

Плавление графитсодержащего двуслюдяного сланца при 500 МПа и 750–800 °С: к вопросу о внутренних источниках CO₂ при коровом анатексисе

Ходоревская Л. И.^{id}, Сафонов О. Г., Некрасов А. Н., Тушканова С. А., Спивак А. В.^{id}

Институт экспериментальной минералогии им. академика Д. С. Коржинского РАН, Черноголовка, Московская область, khodorevskaya@mail.ru

Аннотация. Данная работа является продолжением исследований, представленных ранее (Сафонов и др., 2025). Ее целью явилось изучение возможности генерации CO₂ за счет графитсодержащих метапелитов в интервале температур 750–800 °С и давлении 500 МПа, реализуемых в условиях метаморфизма в коре. При указанных Р-Т параметрах метапелит начинает плавиться. Образование расплавов происходит за счет плавления мусковита и зависит от концентрации графита в системе. При содержаниях 0–6 мас. % графита образующиеся расплавы соответствуют высокоглиноземистым щелочно-известковым S-гранитам. При большем содержании графита в исходной породе расплав не образуется. Повышение температуры солидуса объясняется уменьшением фугитивности O₂, связанной с увеличением содержания графита. Метод КР-спектроскопии не выявил наличие CO₂ или карбонатных фаз в закаленном расплаве. Таким образом, эксперименты показали, что, в отличие от более высоких температур (900 °С; Сафонов и др., 2024, 2025) при 800 °С на ранних стадиях частичного плавления роль графитсодержащих метапелитов в качестве внутренних источников CO₂ незначительна.

Ключевые слова: метапелит, графит, гранитоидные расплавы, дегидратационное плавление, эксперимент.

An experimental study of the melting of graphite-containing two-mica schist at 500 MPa and 750–800°C. Toward internal sources of CO₂ in the Earth's crust

Khodorevskaya L. I.^{id}, Safonov O. G., Nekrasov A. N., Tushkanova S. A., Spivak A. V.^{id}

D. S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy RAS, Chernogolovka Moscow district, khodorevskaya@mail.ru

Abstract. This study is a continuation of the experiments presented earlier (Safonov et al., 2024, 2025). Its objective is to study the possibility of CO₂ generation due to graphite-bearing metapelites in the temperature range of 750–800 °C and a pressure of 500 MPa, realized under crustal metamorphic conditions. The experimental results showed that, at the above parameters, metapelite begins melting. Melt formation occurs due to muscovite melting and depends on the graphite content in the system. At 0–6 wt. % graphite content, the resulting melts correspond to peraluminous alkali-calcic S-granites. At the graphite content in the starting rock is above 6 wt. %, no melting occurs. The increase of the solidus temperature is explained by a decrease of the O₂ fugacity associated with an increase in the graphite content. Raman spectroscopy of the quenched melts did not reveal the presence of CO₂ or carbonate phases. Thus, experiments show that at 800 °C, i. e. at the early stages of partial melting, the role of graphite-bearing metapelites as internal sources of CO₂ is highly suppressed.

Keywords: metapelites, carbon, granitoid melts, dehydration melting, experiment.

Введение

Большая часть CO₂, участвующего в высокотемпературном метаморфизме, возникает при дегазации мантийных магм, т. е. обуславливается внешним источником по отношению к метаморфическим породам. Однако существуют и внутренние источники CO₂, связанные с изначальным присутствием карбонатных минералов и/или графита в протолите (Holloway, 1976; Lowenstern, 2001; Hollister, 1988; Cesare et al., 2005; Nicoli et al., 2022). Механизм образования CO₂ в графитсодержащих протолитах, широко обсуждаемый в литературе (Kadik, Lukanin, 1985; Hollister, 1988; Cesare et al., 2005, 2007; Nicoli et al., 2022 и др.), связан с появлением O₂, образующимся за счет восстановления Fe³⁺ → Fe²⁺ в слюдах и/или за счет H₂O, выделяющейся в ходе реакций разложения и/или частичного плавления пород. Экспериментальные данные, подтверждающие или опровергающие

этот механизм, немногочисленны. Так Д. Лондон и др. (London et al., 2012) отмечали появление CO_2 как результат окисления графита при взаимодействии гранитного расплава с графитсодержащим мусковит-кварцевым сланцем при 750–800 °С и 200 МПа. В работах (Ходоревская и др., 2024; Сафонов и др., 2025) представлены результаты экспериментального исследования частичного плавления безплагиоклазового гранат-двуслюдяного сланца с графитом при 500 МПа и 900 °С. Было показано, что необходимый для окисления графита кислород, получаемый при восстановлении Fe^{3+} до Fe^{2+} в перитектических Fe-Mg минералах (шпинель, ильменит, ортоамфибол), окисляет графит в исходной навеске. Образующийся CO_2 не только является преобладающим компонентом свободной флюидной фазы, сопровождающей образующиеся расплавы, но и частично растворяется в расплаве в виде молекулярного CO_2 и комплексов CO_3^{2-} с щелочными и щелочноземельными катионами. Перемещение подобных расплавов в верхние горизонты коры приводит к отделению CO_2 , т. е. в условиях (ультра)высокотемпературного метаморфизма графитсодержащие метапелиты действительно могут служить эффективным внутренним источником CO_2 .

Данная работа является продолжением исследований, представленных ранее (Сафонов и др., 2025) и призвана подтвердить или опровергнуть возможность генерации CO_2 за счет графитсодержащих метапелитов в более широком температурном интервале.

Эксперименты проводились на установках высокого газового давления при 750–800 °С, $P = 500$ МПа. В золотые ампулы помещалось 25–40 мг сланца, тщательно перемешанного с графитом. Сланец состоял из мусковита (43 %), кварца (30 %), биотита (13 %), граната (10 %), ~1.5 % апатита и ~1.5 % ильменита (минеральный и химический состав породы представлен в работе (Митяев и др., 2022)). Количество добавленного графита составляло от 0 до 37 мас. % от массы навески сланца. Ампулы заваривались и выдерживались в режиме опытов 7 суток. Летучесть кислорода в опытах не контролировалась, предполагалось, что этот параметр буферировался фазовыми ассоциациями. После опытов ампулу вскрывали, извлеченную твердую навеску помещали в контейнер, заливали эпоксидной смолой, полировали и анализировали. Составы минеральных фаз изучались методом локального рентгеноспектрального микроанализа с применением сканирующих электронных микроскопов «CamScan MV2300» (VEGA TS 5130MM) и Tescan VEGA-II XMU, оснащенных энерго-дисперсионными спектрометрами INCA Energy 450. Спектры КР пузырей и расплавов измерялись в геометрии обратного рассеяния на установке, включающей спектрометр Acton SpectraPro-2500i с охлаждаемым до -70 °С детектором CCD Pixis2K и микроскоп Olympus. Подробное описание процедуры экспериментов, анализ продуктов опытов, изучение составов минеральных фаз и исследования КР-спектров стекол представлены в наших предыдущих работах (Ходоревская и др., 2024; Сафонов и др., 2025).

Результаты экспериментов

В отличие от 900 °С (Сафонов и др., 2025), в продуктах опытов, проведенных при 750 и 800 °С, сохраняются минералы исходного метапелита: гранат (Grt), биотит (Bt_1), ильменит (Ilm), кварц (Qz), мусковит (Ms), апатит (Ap). Новообразованные фазы после опытов при 750 °С представлены калиевым полевым шпатом (Kfs) и кордиеритом (Crd) при высоком содержании графита (табл. 1). При 800 °С в опытах К1, К3 и К2 появляются многочисленные мельчайшие скопления Fe-содержащей шпинели (Spl). В силу малых размеров (рис. 1а) определить состав шпинели не удалось. Кроме того, в продуктах опытов наряду с Bt_1 присутствуют мелкие листочки новообразованного биотита Bt_2 . Bt_2 , как и Spl, появляется в основном при содержаниях графита менее 7-9 мас.%. В этих же образцах отмечен Kfs и закаленный расплав (Gl), пленки которого окаймляют зерна кварца (Qz). В закаленном расплаве, количество которого составляет первые проценты, присутствуют игольчатые кристаллы силлиманита (Sil). С увеличением содержания графита в системе выше 9 мас. % (опыт D-8, табл. 1) в продуктах опытов исчезает шпинель, а расплав визуально не отмечается. Тем не менее, не исключено присутствие пленок расплава, поскольку минералы после опытов довольно плотно сцементированы между собой (рис. 1б). Однако образцы после опытов с высоким содержанием графита (табл. 1) представляют собой порошки с не связанными зернами, что, по-видимому, свидетельствует об отсутствии плавления (рис. 1 в).

Таблица 1. Содержание графита в исходных смесях и фазовый состав продуктов реакции при $T = 750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Table 1. Graphite content in the starting mixtures and the phase composition of the run products at $T = 750\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$

№ опыта	$T, ^{\circ}\text{C}$	Мас. % графита	Минеральные ассоциации после опыта
D-3	750	20	Qtz+ Bt ₁ +Ms+Gl+Kfs+Ap+Grt+Ilm+Sil
D-5	750	29	Qtz+ Bt ₁ +Ms+Gl?+Kfs+Ap+Grt +Ilm+Crd
D-4	750	37	Qtz+ Bt ₁ +Ms+Gl?+ Kfs+Ap+Grt+Ilm+Crd
K-1	800	0	Qtz+Bt ₁ + Bt ₂ +Kfs+Ap+Grt+Ilm+Sil+Gl±Spl
K-3	800	2.6	Qtz+ Bt ₁ + Bt ₂ +Gl+Kfs+Ap+Grt+Ilm+Sil±Spl
K-2	800	5.6	Qtz+ Bt ₁ + Bt ₂ +Kfs+Ap+Grt+Ilm+Sil±Gl
D-8	800	9.2	Qtz+ Bt ₁ ±Gl +Kfs+Ap+Ms+Grt+Ilm+Sil
K-4	800	10	Qtz+Bt ₁ +Ms+Kfs+Ap+Grt+Ilm
D-9	800	13.9	Qtz+Bt ₁ +Kfs+Ap+Ms+Grt+Ilm
K-5	800	18.3	Qtz+Bt ₁ +Kfs+Ap+Ms+Grt+Ilm
D-10	800	25	Qtz+Bt ₁ +Ms+Kfs+Ap+Grt+Ilm

Несмотря на то, что графит тщательно и равномерно перемешивался с исходной породой, в продуктах опытов наблюдались его обособления в виде изолированных округлых скоплений (рис. 1 б в рамке).

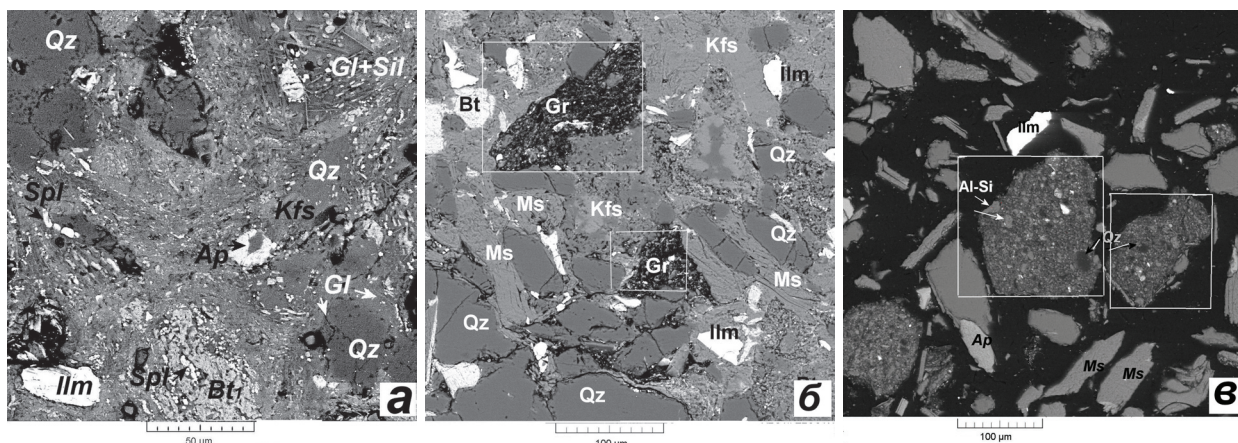


Рис. 1. BSE изображения продуктов экспериментов.

а – мелкие кристаллы новообразованной герцинит-магнетитовой шпинели и Bt₂, пленки Gl, а также участки Gl+Sil, Qz, Ilm (опыт K-1); б – отсутствие мелких, ярких Spl и Bt₂, крупные кристаллы Ms, Bt₁ (опыт D-8); в – порошкообразный вид образца после эксперимента из-за отсутствия даже пленочного расплава, крупные слюды Ms, Bt (опыт K-5), в рамках рис. 1 б; в – графит с включениями кристаллических фаз

Fig. 1. BSE images of the products of the experimental run.

а – bright small crystals of newly formed hercynite-magnetite spinel and Bt₂, rims of Gl, as well as areas of Gl+Sil, Qz, Ilm (exp. K-1); б – absence of small, bright Spl and Bt₂, large crystals of Ms, Bt₁, (exp. D-8); в – powdery structure of the sample due to the absence of even a thin-layer melt, large micas of Ms, Bt (exp. K-5), in the frames of Fig. 1 б; в – graphite with crystalline inclusions

Состав фаз в продуктах экспериментов

Мусковит в продуктах опытов содержит 10 мол. % парагонитового минала, содержание селадонитового минала варьирует, возрастая от 10 до 40 мол. % при содержаниях графита от 0 до 25 мас. %.

Биотит, как Bt_1 , так и новообразованный Bt_2 характеризуются близкой железистостью 0.60–0.70 при всех содержаниях графита. Содержание Ti в Bt_1 несколько выше по сравнению с исходным (0.13–0.17 ф. е.). В Bt_2 содержание Ti достигает 0.30–0.32 ф. е., при этом Bt_2 с высоким содержанием Ti появляются только при низких (менее 5 мас. %) содержаниях графита (рис. 2).

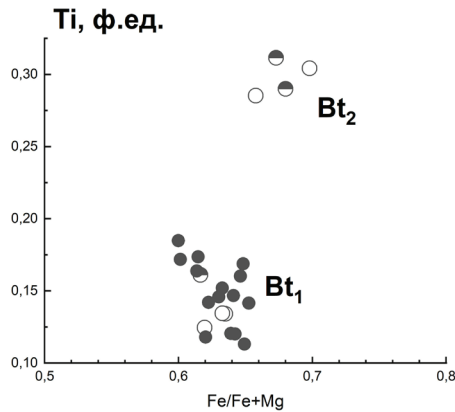


Рис. 2. Соотношения $Fe/(Fe+Mg) - Ti$ (ф. е.) в биотитах Bt_1 и Bt_2 : 1 – без графита, 2 – 5.6 мас. % графита, 3 – 10–25 мас. % графита
 Fig. 2. $Fe/(Fe+Mg) - Ti$ (a.p.f.u.) in biotites Bt_1 and Bt_2 : 1 – without graphite, 2 – 5.56 % graphite, 3 – 10–25 % graphite

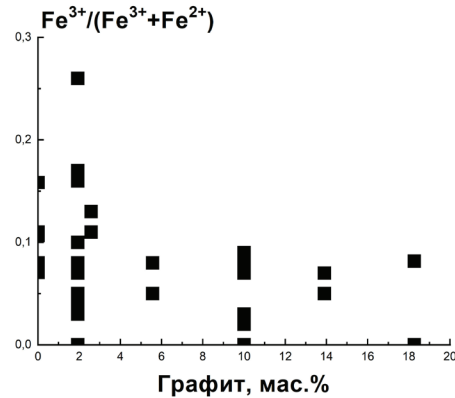


Рис. 3. Отношение $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ в ильмените в продуктах экспериментов при различном исходном содержании графита
 Fig. 3. Variations of $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ in ilmenite in the run products with various graphite content

Гранат в продуктах всех опытов близок по составу $Gr_{0.05}Alm_{0.95-1.0}Prp_{0.03}$.

Ильменит в сланце до опытов содержит ≈ 46 мас. % FeO с соотношением $Fe^{3+}/\Sigma Fe \approx 0.05$. После опытов это отношение при малом содержании графита несколько возрастает (до значений 0.12 ± 0.10), затем снижается, оставаясь примерно на постоянном уровне при содержании графита более 6 мас. % (рис. 3).

В калиевом полево шпате увеличивается содержание альбитовой составляющей по мере увеличения концентрации графита.

Железистость кордиерита составляет 0.48–0.53.

Составы расплавов.

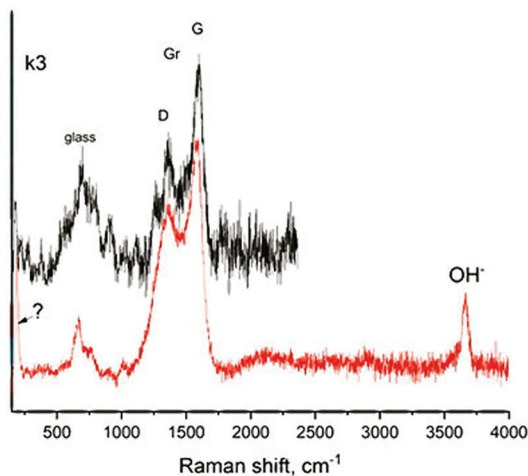


Рис. 4. КР-спектры стекол в продуктах опыта К-3

Fig. 4. Raman spectra of glasses in the products of experiment K-3

Определить состав закаленного расплава удалось только в продуктах опытов К-1 и К-3. Расплавы соответствуют высокоглиноземистым щелочно-известковым S-гранитам: $A/CNK = 1.40-1.50$, $A/NK = 1.50-1.60$. В остальных опытах расплава либо нет (опыты D-9, K-5, D-10), либо из-за малого количества его состав корректно определить не удалось.

КР-спектроскопия стекол

Вследствие малых объемов закаленного расплава, ни в одном образце не были отмечены газовые пузыри. В КР-спектрах стекла (рис. 4) присутствуют пики OH^- групп в интервале $3450-3650 \text{ cm}^{-1}$ (Frezzotti et al., 2012), а также пики D (1444 cm^{-1}) и G (1580 cm^{-1}) неупорядоченного графита (Reich, Thomsen, 2004). Пики, относящиеся к CO_2 , CO или CH_4 , не выявлены.

Обсуждение результатов

Различное содержание графита в исходной навеске определяет изменение фугитивности кислорода (f_{O_2}) в опытах, которое, с одной стороны определяет наличие или отсутствие расплава в опытах, с другой – определяет вероятность появления CO_2 в составе флюидной фазы.

Проведенные эксперименты показывают, что при $800\text{ }^\circ\text{C}$ начинает образовываться расплав за счет инконгруэнтного плавления мусковита с образованием калиевого полевого шпата и силлиманита. По данным А. С. Митяева и др. (2022), реакция плавления может быть записана как $Ms + Qz + Bt_1 = Bt_2 + Kfs + Sil + Spl + \text{расплав}$ (1). При относительно низких исходных содержаниях графита (менее 6–8 мас. %, табл. 1) области расплава хорошо заметны. При более высоких содержаниях графита существуют, по-видимому, только пленки стекла, цементирующие минералы, а при содержаниях графита более 10 мас. % признаков плавления нет. Отсутствие плавления при высоком содержании графита может быть связано с замедлением реакций между фазами из-за уменьшения площади их взаимных контактов. Однако в участках экспериментальных образцов, свободных от скоплений графита, прямые контакты между минералами не нарушены. Поэтому, в экспериментах с выдержкой 7–10 суток при температуре $800\text{ }^\circ\text{C}$ могло достигаться состояние, близкое к равновесному. Изменения состава фаз, наличие и отсутствие расплава, связано не с кинетическими факторами, а с переменным исходным содержанием графита, определяющим f_{O_2} в опытах. Появление расплава в опытах с малым содержанием графита (опыты К-1, К-3) и его исчезновение при больших содержаниях графита объясняется уменьшением f_{O_2} (Scaillet, Macdonald, 2001; и др.).

Вероятность образования CO_2 в опытах связана с реакциями восстановления Fe_2O_3 до FeO : $2Fe_2O_3$ (в биотите) + $Gr = 4FeO$ (в продуктах реакций) + CO_2 , (Сафонов и др., 2025; Hansen et al., 1987; Hollister, 1988; Cesare et al., 2005, 2007; Nicoli et al., 2022). Образующийся CO_2 может растворяться в расплаве и/или кордиерите (Chu, Ague, 2013). Такую же роль вполне может играть также мусковит, в котором часто Fe^{3+} значительно преобладает над Fe^{2+} (Dyar et al., 2002; Forshaw, Pattison, 2021).

Индикатором изменения f_{O_2} в системе является варьирующая валентность минералов, в частности соотношение Fe^{3+}/Fe^{2+} в Fe-Mg минералах. Однако согласно результатам экспериментов, отношение $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Fe^{2+})$ в биотите практически не меняется с увеличением концентрации графита, поэтому он не может служить источником O_2 и стимулировать образование CO_2 при заданных Т-Р параметрах. В ильмените отношение $Fe^{3+}/\Sigma Fe$ (или X_{Ilm}/X_{Hem}) несколько снижается по мере увеличения концентрации графита (рис. 2, табл. 2), что свидетельствует об уменьшении f_{O_2} с ростом содержания графита. Следуя зависимости соотношения X_{Ilm}/X_{Hem} от f_{O_2} (напр. Buddington, Lindsley, 1964) lgf_{O_2} в продуктах опытов варьировала от -14.5 до -16 (табл. 2). Данные значения f_{O_2} нельзя считать абсолютными равновесными значениями: эти оценочные значения отражают усиление восстановленных условий с ростом содержания графита.

Табл. 2. Соотношение $X(Ilm)/X(Hem)$ и lgf_{O_2} в ильменитах после опытов

Table 2. Ratio of $X(Ilm)/X(Hem)$ and lgf_{O_2} in ilmenites after experiments

№ опыта	Содержание графита	$X(Ilm)$	$X(Hem)$	lgf_{O_2}
К1	0.00	0.87	0.09	< -14.5
7D	1.93	0.89	0.08	< -14.5
К3	2.58	0.86	0.11	-14
К2	5.56	0.91	0.06	< -15
К4	10.00	0.89	0.04	-16
К5	18.26	0.95	0.04	-16

Область устойчивости графита, находящегося в равновесии с CO_2 (реакция $C + O_2 = CO_2$) при $800\text{ }^\circ\text{C}$, ограничивается значениями $lgf_{O_2} \leq -15.4$ (напр. Данилов, 2005). Таким образом, в большинстве проведенных опытов в силу низких значений f_{O_2} был стабилен графит. CO_2 не образовывался.

вался или его образование было незначительно. Результаты КР-спектроскопии закаленных расплавов полностью подтверждают этот вывод.

Таким образом, эксперименты показали, что на ранних стадиях частичного плавления роль графитсодержащих слюдяных метapelитов в качестве внутренних источников CO_2 сильно подавлена. Она возрастает при более высоких температурах, при которых слюды полностью нестабильны (Сафонов и др., 2025).

Выводы

1. При 800 °С и 500 МПа отмечена начальная стадия плавления метapelита за счет инконгруэнтного плавления мусковита и частично биотита, которая зависит от концентрации графита в системе. При содержаниях до 6 мас. % графита образующиеся расплавы соответствуют высокоглиноземистым щелочно-известковым S-гранитам: $A/CNK = 1.40–1.50$, $A/NK = 1.50–1.60$. При исходном содержании графита более 10 мас. % расплав не образуется. Повышение температуры солидуса объясняется уменьшением фугитивности O_2 , связанной с увеличением содержания графита.

2. КР-спектроскопия не выявила наличие CO_2 в закаленном расплаве, что объясняется очень малым количеством образующегося расплава и низкой $f\text{O}_2$ в опытах.

3. Экспериментально подтверждено, что на ранних стадиях частичного плавления графитсодержащие метapelиты практически не функционируют как внутренние источники CO_2 . Их способность к генерации углекислоты проявляется исключительно при температурах выше 900 °С, вне области устойчивости слюд. Только в этих условиях данные породы могут рассматриваться как внутренние источники CO_2 .

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы гос. задания ИЭМ РАН № FMUF-2022-0004.

Литература

1. Данилов Б. С. Физико-химическое моделирование влияния флюидного режима на процессы метаморфизма базитов: дис... канд. геолог.-минерал. наук: 25.00.04. – Иркутск. Изд-во: СО РАН, Ин-т зем. коры, 2005. 145с.
2. Митяев А. С., Сафонов А. Г., Варламов Д. А., ван Ринен Д. Д., Сердюк А. А., Аранович Л. Я. Частичное плавление бесплагноклазового гранат-двуслюдяного метapelита как модель образования ультракалиевых кислых магм в условиях континентальной коры // Доклады РАН. 2022. Т. 507, № 2. С. 95–103.
3. Сафонов О. Г., Ходоревская Л. И., Спивак А. В., Косова С. А., Вирюс А. А., Япаскурт В. О., Воронин М. В. Графит как внутренний источник CO_2 при коровом анатексисе: экспериментальное исследование плавления графитсодержащего гранат двуслюдяного сланца при 500 МПа и 900 °С // Петрология. 2025. № 6. С. 118–148. DOI (англ.): 10.1134/S0869591125700286.
4. Ходоревская Л. И., Сафонов О. Г., Спивак А. В., Косова С. А. К вопросу о возможных источниках CO_2 при высокотемпературном метаморфизме в континентальной коре. I. Экспериментальное исследование частичного плавления графитсодержащего гранат-двуслюдяного сланца при 500 МПа и 900 °С // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2024. № 21. С. 322–329. DOI.org/10.31241/FNS.2024.21.038.
5. Buddington A. F., Lindsley D. H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents // Journal of Petrology. 1964. V. 5, No. 2. P. 310–357.
6. Cesare B., Meli S., Nodari L. et al. Fe^{3+} reduction during biotite melting in graphitic metapelites: another origin of CO_2 in granulites // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2005. V. 149. P. 129–140.
7. Cesare. B., Maineri C., Toaldo A. B. Immiscibility between carbonic fluids and granitic melts during crustal anatexis: a fluid and melt inclusion study in the enclaves of the Neogene Volcanic Province of SE Spain // Chemical Geology. 2007. V. 237. P. 433–449. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.07.013>.
8. Chu X., Ague J. J. Phase equilibria for graphitic metapelite including solution of CO_2 in melt and cordierite: implications for dehydration, partial melting and graphite precipitation // Journal of Metamorphic Geology. 2013. V. 31. P. 843–862. <https://doi.org/10.1111/jmg.12047>.
9. Dyar M. D. et al. Fe^{3+} and Fe^{2+} partitioning among silicates in metapelites: A synchrotron micro-XANES study // American Mineralogist. 2002. V. 87, No. 4. P. 514–522.
10. Forshaw J. B., Pattison D. R. M. Ferrous/ferric ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$) partitioning among silicates in metapelites // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2021. V. 176, No. 9. P. 63.

11. Frezzotti M. L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // *Journal of Geochemical Exploration*. 2012. V. 112. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>.
12. Hansen E. C., Janardhan A. S., Newton R. C. et al. Arrested charnockite formation in southern India and Sri Lanka // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987. V. 96. P. 225–244.
13. Hollister L. S. On the origin of CO₂-rich fluid inclusions in migmatites // *Journal of Metamorphic Geology* 1988. V. 6. P. 467–474. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1988.tb00434.x>.
14. Holloway J. R. Fluids in evolution of granitic magmas: Consequence of finite CO₂ solubility // *Geological Society of America Bulletin*. 1976. V. 87. P. 1513–1518. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1976\)87<1513:FI TEOG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1976)87<1513:FI TEOG>2.0.CO;2).
15. Kadik A. A., Lukanin O. A. Paths for mantle outgas sing during melting: changes in fluid composition and conditions in basaltic magmas during migration to the surface // *International Geology Review*. 1985. V. 27. P. 573–586. <https://doi.org/10.1080/00206818509466445>.
16. London D., Morgan G. B. VI, Acosta-Vigil A. Experimental simulations of anatexis and assimilation involving metapelite and granitic melt // *Lithos*. 2012. P. 292–307. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.04.006>.
17. Lowenstern J. B. Carbon dioxide in magmas and implications for hydrothermal systems. *Mineralium Deposita*. 2001. V. 36. P. 490–502.
18. Nicoli G., Borghini A., Ferrero S. The carbon budget of crustal reworking during continental collision: Clues from nanorocks and fluid inclusions // *Chemical Geology*. 2022. V. 608. P. 121025. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121025>.
19. Reich S., Thomsen C. Raman spectroscopy of graphite // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2004. V. 362, No. 1824. P. 2271–2288.
20. Scaillet B., Macdonald R. A. Y. Phase relations of peralkaline silicic magmas and petrogenetic implications // *Journal of Petrology*. 2001. V. 42, No. 4. P. 825–845. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.4.825>.