ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2022, том 507, № 2, с. 253–261

ПЕТРОЛОГИЯ

УДК 552.13

ЧАСТИЧНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ БЕСПЛАГИОКЛАЗОВОГО ГРАНАТ-ДВУСЛЮДЯНОГО МЕТАПЕЛИТА КАК МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ УЛЬТРАКАЛИЕВЫХ КИСЛЫХ МАГМ В УСЛОВИЯХ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

© 2022 г. А. С. Митяев[1,2,*], О. Г. Сафонов[1,2,3], Д. А. Варламов[1], Д. Д. ван Ринен[3], А. А. Сердюк[1], академик РАН Л. Я. Аранович[4,1]

Поступило 15.08.2022 г.
После доработки 22.08.2022 г.
Принято к публикации 25.08.2022 г.

С целью изучения образования ультракалиевых гранитных расплавов типа S в условиях континентальной коры проведены эксперименты по частичному плавлению гранат-двуслюдяного метапелита (с акцессорными апатитом и ильменитом), не содержащего плагиоклаз, при давлениях 6, 10 и 15 кбар в температурном интервале 700–900°C. Плавление породы определяется рядом реакций перитектического плавления, в зависимости от давления, и начинается при температуре между 750 и 800°C при 6 кбар, около 800°C при 10 кбар и около 850°C при 15 кбар, отражая положительный dP/dT-наклон солидуса. Указанные *PT*-условия плавления, составы минеральных ассоциаций и гранитных расплавов, появляющихся при плавлении метапелита без плагиоклаза, близки к тем, что образуются при плавлении плагиоклазсодержащих двуслюдяных ассоциаций. Однако главная характеристика состава расплава, образующегося при плавлении метапелита, не содержащего плагиоклаз, – это высокое содержание K_2O (7–8 мас. %) при отношении K_2O/Na_2O > 8–10. Эти характеристики близки к составам ультракалиевых риолитов типа S, образующихся в тектонических обстановках растяжения.

Ключевые слова: лейкократовые граниты, аляскиты, ультракалиевые риолиты, континентальная кора, анатексис, гранат-двуслюдяной метапелит, дегидратационное плавление, эксперимент

DOI: 10.31857/S2686739722601703

Лейкократовые гранитоиды и риолиты типа S являются продуктами эволюции расплавов, которые генерируются в ходе частичного плавления коровых метаморфических субстратов, обогащенных мусковитом и биотитом [1–6]. Образование таких расплавов контролируется разнообразными реакциями инконгруэнтного плавления с участием слюд. Согласно наиболее принятым моделям эти реакции проходят без участия свободного флюида (dehydration melting) [1–8]. Эти реакции обычно обладают положительными dP/dT-наклонами и в интервале давлений 6–15 кбар охватывают температуры 700–900°C [7, 8]. Температуры начала этих реакций и количество расплава, образующегося в их результате, определяется преимущественно количественными отношениями мусковита и биотита, а также магнезиальностью ассоциаций. Экспериментальные исследования частичного плавления двуслюдяных ассоциаций ([1–6], а также обзоры [7, 8]) при параметрах континентальной коры проводились в синтетических или природных системах, содержащих различное количество плагиоклаза. Анализ результатов этих работ демонстрирует, что

[1]*Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского Российской академии наук, Черноголовка, Россия*
[2]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3]*Департамент геологии, Университет Йоханнесбурга, Йоханнесбург, ЮАР*
[4]*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: classic_ten@mail.ru*

Таблица 1. Параметры и продукты экспериментов по частичному плавлению бесплагиоклазового двуслюдяного метапелита

Номер эксперимента	Давление, кбар	Температура, °C	Продукты экспериментов
K5-6/700	6	700	Видимых изменений нет
K5-6/750	6	750	Видимых изменений нет
K5-6/800	6	800	Kfs + Bt + Sil + Spl + стекло
K5-6/850	6	850	Kfs + Bt + Sil + Spl + стекло
K5-6/900	6	900	Kfs + Bt + Sil + Spl + стекло
K5-10/700	10	700	Видимых изменений нет
K5-10/750	10	750	Bt (*)
K5-10/800	10	800	Kfs + Bt + Sil + стекло
K5-10/850	10	850	Kfs + Bt + Sil + Grt + стекло
K5-10/900	10	900	Kfs + Bt + Sil + Grt + стекло
K5-15/850	15	850	Bt + Grt + Rt + стекло
K5-15/900	15	900	Kfs + Ky + Grt + Rt + стекло

Примечание: (*) Расплав в образце отсутствует; на контактах мусковита с гранатом и ильменитом образуется более титанистый биотит. Индексы минералов: Ab – альбит, Alm – альмандин, Ap – апатит, Bt – биотит, Crd – кордиерит, Grt – гранат, Ilm – ильменит, Kfs – калиевый полевой шпат, Ky – кианит, L – расплав, Ms – мусковит, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Rt – рутил, Sil – силлиманит, Spl – шпинель. Параметры составов: X_{Mg} (в гранате) = Mg/(Mg + Fe + Mn + Ca), X_{Ca} (в гранате) = = Ca/Mg/(Mg + Fe + Mn + Ca), MALI = $K_2O + Na_2O$–CaO в расплаве, ASI = мол. % $Al_2O_3/[Na_2O + K_2O + CaO]$ в расплаве.

плагиоклаз непосредственно участвует в перитектических реакциях плавления, а его состав и количественные отношения к слюдам и кварцу оказывают заметное влияние как на *PT*-условия этих реакций, так и на состав гранитных расплавов, прежде всего на содержания Al_2O_3 и Na_2O в них. Расплавы, образующиеся при плавлении двуслюдяных ассоциаций с плагиоклазом, хорошо воспроизводят составы лейкократовых гранитов и аляскитов, содержащих не менее 2 мас. % Na_2O при отношении $K_2O/Na_2O < 3$ (напр., [9]). Однако помимо этих гранитоидов известны ультракалиевые риолиты с очень высоким отношением K_2O/Na_2O при содержании $Na_2O < 1$ мас. %, которые некоторыми исследователями относятся к продуктам высокотемпературного анатексиса в коре (напр., [10–12] и ссылки в этих работах). Возможность образования таких магм в ходе частичного плавления субстратов, бедных плагиоклазом, подтверждается результатами изучения включений ультракалиевых расплавов в минералах мигматитов [13]. Согласно экспериментам [2] даже в системе, содержащей всего 4 об. % плагиоклаза при 40 об. % слюд, плагиоклаз является ведущей фазой при инициации плавления. При этом образуются расплавы с $K_2O/Na_2O < 7.5$ при 0.8–3 мас. % Na_2O. Эти результаты побуждают к экспериментальному исследованию двуслюдяных ассоциаций без плагиоклаза как возможных источников ультракалиевых кислых магм. Экспериментальному изучению плавления такой минеральной ассоциации посвящена данная работа.

В качестве стартового материала для экспериментов был выбран образец гранат-двуслюдяного сланца из зеленокаменного пояса Гияни (Сазерленд) кратона Каапвааль, ЮАР. Порода состоит из мусковита (43%), кварца (30%), биотита (13%) и граната (10%), содержит ~1.5% апатита (до 3 мас. % F) и ~1.5% ильменита. В центральных частях порфиробластов граната встречаются включения ставролита. Валовый состав породы, измеренный методом РФА (в ИГЕМ РАН), следующий (мас. %): SiO_2 – 56.57, TiO_2 – 1.76, Al_2O_3 – 21.51, Fe_2O_3 – 10.38, MnO – 0.285, MgO – 0.91, CaO – 1.43, Na_2O – 0.36, K_2O – 5.44, P_2O_5 – 1.05.

Эксперименты проводились на установке цилиндр-поршень (ЦП-40) в ИЭМ РАН в интервале температур 700°C–900°C при 6 и 10 кбар и 800–900°C при 15 кбар (табл. 1). В опытах использовались ячейки из NaCl (+ пирекс-стекло для опы-

тов выше кривой плавления NaCl) диаметром 3/4 и 1/2 дюйма со вставками из керамики MgO и графитовыми нагревателями. Образец породы был измельчен до порошка размерностью около 5 мкм. Порошок породы помещался в золотые цилиндрические ампулы с толщиной стенки 0.2 мм, заваренные с помощью электродуговой сварки PUK-04 в среде аргона. Длительность опытов составляла 5–7 сут. Летучесть кислорода в опытах специально не контролировалась, предполагая, что этот параметр буферировался фазовыми ассоциациями в продуктах опытов.

Исследования составов продуктов экспериментов выполнялись с использованием сканирующего электронного микроскопа "Tescan" VEGA-II XMU, оснащенного энергодисперсионной аналитической приставкой "INCA"-Energy-350 и волновой аналитической приставкой Oxford "INCA" Wave 700, в ИЭМ РАН. Во избежание потерь Na и исключения диффузионных эффектов в пленках стекла на контактах с кристаллическими фазами, стекла анализировались сканированием по площадкам 20 × 20–180 × 180 мк в наиболее обширных участках на удалении от кристаллов. Количество расплава в продуктах опытов оценивалось на основе обработки и анализа изображений, полученных на сканирующем электронном микроскопе, с помощью программного комплекса ImageJ.

Эксперименты при 6 кбар. При 700 и 750°C в породе не отмечены какие-либо изменения. В продуктах опыта при 800°C отсутствует мусковит, но появляется около 15 об. % стекла в виде пленок вокруг зерен граната, ильменита, апатита и кварца (рис. 1 а). На контактах стекла с зернами альмандинового граната образуются цепочки мелких зерен герцинит-магнетитовой шпинели, а в стекле присутствуют листочки новообразованного биотита, игольчатые кристаллы силлиманита и таблитчатые кристаллы калиевого полевого шпата (рис. 1 а). Фазовые взаимоотношения в продуктах опыта при 800°C указывают на реакцию

$$\begin{aligned} &Ms + Qz + Bt_1 + Grt + (Ilm) = \\ &= Bt_2 + Sil + Kfs + Spl + L, \end{aligned} \quad (1)$$

где Bt_1 – первичный биотит, Bt_2 – новообразованный биотит, а твердый раствор белой слюды (Ms) содержит алюмоселадонитовый и парагонитовый компоненты. При 850°C биотит все еще стабилен, причем его магнезиальность и содержание TiO_2 возрастают. При этой температуре и далее при 900°C количество шпинели, образующейся за счет граната, возрастает, а в продуктах опытов присутствует большее количество калиевого полевого шпата, чем при 800°C. В зернах ильменита появляются ламели (структуры распада) и внешние каймы, обогащенные FeO и V_2O_3.

Эксперименты при 10 кбар. При 700°C в породе не выявлены какие-либо изменения. При 750°C в биотите появляются выделения богатой Fe фазы (вероятно, магнетита), а в зернах ильменита – ламели, обогащенные гематитом. На контакте мусковита с гранатом и ильменитом образуется более богатый Ti биотит. Стекло в продуктах опыта при 750°C отсутствует. Оно появляется в продуктах опыта при 800°C в виде пленок, образующих агрегаты с новообразованным биотитом вокруг листочков мусковита (рис. 1 б). Также, как и при 6 кбар, магнезиальность и содержание TiO_2 в новообразованном биотите увеличиваются. Текстурных признаков участия граната в реакциях плавления в продуктах опыта нет. Так что начало частичного плавления при 10 кбар и 800°C можно представить в виде реакции

$$Ms + Qz + Bt_1 + (Ilm) = Bt_2 + Sil + Kfs + L, \quad (2а)$$

которая аналогична реакции в работе [5]

$$Ms + Qz = Bt + Sil + Kfs + L. \quad (2б)$$

В отличие от эксперимента при 6 кбар и 800°C, в продуктах которого отсутствует мусковит и присутствует примерно 15 об. % расплава (табл. 1), в продуктах опыта при 10 кбар и 800°C мусковит присутствует, а количество расплава не превышает 5 об. % (рис. 1 б). При 850 и 900°C исчезновение мусковита и уменьшение количества биотита привели к образованию бóльшего количества расплава (20–25 об. %). Активное разложение биотита и образование новых более магнезиальных ($X_{Mg} = 0.26–0.30$; $X_{Ca} = 0.03–0.04$) зон на зернах граната (рис. 1 в) указывают на реакцию [2, 5, 6]:

$$Bt + Qz + Sil = Grt + Kfs + L. \quad (3)$$

Новообразованный гранат характеризуется содержанием TiO_2 до 0.7 мас. % (в отличие от изначального граната, содержащего <0.01 мас. % TiO_2), что обусловлено участием Ti-компонента биотита и ильменита в реакциях плавления.

Эксперименты при 15 кбар. Плавление породы при 15 кбар начинается при 850°C, но при этой температуре в ней все еще устойчивы мусковит и биотит (рис. 1 г). Тонкие пленки расплава появляются в контактах мусковита, граната, кварца и биотита. На зернах граната образуются внешние более магнезиальные каймы, а в стекле – отдельные изометричные кристаллики новообразованного граната (рис. 1 г). В сравнении с гранатом при 10 кбар он характеризуется меньшей магнезиальностью ($X_{Mg} = 0.18–0.23$), но большим содержанием гроссуляровой составляющей ($X_{Ca} = 0.05–0.06$). Он также содержит TiO_2, указывая на участие Ti-содержащих фаз в реакциях плавления. Наряду с гранатом в стекле присутствуют си-

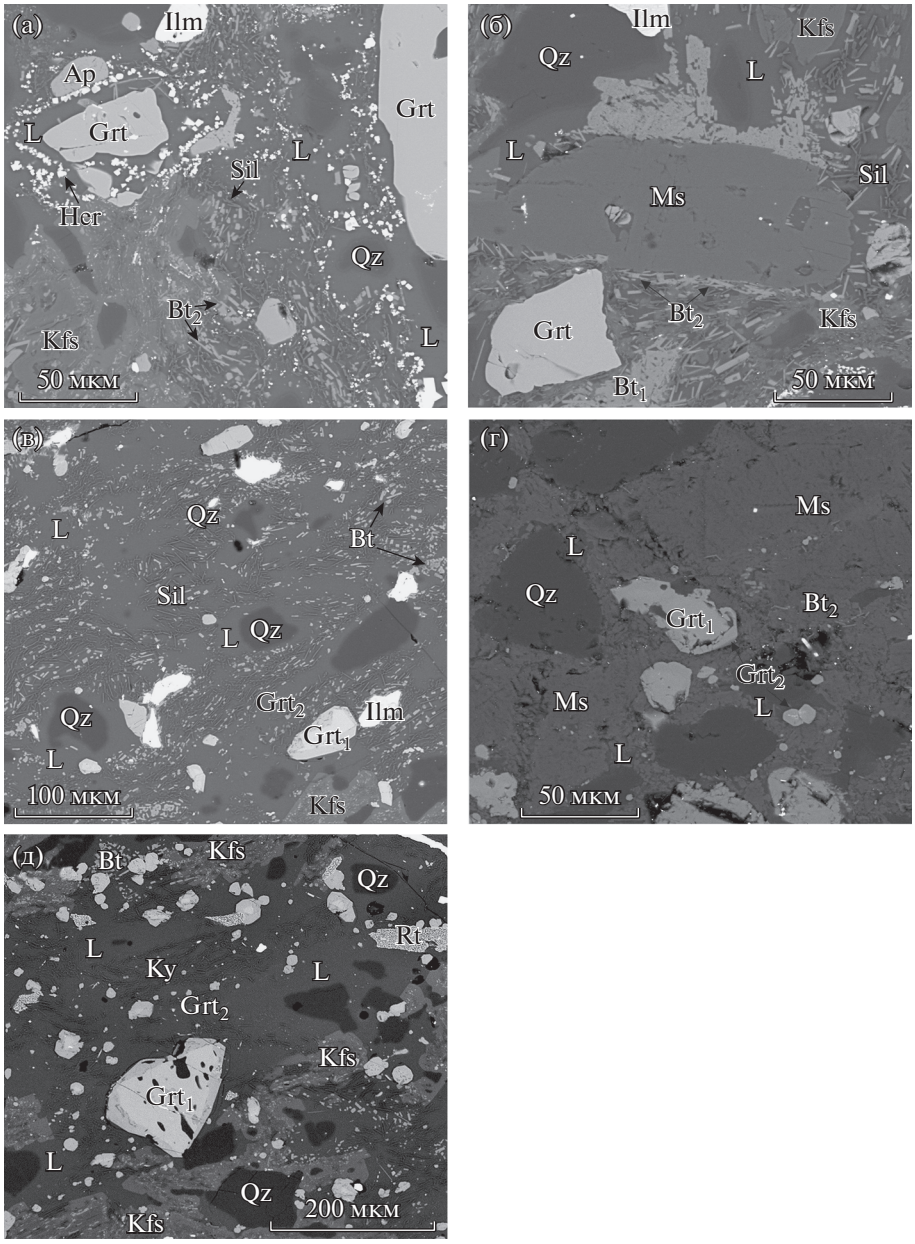

Рис. 1. Фазовые ассоциации в продуктах опытов. (а) – Цепочки зерен герцинит-магнетитовой шпинели, сосуществующие с расплавом, вокруг граната в продуктах опыта при 6 кбар и 800°С. (б) – Реакция Ms + Qz + Bt_1 + (Ilm) = Kfs + + Sil + Bt_2 + L в продуктах опыта при 10 кбар и 800°С. (в) – Каймы новообразованного граната, силлиманит, калиевый полевой шпат и расплав в продуктах опыта при 10 кбар и 850°С. (г) – Пленки расплава в контактах мусковита, граната, кварца и биотита, каймы и отдельные кристаллики новообразованного граната в продуктах опыта при 15 кбар и 850°С. (д) – Новообразованный гранат (каймы и отдельные кристаллы), калиевый полевой шпат, кианит и рутил в стекле в продуктах опыта при 900°С и 15 кбар.

ликат Al (вероятно, кианит) и калиевый полевой шпат. При 15 кбар вместо ильменита становится стабилен рутил, благодаря смещению реакции

$$3Ilm + Ky + 2Qz = Alm + 3Rt \qquad (4)$$

вправо с ростом давления [14]. Таким образом, частичное плавление при 15 кбар, по-видимому, начиналось при участии обеих слюд и граната согласно реакции

$$Ms + Bt_1 + Grt_1 + Qz + (Ilm) = \\ = Bt_2 + Grt_2 + Rt + Kfs + Ky + L, \qquad (5a)$$

где Grt_1 – изначальный гранат, Grt_2 – новообразованный гранат. Реакция (5 а) аналогична реакции

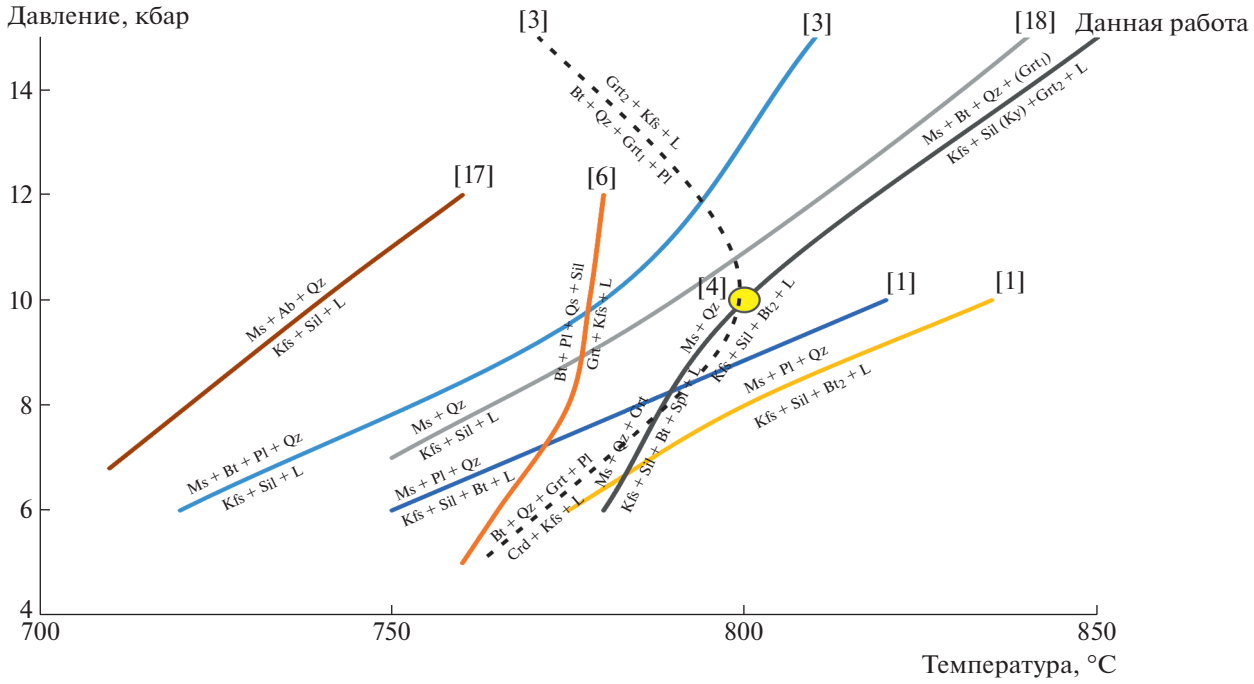

Рис. 2. Сравнение солидуса и реакций частичного плавления бесплагиоклазового гранат-двуслюдяного метапелита с реакциями частичного плавления мусковитовых, двуслюдяных и биотитовых метапелитов по результатам экспериментов [1–6, 17, 18].

$$\text{Ms} + \text{Bt} + \text{Qz} = \text{Grt} + \text{Kfs} + \text{L}, \qquad (5б)$$

предсказанной в [5] при давлении порядка 16 кбар между 850 и 900°C. В продуктах опыта при 900°C отсутствуют слюды, новый гранат образует каймы на реликтовых зернах и отдельные зерна в обширных участках стекла, содержащих также калиевый полевой шпат и силлиманит (рис. 1 д).

Итак, плавление бесплагиоклазового гранат-двуслюдяного метапелита начинается при температуре между 750 и 800°C при 6 кбар, около 800°C при 10 кбар и около 850°C при 15 кбар (рис. 2), отражая положительный dP/dT-наклон солидуса породы, характерного для реакций дегидратационного плавления (рис. 2, [7]). Указанные температуры находятся в интервале температур плавления плагиоклазсодержащих двуслюдяных ассоциаций [1–8] (рис. 2). Минеральные ассоциации, появляющиеся при плавлении гранат-двуслюдяного метапелита, также близки к тем, что образуются при плавлении плагиоклазсодержащих двуслюдяных ассоциаций. Появление герцинит-магнетитовой шпинели на контактах стекла с зернами альмандинового граната при 6 кбар согласуется с результатами экспериментов [3] и *PT*-условиями стабильности альмандина в условиях кислородного буфера FMQ [15]. При давлении 10 кбар начало плавления контролируется инконгруэнтным плавлением мусковита (+кварц) согласно реакциям (2 а, 2 б), в которых гранат, по-видимому, не принимает участие. По своей направленности и температуре эти реакции аналогичны реакции

$$\text{Ms} + \text{Pl} + \text{Qz} = \text{Bt} + \text{Sil} + \text{Kfs} + \text{L}, \qquad (6)$$

характерной для плагиоклазсодержащих ассоциаций [1–8]. При 10 кбар ведущую роль в плавлении метапелита также приобретает реакция (3) [2, 5, 6], которая является аналогом реакции

$$\text{Bt} + \text{Pl} + \text{Qz} + \text{Sil} = \text{Grt} + \text{Kfs} + \text{L} \qquad (7)$$

в ассоциациях, содержащих плагиоклаз [1–8]. Именно эта реакция продуцирует наибольшее количество расплава при плавлении метапелитов и метаграувакк [1–6]. Отсутствие новообразований биотита за счет мусковита при 15 кбар указывает на стабилизацию мусковита относительно биотита. Согласно [1] “мусковитовая” реакция (6) и “биотитовая” реакция (7) имеют разный положительный dP/dT-наклон. Причем dP/dT-наклон реакции (7) заметно меняется [6], становясь отрицательным [3], что приводит к пересечению линии этой реакции с линией реакции (6) при давлениях более 10 кбар (рис. 2). Это согласуется с работой [5], где точка пересечения бесплагиоклазовых реакций (2 б) и (3) отмечена при давлении ~16 кбар. Продукты опытов при 15 кбар демон-

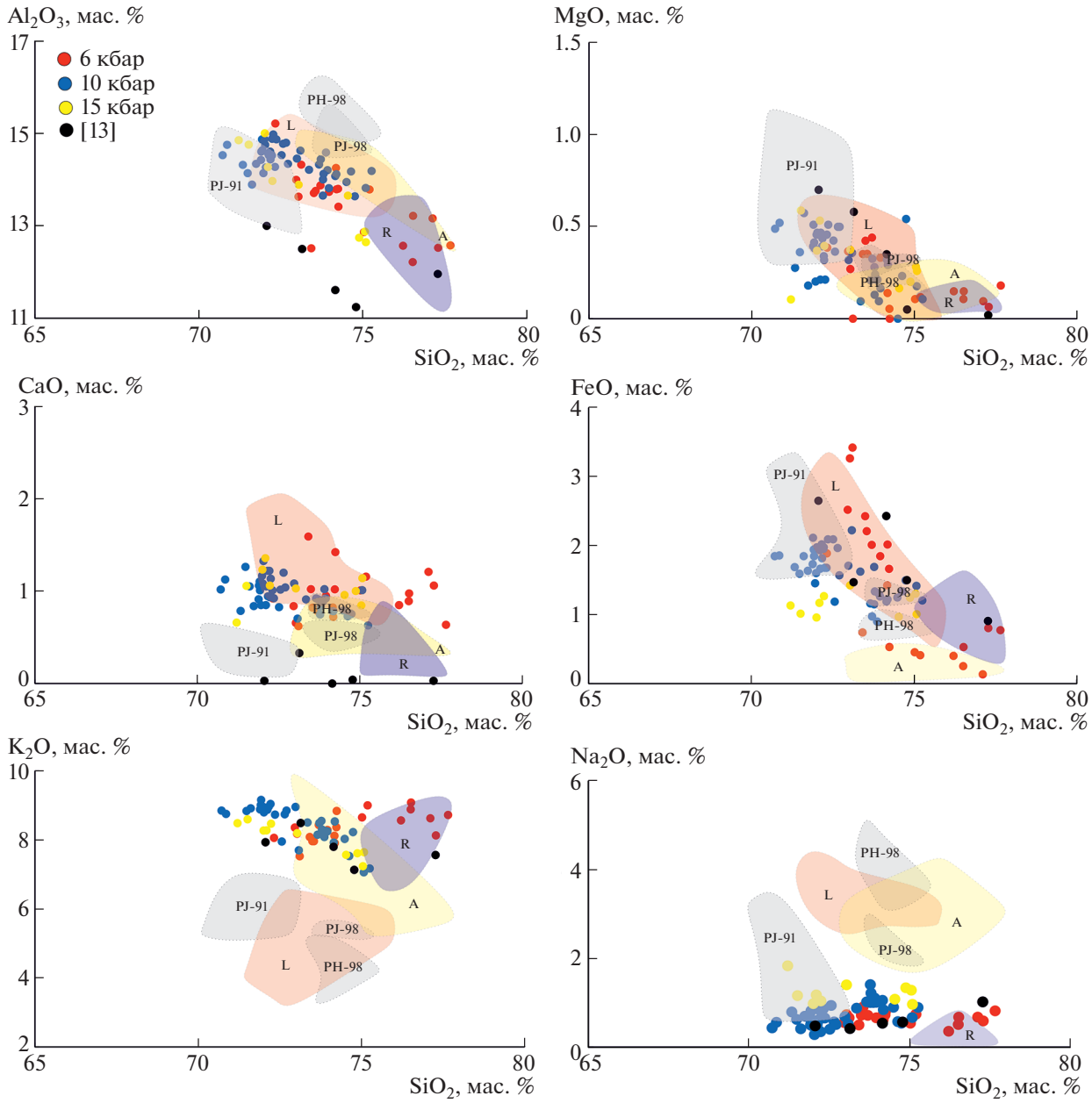

Рис. 3. Сравнение составов расплавов в экспериментах по плавлению бесплагиоклазового двуслюдяного метапелита с составами расплавов в экспериментах по плавлению плагиоклазсодержащих ассоциаций (PH-98 – [1]; PJ-91 – [2]; PJ-98 – [4]), природных лейкократовых гранитов (L) и аляскитов (A) – [9] и ультракалиевых риолитов (R) – [10–12], а также расплавных включений в гранатах из хондалитов пояса Керала, Индия [13].

стрируют (рис. 1 д), что частичное плавление, по-видимому, начиналось при участии обеих слюд с образованием граната. Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают теоретический анализ реакций плавления в системе KFMASH [5] и указывают на близость фазовых отношений при плавлении двуслюдяных ассоциаций, содержащих и не содержащих плагиоклаз.

Плавление бесплагиоклазового гранат-двуслюдяного метапелита ведет к образованию щелочных или щелочно-известковых гранитных расплавов (MALI > 7) с отношением FeO/(FeO + + MgO) > 0.7 и ASI > 1.1. При 6 кбар расплавы наиболее богаты SiO_2 (75–77 мас. %), но и наиболее бедны Al_2O_3 (12–14 мас. %) (рис. 3). При этом давлении и температурах 800–850°C образуются наименее “мафические” расплавы, содержащие <1 мас. % MgO + FeO (рис. 3). Такие характеристики расплавов при 6 кбар обусловлены следующими факторами. Во-первых, при этом давлении

с расплавами равновесна шпинель (рис. 1 а), забирающая из них заметное количество Al_2O_3. Во-вторых, при этих условиях плавление определяется реакцией (1), при которой FeO и MgO фиксируются в новообразованном биотите. Более активное участие биотита в реакциях плавления при 10 кбар приводит к формированию наиболее "мафических" расплавов (1.5–2 мас. % MgO + FeO) (рис. 3). По сравнению с расплавами при 6 кбар, при давлениях 10 и 15 кбар расплавы содержат 71–73 мас. % SiO_2 и 14–15 мас. % Al_2O_3 при близком содержании $K_2O + Na_2O$ (8–10 мас. %) (рис. 3). Вариации состава расплавов с давлением объяснимы сменой перитектических фаз – шпинели при 6 кбар на гранат при 10 и 15 кбар. Более активное образование граната при 15 кбар (рис. 1 д) приводит к тому, что расплавы становятся чуть менее богатыми MgO + FeO (1.0–1.5 мас. %) по сравнению с расплавами при 10 кбар (рис. 3).

При всех давлениях с температурой в расплавах растут содержания CaO и TiO_2. Поведение CaO определяется участием в реакциях плавления апатита. Благодаря апатиту содержание CaO в расплавах выше содержания этого компонента в расплавах, образующихся при плавлении ассоциаций с плагиоклазом [1–6] (рис. 3). Участие апатита в реакциях плавления подтверждается наличием P_2O_5 в расплавах, которое меняется от <0.1 мас. % при 6 кбар (900°C) до 1.2 мас. % при 10 кбар (900°C) в соответствии с закономерностями растворимости апатита в высокоглиноземистых гранитных расплавах [16]. При 15 кбар содержание P_2O_5 в расплавах немного понижается до 0.4–0.6 мас. %, что коррелирует с количеством апатита, участвующем в процессе плавления. Так, в продуктах опыта при 10 кбар и 900°C апатит практически отсутствует, тогда как в продуктах опытов при 15 кбар и 900°C его значительно больше. Рост концентрации TiO_2 с температурой отражает возрастающую степень участия титансодержащего биотита и ильменита в реакциях частичного плавления. Меньшее содержание TiO_2 в расплавах при 15 кбар, чем в расплавах при 10 кбар, связано с замещением ильменита рутилом (рис. 1 д) согласно реакции (4).

Плавление бесплагиоклазового гранат-двуслюдяного метапелита приводит к образованию ультракалиевых ($K_2O/Na_2O > 8$) расплавов, содержащих 7–9 мас. % K_2O (рис. 3). Расплавы, образующиеся при 6 и 10 кбар, содержат менее 1 мас. % Na_2O, что, по-видимому, связано с бóльшим перераспределением этого компонента в калиевый полевой шпат. Сравнение их составов с составами расплавов, образующихся при плавлении двуслюдяных ассоциаций, содержащих плагиоклаз [1–6], демонстрирует, что даже малое присутствие плагиоклаза в породе (напр., 4 об. % в экспериментах [2]), ведет к заметному обогащению расплавов Na_2O ($K_2O/Na_2O < 5$), а при содержании плагиоклаза в изначальной ассоциации в количестве 11–28 об. % [1] отношение K_2O/Na_2O в расплавах становится менее 2.

Содержания Al_2O_3, CaO, FeO, MgO, K_2O в расплавах, полученных при частичном плавлении бесплагиоклазового двуслюдяного метапелита, сопоставимы с содержаниями этих компонентов в лейкогранитах и аляскитах (рис. 3). Однако содержание Na_2O в этих гранитах заметно выше, чем его содержание в расплавах, полученных в экспериментах (рис. 3). Это подтверждает ведущую роль плагиоклаза в коровом источнике магм, формирующих лейкограниты и аляскиты (напр., [9]). По содержанию K_2O и Na_2O расплавы из продуктов экспериментов наиболее близки к составам ультракалиевых риолитов, известных в тектонических обстановках растяжения ([10–12] и ссылки в этих работах). Это согласуется с моделями образования таких магм в ходе высокотемпературного плавления коровых источников и последующим активным фракционированием плагиоклаза (и накоплением K_2O) в ходе эволюции магм ([10, 11] и ссылки в этих работах). Однако в работе [10] показано, что образование ультракалиевых кислых магм может быть связано напрямую с плавлением богатых калиевым полевым шпатом пород в нижней-средней коре при температурах более 900°C, а эволюция их состава обусловлена фракционированием не плагиоклаза, а калиевого полевого шпата. Этот вывод также согласуется с экспериментами, продукты которых характеризуются обилием реститового калиевого полевого шпата (рис. 1 а–д). Подтверждением модели [10] для образования калиевых риолитов являются находки в гранатах из хондалитов пояса Керала (Индия) включений силикатных расплавов, которые характеризуются содержаниями $K_2O > 7$ мас. % при низких содержаниях Na_2O (<1 мас. %) и CaO [13]. Авторы [13] интерпретируют составы этих включений как результат реакции, аналогичной (3), без участия плагиоклаза при температурах более 850°C и давлениях 6–8 кбар. Ближе всего составы калиевых риолитов [10–12] воспроизводятся составами расплавов, полученных в экспериментах при давлении 6 кбар (850 и 900°C) (рис. 3). Этот факт демонстрирует, что калиевые риолиты могут представлять собой магмы, формирующиеся в относительно малоглубинных условиях. Подтверждением тому являются находки вкрапленников кордиерита в таких риолитах (напр., [12]). Однако в продуктах наших экспериментов при 6 кбар вместо кордиерита стабильна шпинель (рис. 1 а), что может быть обусловлено более высоким давлением, более высоким отношением FeO/(FeO + MgO) или более низкой активностью H_2O, чем те, кото-

рые необходимы для кристаллизации кордиерита (напр., [19]) в экспериментальных расплавах.

Таким образом, проведенные в данной работе эксперименты подтверждают возможность генерации ультракалиевых кислых (риолитовых) расплавов при плавлении двуслюдяных ассоциаций, не содержащих плагиоклаз. Однако ограничением этой модели может быть тот факт, что бесплагиоклазовые метапелиты редки в метаморфических комплексах, и их плавление не может обеспечить образование значительных объемов ультракалиевых кислых магм. Альтернативой прямому дегидратационному плавлению бесплагиоклазовых метапелитов может быть плавление плагиоклазсодержащих пород с участием флюидов, содержащих дополнительно калиевую солевую составляющую, которая способствует не только замещению плагиоклаза калиевым полевым шпатом, но и заметному росту K/Na-отношения в образующихся расплавах [20].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 18-17-00206-П, а также в рамках темы Госзадания ИЭМ РАН (FMUF-2022-0004; 1021051302305-5-1.5.2;1.5.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Patiño Douce A.E., Harris N.* Experimental constraints on Himalayan anatexis // Journal of Petrology. 1998. V. 39. № 4. P. 689–710.
2. *Patiño Douce A.E., Johnston A.D.* Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1991. V. 107. P. 202–218.
3. *Castro A., Corretgé G. L., El-Biad M., El-Hmidi H., Fernandez C., Patiňo Douce A. E.* Experimental constraints on Hercynian anatexis in the Iberian Massif, Spain // Journal of Petrology. 2000. V. 41. P. 1471–1488.
4. *Pickering J.M., Johnston D.A.* Fluid-absent melting behavior of a two-mica metapelite: experimental constraints on the origin of Black Hills granite // Journal of Petrology. 1998. V. 39. P. 1787–1804.
5. *Vielzeuf D., Holloway J.R.* Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1988. V. 98. P. 257–276.
6. *Le Breton N., Thompson A.B.* Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in metapelites in the early stages of crustal anataxis // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1988. V. 99. P. 226–237.
7. *Weinberg R.F., Hasalová P.* Water-fluxed melting of the continental crust: A review // Lithos. 2015. V. 212. P. 158–188.
8. *Gao P., Zheng Y.F., Zhao Z.F.* Experimental melts from crustal rocks: a lithochemical constraint on granite petrogenesis // Lithos. 2016. V. 266. P. 133–157.
9. *McDermott F., Harris N.B.W., Hawkesworth C.J.* Geochemical constraints on crustal anatexis: a case study from the Pan-African Damara granitoids of Namibia // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1996. V. 123. № 4. P. 406–423.
10. *Ding H., Zhang Z., Dong X., Yan R., Lin Y., Jiang H.* Cambrian ultrapotassic rhyolites from the Lhasa terrane, south Tibet: evidence for Andean-type magmatism along the northern active margin of Gondwana // Gondwana Research, 2015. V. 27 (4). 1616–1629.
11. *Sharma K.K.* Malani magmatism: an extensional lithospheric tectonic origin // Special Papers, Geological Society of America. 2005. V. 388. P. 463–476.
12. *Dokuz A., Külekçi E., Aydınçakır E., Kandemir R., Alçiçek M.C., Pecha M.E., Sünnetçi K.* Cordierite-bearing strongly peraluminous Cebre Rhyolite from the eastern Sakarya Zone, NE Turkey: constraints on the Variscan Orogeny // Lithos. 2017. V. 278. P. 285–302.
13. *Cesare B., Ferrero S., Salvioli-Mariani E., Pedron D., Cavallo A.*"Nanogranite" and glassy inclusions: the anatectic melt in migmatites and granulites // Geology. 2009. V. 37. P. 627–630.
14. *Bohlen S.R., Wall V.J., Boettcher A.L.* Experimental investigations and geological applications of equilibria in the system $FeO–TiO_2–Al_2O_3–SiO_2–H_2O$ // American Mineralogist. 1983. V. 68. № 11–12. P. 1049–1058.
15. *Hsu L.C.* Selected phase relationships in the system Al–Mn–Fe–Si–OH: A model for garnet equilibria // Journal of Petrology. 1996. V. 9. № 1. P. 40–83.
16. *Pichavant M., Montel J.M., Richard L.R.* Apatite solubility in peraluminous liquids: Experimental data and an extension of the Harrison-Watson model // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1992. V. 56. № 10. P. 3855–3861.
17. *Petö P.* An experimental investigation of melting relations involving muscovite and paragonite in the silica-saturated portion of the system $K_2O–Na_2O–Al_2O_3–SiO_2–H_2O$ to 15 kb total pressure // Progress in Experimental Petrology. 1976. V. 3. P. 41–45.
18. *Storre B.* Dry melting of muscovite+quartz in the range P_S=7 kb to P_S=20 kb // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1972. V. 37. P. 87–89.
19. *Clemens J.D., Wall V.J.* Controls on the mineralogy of S-type volcanic and plutonic rocks // Lithos. 1988. V. 21. P. 53–66.
20. *Safonov O.G., Aranovich L.Y.* Alkali control of high-grade metamorphism and granitization // Geoscience Frontiers. 2014. V. 5. P. 711–727.

PARTIAL MELTING OF PLAGIOCLASE-FREE GARNET-TWO-MICA METAPELITE AS A MODEL FOR THE FORMATION OF ULTRAPOTASSIC FELSIC MAGMAS UNDER CONDITIONS OF THE CONTINENTAL CRUST

A. S. Mityaev[a,b,#], O. G. Safonov[a,b,c], D. A. Varlamov[a], D. D. van Reenen[c], A. A. Serdyuk[a], and Academician of the RAS L. Y. Aranovich[d,a]

[a] *Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow Region, Russian Federation*

[b] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[c] *University of Johannesburg, Johannesburg, South Africa*

[d] *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: classic_ten@mail.ru*

In order to investigate the formation of S-type ultrapotassic granite melts at the continental crust conditions, experiments on the partial melting of plagioclase-free garnet-two-mica metapelite (with accessory apatite and ilmenite) at pressures of 6, 10, and 15 kbar in the temperature range of 700–900°C were performed. Rock melting is driven by a series of peritectic melting reactions as a function of pressure and starts at temperatures between 750 and 800°C at 6 kbar, around 800°C at 10 kbar, and around 850°C at 15 kbar, reflecting a positive dP/dT slope of the solidus. The above P-T melting conditions, compositions of mineral associations and granite melts that appear during the melting of the plagioclase-free metapelite are close to those formed during the melting of plagioclase-bearing two-mica assemblages. However, the major compositional characteristic of melts formed during the melting of plagioclase-free metapelite is a high content of K_2O (7–8 wt %) at a ratio of $K_2O/Na_2O > 8–10$. These features resemble those of S-type ultrapotassic rhyolites formed in extensional tectonic settings.

Keywords: leucogranites, alaskites, ultrapotassic rhyolites, continental crust, anatexis, garnet-two-mica metapelite, dehydration melting, experiment