким дву-преломлением трудно изучать изменения состояния ФВ при замораживании и нагреве. Часть включений в обр. 30419 исследована в препарате кварца с магнезитом. Изученные ФВ признаны первично-вторичными, т. е. предполагается, что они соответствуют по стадии образования той кристаллической фазе, в пределах которой наблюдались. Средние значения термобарометрических исследований каждого из семи препаратов помещены в табл. 2. Температура гомогенизации газовой-жидких включений условно принята за температуру минералообразования и варьирует в интервале средних значений 134–290°C, при абсолютных значениях от 131 до 337°C. Соленость включений не очень высокая, колеблется от 4 до 14 % экв. NaCl и слабо зависит от температуры гомогенизации (рис. 2). Гетерогенность насыщенности включений газовой фазой (от 20 до 60%) предполагает соответствие температур гомогенизации и минералообразования, по крайней мере относительно данной стадии пе-



**Рис. 1.** Крупнокристаллический кальцит (обр. 33019) последней генерации.

а – общий вид, линейка 1 см; б – реликтовые кристаллы резорбированного доломита в кальците, СЭМ.

**Таблица 2.** Средние значения параметров флюидных включений карбонатных метасоматитов Белоречской тальконосной провинции

№ п/п	T <sub>гом</sub>	T <sub>эвт</sub>	T <sub>пл</sub>			T <sub>гом</sub> CO <sub>2</sub>	C% NaCl	Состав		d <sub>фл</sub> , г/см <sup>3</sup>	P <sub>фл</sub> , бар	Запол., %	Размер, мк
			льда	газ-г.	CO <sub>2</sub>			соли	газ				
<i>Отнурок</i>													
10110-1 (2) Mgs	217	-50.4	–	7.3	–	17.3	5.1	CaCl <sub>2</sub> +	CO <sub>2</sub>	1.15	1036	25	9.4
10110-1 (2) Mgs	165	-50.3	-2.4	–	–	–	4.0	CaCl <sub>2</sub> +	H <sub>2</sub> O	–	–	20	7.0
10110-2 (2) Dol	290	-48.3	–	7.8	58.6	–	4.4	CaCl <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	–	–	30	7.1
10110-2 (3) Dol	145	-50.9	-5.7	–	–	–	8.8	CaCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	–	–	10	7.9
<i>Аболовское</i>													
33019 (1) Cal	242	-50.5	–	7.2	-58.2	6.3	5.3	CaCl <sub>2</sub> +	CO <sub>2</sub>	0.92	146	70	7.2
33019 (4) Cal	196	-51.9	–	9.4	-58.3	3.8	1.4	CaCl <sub>2</sub> +	CO <sub>2</sub>	0.94	107	38	8.4
33019 (3) Cal	134	-50.6	-2.7	–	–	–	4.5	CaCl <sub>2</sub> +	H <sub>2</sub> O	–	–	10	9.0
Обр. 30443-а													
30443 (6) Mgs	290	-49.0	–	4.0	-58.0	25.0	10 (9–12)	CaCl <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	1.00	1106	27	7.0
30443 (8) Mgs	168	-48.0	-7.0	–	–	–	11 (10–12)	CaCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	1.00	9	12	9.0
Обр. 30419-с													
30419 (9) Mgs + Qtz	239	-48.0	–	5.0	-57.0	2.0	8 (4–14)	CaCl <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	1.00	1803	38	7.0
30419 (3) Mgs + Qtz	146	–	-5.0	–	–	–	8 (7–9)	CaCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	1.00	5	17	7.0
Обр. 30419-а													
30419 (3) Mgs	226	-48.0	–	6.0	-57.0	27.0	7 (6–10)	CaCl <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	1.00	834	30	11.0
30419 (9) Mgs	164	-48.0	-7.0	–	–	–	10 (8–13)	CaCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	1.00	9	12	11.0
<i>Новодоломитовое</i>													
Обр. 20412													
20412 (3) Cal	161	-46.0	-5.0				8 (7–9)	CaCl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	1.00	8	14	5.0

Примечание. № п/п – номер препарата (количество включений), состав исследованных препаратов: Mgs – магнезит, Qtz – кварц, Cal – кальцит; T<sub>гом</sub> – температура полной гомогенизации; T<sub>эвт</sub> – температура эвтектики; T<sub>пл</sub> льда – температура конца плавления льда; T<sub>пл</sub> газ-г. – температура плавления газ-гидрата с углекислотой; T<sub>пл</sub> CO<sub>2</sub> – температура плавления углекислоты; T<sub>гом</sub> CO<sub>2</sub> – температура гомогенизации CO<sub>2</sub>; C% NaCl – соленость, мас. % экв. NaCl; d<sub>фл</sub> – плотность флюида; P<sub>фл</sub> – давление флюида.

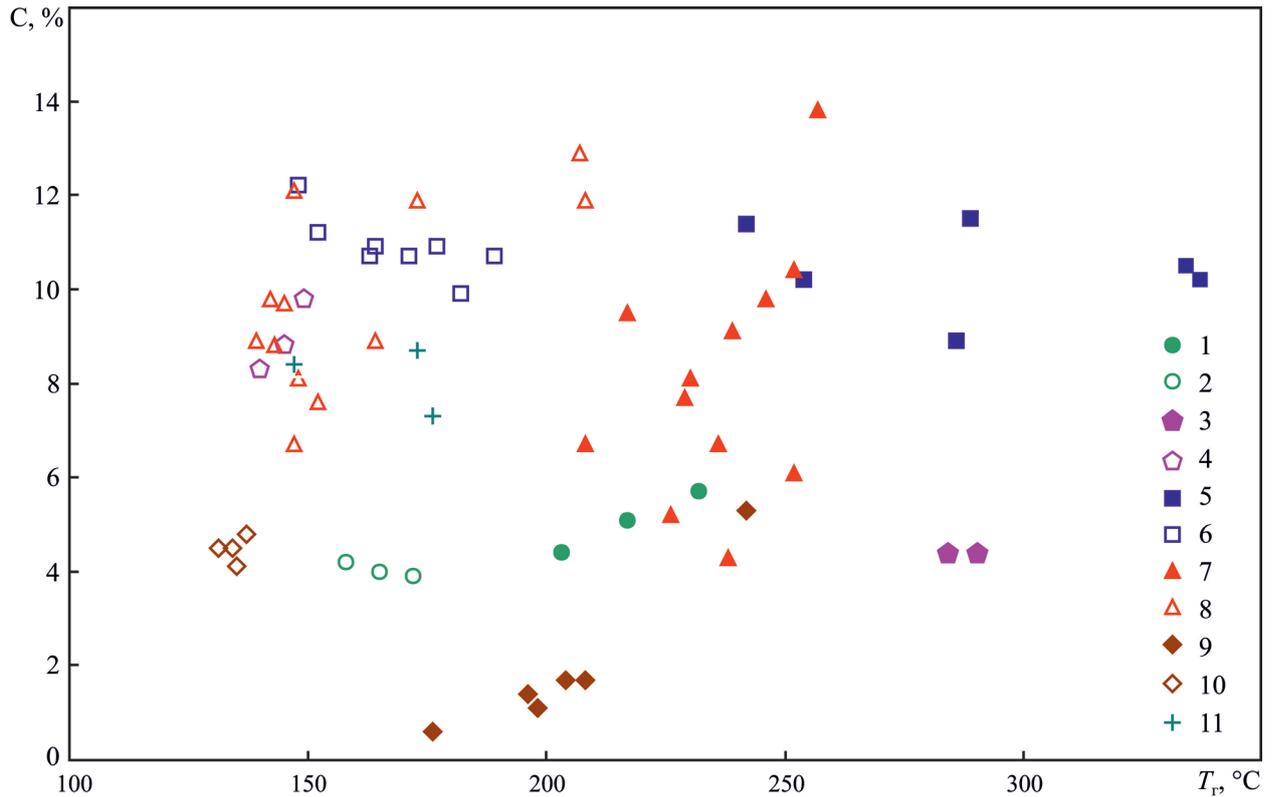
рекристаллизации, поскольку указывает на градиент давления, связанный как с образованием газовых пузырьков (вскипанием), так и активным минералообразованием. В магнезите (обр. 30443) соленость самая высокая, в среднем около 10%. В магнезит-доломитовых препаратах обнаружены относительно высокотемпературные трехфазные включения с CO<sub>2</sub> (рис. 3), в низкотемпературных отмечается только вода. Граница между водно-углекислотными и чисто водными включениями в магнезит-тальковых породах около 200°C, в кальците около 180°C. Мрамор не содержит высокотемпературных включений, соответственно и CO<sub>2</sub> в нем нет, только водные.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ распределения ФВ, их солености и температуры гомогенизации позволяет сделать некоторые выводы относительно стадийности минералообразования. Наименее измененными (первичными по времени образования) являются доломит (10110-2) и магнезит (10110-1) Отнурского месторождения. Однако ФВ имеют низкую соленость (на уровне 4–5%), что нехарактерно для магнезитов и метасоматических доломитов, образованных из захороненных эвапоритовых рассолов [Крупенин, Гараева, 2015]. Кроме того, ФВ в них содержат

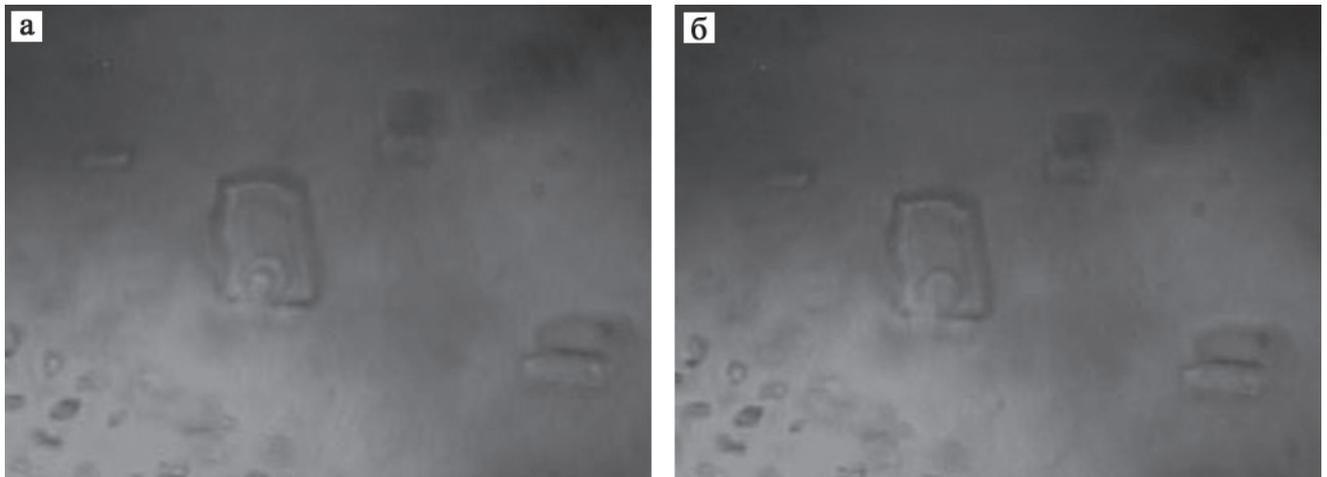
CO<sub>2</sub>, что предполагает воздействие более поздними флюидами, связанными с этапом талькообразования, поскольку при кремнистом метасоматозе по доломиту и магнезиту возникают тальк и углекислота. Температура гомогенизации ФВ в магнезите ниже (203–232°C), чем в доломите (280–290°C), что выглядит необычно [Крупенин, Кольцов, 2017] и, возможно, связано с малым количеством проб, как, впрочем, и с особенностями магнезиального метасоматоза. Низкотемпературные ФВ (гомогенизация при 158–172°C) в магнезитах (без CO<sub>2</sub>) также имеют пониженную соленость на уровне 4%, а в доломитах низкотемпературные ФВ (140–149°C) показывают соленость на уровне 9–10%, что может быть следствием их первичности (этап образования магнезита).

Более измененными являются оталькованные (30443) и окварцованные магнезиты (30419). В них ФВ имеют наиболее высокую соленость (до 12 и 14% NaCl экв. соответственно), но диапазон изменения солености широкий. В окварцованном соленость снижается до 4%, т. е. магнезиты подвержены значительным изменениям (доломитизации, окварцеванию и оталькованию) и перекристаллизации с разбавлением флюида относительно стадии метасоматического образования магнезита. Это косвенно указывает на низкую соленость метаморфического флюида. Обе пробы также содержат



**Рис. 2.** Температура гомогенизации ( $T_h$ ) и соленость (C, %) в % NaCl экв. во флюидных включениях карбонатных метасоматитов в талькитах отнурского типа.

Залитые значки обозначают включения с  $\text{CO}_2$ , незалитые – включения без  $\text{CO}_2$ : 1, 2 – магнезит (10110-1); 3, 4 – доломит (10110-2); 5, 6 – доломитизированный и оталькованный магнезит (30443); 7, 8 – интенсивно доломитизированный и окварцованный магнезит (30419); 9, 10 – гигантокристаллический кальцит с реликтами доломита (33019); 11 – мрамор (20412).



**Рис. 3.** Гомогенизация углекислоты в трехфазном флюидном включении (обр. 30419-а).

а – ФВ содержит жидкую и газообразную углекислоту, температура +10.0°C; б – ФВ содержит только жидкую углекислоту, температура +27.3°C (гомогенизация  $\text{CO}_2$  при 27.1°C).

жат среднетемпературные включения с  $\text{CO}_2$ , а также низкотемпературные (139–182°C без  $\text{CO}_2$ ), причем в оталькованном магнезите температуры гомогенизации ФВ выше (242–337°C), чем в окварцо-

ванном (226–257°C). Граничной между ФВ с  $\text{CO}_2$  и без нее является интервал 203–208°C. Можно предполагать, что этот рубеж – около 200°C – служит для данного объекта началом интенсивного образо-

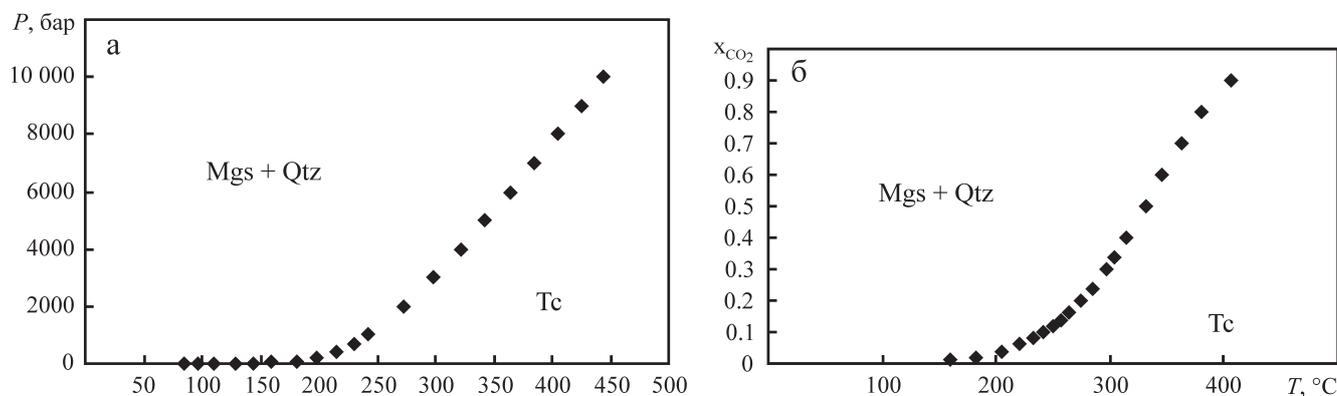
вания талька с активным выделением углекислоты в продуктах реакций кремнистого флюида с магнетитом и доломитом. Гигантокристаллический кальцит, являющийся самым поздним минералом в этой метасоматической колонке, также содержит среднетемпературные ФВ (176–208°C) с  $\text{CO}_2$  и низкотемпературные (131–137°C) без нее. Здесь температура существования углекислоты несколько снижается, вероятно, во времени (образование кальцита при остывании гидротермальной системы, регрессивный этап). Отдельно в этом исследовании стоит проба мрамора, содержащего, несмотря на высокую степень перекристаллизации, только низкотемпературные (147–176°C), без  $\text{CO}_2$ , ФВ, имеющие соленость 7–8%. Предполагается, что данный образец, отобранный из толщи глинистых мраморов, характеризует флюид, представляющий реликтовый захороненный среднерифейский рассол с примесью пресного метаморфического флюида, который способствовал мраморизации реликтового глинистого известняка, не затронутого процессами ни магнезиального метасоматоза при образовании магнетита в рифее, ни оталькования в венде.

Многочисленные кварцевые жилы и прожилки, сопровождающие тальковую минерализацию, секут доломитовые и магнетитовые залежи. Кварц прозрачный, хрусталевидный, в зальбандах жил присутствуют оторочки, гнезда талька и кальцита. Наличие сингенетичного хрусталя в доломитах и магнетитах является поисковым признаком талька. В кварце присутствует большое количество первичных ФВ размером от 2 до 20 мкм, равномерно распределенных в объеме минерала-хозяина, часто по его зонам роста и не связанных с микротрещинами [Грановская, 2016]. Включения обычно имеют форму негативных призматических кристаллов, иногда овальную, трубчатую, клиновидную. По фазовому составу преобладают газовой-жидкие ФВ с содержанием газовой фазы 7–10%. Их гомогенизация происходит в жидкую фазу при нагревании до 160–

200°C. Характерно совместное присутствие в единой системе газовой-жидких, углекислотно-водных и водно-углекислотных включений. Содержание жидкой углекислоты во включениях может достигать от 20 до 80 об. %. Температуру гомогенизации флюидных включений можно рассматривать как нижний предел температуры минералообразования. Данные вакуумной декрепитации показывают температурный интервал 180–260°C с максимумом газовой-жидкой фазы при 220–240°C, наиболее вероятно соответствующий массовой декрепитации первичных включений в кварце. Остальные эффекты связаны либо с разложением примесей, либо с  $\alpha \rightarrow \beta$  трансформациями кварца. По результатам газохроматографического анализа синрудного кварца во ФВ преобладают вода и углекислый газ, причем количество  $\text{CO}_2$  достигает иногда 50–70%.

По водно-углекислотным включениям выполнена оценка общего давления флюида (суммарно и жидкой, и газообразной фаз). По температуре гомогенизации углекислых включений определена плотность углекислоты на линии равновесия жидкость–пар [Вакулович, Алтунин, 1965]. Давление определялось по сингенетичным существенно газовым и газовой-жидким включениям в момент гетерогенизации флюида. Последняя подтверждается одновременным присутствием включений как с низкой насыщенностью газовой фазой (гомогенизация в жидкость), так и с высокой (гомогенизация в газ). Оценка давления  $\text{CO}_2$  проводилась с использованием программы Flincor [Brown, 1989]. Расчетные средние величины давлений расположились в интервале 834–1803 бар при максимальных единичных значениях 2213 бар (см. табл. 2). Соленость указанных включений варьирует в пределах 4–14 мас. % NaCl экв.

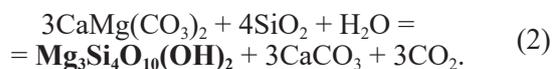
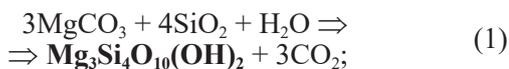
Теоретические расчеты свидетельствуют (рис. 4), что поля устойчивости талька, образующегося в результате реакции магнетита с кремнеземом (реакция (1)), имеют место при повышении темпе-



**Рис. 4.** Расчетные равновесные температуры образования талька ( $T_c$ ) в результате реакции взаимодействия магнетита (Mgs) и кварца (Qtz) [Акинфиев, 2017].

а – при  $x_{\text{CO}_2} = 0.1$ ; б – при  $P = 1000$  бар.

ратуры, сопровождающемся снижением давления и концентрации углекислоты во флюиде [Акинфиев, 2017]:



Например, при содержании углекислоты 0.1 мол. долей тальк по реакции (1) при давлении 1 кбар образуется при 240°C, а при давлении 0.1 кбар – при 190°C. С дальнейшим увеличением температуры давление возрастает очень быстро [Акинфиев, 2017]. При температуре 300°C давление при  $x_{\text{CO}_2} = 0.1$  составляет порядка 2.5 кбар. Поскольку повышение концентрации углекислоты в растворе резко снижает устойчивость талька, то его метасоматическое образование тормозится выделением в продуктах реакции  $\text{CO}_2$ , являющейся здесь ингибитором. Последующее талькообразование возможно только при дальнейшем повышении температуры. Образование тел тальцитов отнурского типа указывает на поступление кремнистых растворов с низким содержанием углекислоты и ее резкое увеличение в результате метасоматоза. В то же время теоретические расчеты показывают вполне сопоставимые результаты с данными по давлению, полученными при изучении трехфазных водно-углекислотных включений. Кроме того, можно предполагать талькообразование на прогрессивной стадии метаморфизма при повышении температуры и формирование кальцита на регрессивной стадии.

Последовательность минералообразования по данным изучения в препаратах, представленных доломитизированным магнезитом, подверженным магнезиально-кремнекислотному метасоматозу с образованием апокарбонатных тальцитов, выглядит следующим образом. Предполагается, что при первом этапе метасоматоза (магнезиальному по известнякам авзянской свиты) был сформирован доломит-магнезитовый агрегат. По геологическим данным этот этап связан со средневерхнерифейской историей региона [Крупенин, 2004]. Для месторождений магнезита Белорецкой группы примесь доломита является постоянной. На втором этапе, при магнезиально-кремнекислотном метасоматозе, произошло широкое образование кварца в виде прожилков, гнезд, а также талька, масштабное развитие которого было приурочено именно к участкам, обогащенным магнезитом, в соответствии с реакцией (1). При образовании талька по доломиту, согласно реакции (2), сформировались идиоморфные кристаллы кальцита, содержащие реликты резорбированных кристаллов доломита. В процессе метасоматического замещения магнезиальных карбонатов тальком резко увеличилось количество углекислоты. Оценка давления по  $\text{CO}_2$  позволяет определить возможную глу-

бину процесса метасоматической перекристаллизации при образовании тальцитов, принимая условно приоритет литостатического давления и не учитывая стрессовое давление. Если ориентироваться на средние цифры по трем препаратам, содержащим  $\text{CO}_2$ , то колебания давления варьируют от 0.8 до 1.8 кбар. Это отвечает глубинам 3–5 км, по максимальным оценкам до 6–7 км (по максимальному давлению из пластинки кварца 2213 бар в обр. 30419). Образование тальцитов связывается с поздними стадиями формирования Белорецкого метаморфического комплекса, образующего термальный купол. По геологическим данным его развитие связано с Тиманской орогенцией и рассматривается как проявление зонального метаморфизма барроуского типа [Алексеев и др., 2009; Пучков, 2010]. Поскольку талькообразование проходило по отложениям авзянской свиты среднего рифея, то к моменту регрессивной стадии развития Белорецкого термального купола, предположительно в позднем венде–кембрии, толща вышележащих пород над отложениями авзянской свиты представляла собой весь разрез верхнего рифея (около 5 км) и, возможно, какой-то разрез нижнего венда. Следовательно, рассчитанная глубина около 5–6 км вполне могла соответствовать геологическим условиям образования апокарбонатных тальцитов. Температурные условия 200–300°C образования тальцитов, установленные при изучении ФВ в карбонатных породах и кварце, также отвечают глубинам 5–6 км.

Таким образом, при образовании апокарбонатных тальцитов в периферии Белорецкого метаморфического комплекса магнезиально-кремнистый метасоматоз происходил по карбонатной магнезиальной матрице при участии низкотемпературных гидротермальных растворов с образованием талькового оруденения в интервале температур 200–300°C – талькообразование на прогрессивной стадии метаморфизма при повышении температуры. Растворы имели переменную минерализацию на уровне 2–14% экв. NaCl, обусловленную присутствием реликтового эвапоритового флюида в магнезитах и разбавляющим влиянием пресного метаморфического флюида. На этапе метасоматического замещения магнезиальных карбонатов тальком растворы обогатились углекислотой, которая в результате затормозила дальнейший процесс оталькования с выделением большого количества кварцевых прожилков, обогащенных водно-углекислотными включениями. Кальцит формировался на последней регрессивной стадии. Величина литостатического давления на этапе оталькования оценивается 1.8 Кбар, что соответствует глубине погружения 5–6 км.

*Работа выполнена в рамках темы № АААА-А18-118052590027-2 государственного задания ИГГ УрО РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акинфиев Н.Н.* Методические указания и контрольные задания по физической химии для студентов заочного отделения: учеб.-практ. пособ. М.: МГРИ; РГГРУ, 2017. 42 с.
- Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Галиева А.Р., Тимофеева Е.А.* Метаморфическая геология западного склона Южного Урала. Уфа: Гилем, 2006. 212 с.
- Алексеев А.А., Ковалев С.Г., Тимофеева Е.А.* Белорецкий метаморфический комплекс. Уфа: ИГ УНЦ РАН; ООО “ДизайнПолиграфСервис”, 2009. 208 с.
- Анфимов Л.В., Бусыгин Б.Д.* Южноуральская магнетитовая провинция. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. 70 с.
- Вакулович М.П., Алтунин В.В.* Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Атомиздат, 1965. 455 с.
- Грановская Н.В.* Термобарогеохимические особенности синрудного кварца на проявлениях апокарбонатного талька Башкирского антиклинория // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: мат-лы Научных чтений памяти П.Н. Чирвинского. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2016. № 19. С. 18–23.
- Калистратова Е.О., Грановская Н.В., Кочергин А.В.* Минералого-петрографические особенности тальковмещающих пород Аболовского и Азналинского проявлений (республика Башкортостан) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: мат-лы XI межрегион. науч.-практ. конф. Уфа: Дизайн-Пресс, 2016. С. 89–91.
- Крупенин М.Т.* Минерагеническое и геодинамическое значение среднерифейского времени на западном склоне Южного Урала // Докл. РАН. 2004. Т. 399, № 4. С. 503–505.
- Крупенин М.Т.* Геолого-геохимические типы и систематика РЗЭ месторождений Южно-Уральской магнетитовой провинции // Докл. РАН. 2005. Т. 405, № 2. С. 243–246.
- Крупенин М.Т., Гараева А.А.* Источники флюидов для метасоматических магнетитов Исмакаевского месторождения Южно-Уральской провинции (термокриометрия флюидных включений) // Литосфера. 2015. № 2. С. 133–139.
- Крупенин М.Т., Кольцов А.Б.* Геологическое строение, состав и физико-химическая модель формирования месторождений кристаллического магнетита Южного Урала // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59, № 1. С. 17–40.
- Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Савченко В.А., Кочергин А.В., Калистратова Е.О. и др.* Особенности локализации апокарбонатных тальков белорецкой площади (Республика Башкортостан) // Промышленные минералы: проблемы прогноза, поисков, оценки и инновационные технологии освоения месторождений: мат-лы междунар. науч.-практ. конф. 9–13 нояб. 2015 г. Казань: Изд. дом “Казанская недвижимость”, 2015. С. 175–178.
- Татаринов П.М., Карякин А.Е., Голиков А.С. и др.* Курс месторождений твердых полезных ископаемых. Л.: Недра, 1975. 631 с.
- Brown P.E.* FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineralogist. 1989. V. 74. P. 1390–1393.