

УДК 548.4

СОСТАВ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАГМ ЩЕЛОЧНО-САЛИЧЕСКИХ ПОРОД РАННЕМЕЗОЗОЙСКОЙ БИМОДАЛЬНОЙ АССОЦИАЦИИ АДА-ЦАГ ХАРХОРИНСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ (ДАННЫЕ ИЗУЧЕНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ)

© 2023 г. И. А. Андреева^{1,*}, академик РАН В. В. Ярмолюк¹, С. Е. Борисовский¹

Поступило 16.11.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принято к публикации 15.12.2022 г.

На основе метода исследования расплавных включений с использованием электронного и ионного микроанализа изучены состав и условия образования магм комендитов раннемезозойской вулканической ассоциации Ада-Цаг (Монголия), а также определены механизмы, способствующие накоплению в них редких и редкоземельных элементов. Расплавные и флюидные включения установлены в кварце комендитов, отобранных в разных частях разреза вулканической толщи. Расплавные включения состоят из стекла, газового пузырька и дочерних минералов, представленных флюоритом, полилитионитом и калиевым полевым шпатом. Использование метода Raman-спектроскопии позволило изучить состав газовой фазы в расплавных включениях. Определено, что преобладающими компонентами состава газовой фазы являются вода и водород. Флюидные включения представлены водными растворами, предположительно отвечающими составу KF. Термометрические исследования расплавных включений и анализ состава стекол гомогенизированных расплавных включений во вкрапленниках кварца комендитов показали, что кристаллизация магм этих пород происходила из водонасыщенных редкометалльных расплавов с высокими содержаниями Li, Zr, F, Rb, Nb, Y и Th при температурах 880–930°C и давлении 1000 бар на глубине ~3.5 км и сопровождалась процессами дегазации. Сопоставление полученных данных изучения расплавных включений во вкрапленниках щелочно-салических пород одновозрастных вулканических ассоциаций Ада-Цаг, Дзарта-Худук и Сант, развитых в пределах Хархоринской рифтовой зоны, выявило общие закономерности эволюции их магм. Это позволило предложить сходный для них механизм формирования, предполагающий накопление многих редких и редкоземельных элементов, а также летучих компонентов (F, H₂O) в процессе кристаллизационной дифференциации. Впоследствии от таких комендитовых магм могло произойти отделение богатого Li, F и водой солевого расплава. Обнаружение во вкрапленниках кварца водных включений фторидного состава позволяет допустить дальнейшую эволюцию солевого расплава к концентрированному водному флюиду и возможном участии последнего в метасоматических процессах.

Ключевые слова: бимодальные вулканические ассоциации, щелочно-салические породы, расплавные и флюидные включения, редкометалльные расплавы, кристаллизационная дифференциация, жидкостная несмесимость

DOI: 10.31857/S2686739722602630, EDN: NYNSVJ

ВВЕДЕНИЕ

Редкометалльные гранитоиды и их вулканические аналоги (комендиты, пантеллериты, онгониты) являются источником целого ряда экономически важных металлов (Zr, Nb, Ta, Li, Be и

др.), что привлекает к ним внимание большого числа специалистов. К настоящему моменту накоплен значительный фактический материал по геологии, минералогии, геохимии и петрологии редкометалльных гранитоидных систем [1–5]. Однако в проблеме их генезиса остается еще много слабо изученных вопросов, среди которых – состав магм редкометалльных гранитоидов, роль летучих компонентов и фтора в эволюции расплавов, механизмы концентрации редких элементов. Ответы на эти вопросы лежат в области изучения минералообразующих сред. Использование мето-

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук Москва, Россия

*E-mail: andreeva@igem.ru

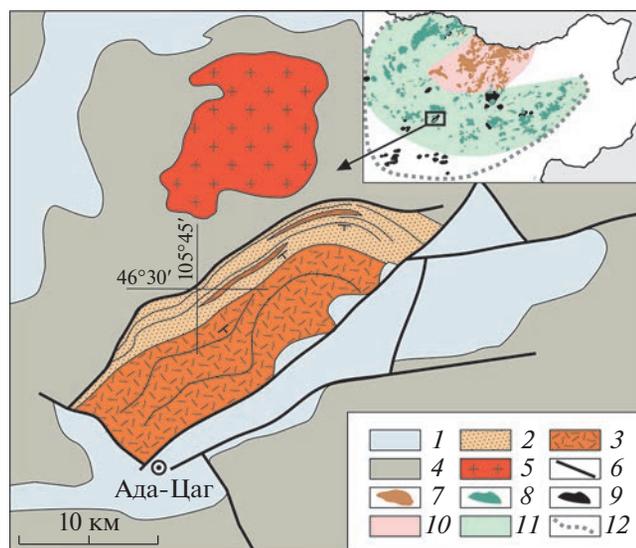


Рис. 1. Схема строения вулканической ассоциации района Ада-Цаг. Составлена авторами с использованием данных геологической карты Монголии 1:500000, L-48-Б. На врезке показано место района в строении раннемезозойской Хэнтей-Даурской зональной магматической области. 1 – мезо-кайнозойские отложения, 2 – трахириолитовые туфы, 3 – трахириолиты и комендиты, 4 – палеозойские образования, 5 – раннемезозойские лейкограниты, 6 – разломы, 7–12 – обозначения к врезке: 7 – известково-щелочные гранитоиды, 8 – вулканические и плутонические комплексы субщелочной серии, 9 – щелочные граниты, бимодальные вулканические ассоциации, 10 – зона развития известково-щелочных пород, 11 – зона развития пород субщелочной серии, 12 – граница зональной магматической области.

да исследования расплавных включений дает исключительную возможность реконструировать физико-химические условия образования этих пород и установить магматические процессы, ведущие к генерации рудоносных магм.

Настоящие исследования были предприняты с целью изучения состава и условий образования магм комендитов раннемезозойской вулканической ассоциации Ада-Цаг (Монголия), а также выявления механизмов, способствующих накоплению в них редких и редкоземельных элементов.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Вулканический комплекс Ада-Цаг расположен в Хархоринской зоне раннемезозойского щелочного магматизма, возникшей в западном обрамлении Хэнтейского батолита [6–8]. Вулканический комплекс сопряжен с грабеном, вытянутым в северо-восточном направлении на 30 км при ширине до 10 км. Грабен тяготеет к Адацагской сuture, зафиксировавшей коллизию бортов Монголо-Охотского океана в южном обрамлении батолита.

Грабен расположен в поле выходов позднекарбонных-раннепермских вулканических пород основного и среднего состава. С юго-востока породы комплекса по разлому граничат с юрскими отложениями.

Вулканический комплекс Ада-Цаг представлен стратифицированной серией вулканических пород, общей мощностью более 1000 м, которая погружается в юго-восточном направлении под углом 15–20°. В нижней его части преобладают пачки туфов и лавобрекчий кварцевых трахириолитов, среди которых отмечаются отдельные тела трахитов, трахидацитов и комендитов. Верхняя часть разреза сложена мощными (до 50 м) потоками комендитов-трахириолитов, а также пакетами их спекшихся туфов и игнимбритов (рис. 1).

Важной составляющей вулканического комплекса являются дайки комендитов, трахириолитов, щелочных гранит-порфиров. Они прослеживаются вдоль вулканического грабена, образуя пояс до 4 км шириной.

Вулканические породы, как правило, тонко раскристаллизованы, среди них выделяются афировые и порфировые разновидности. В порфировых разностях отмечаются фенокристы щелочного полевого шпата и округлые выделения до 2–3 мм темного кварца. Породы даек варьируют от стекловатых до раскристаллизованных и содержат те же включения, что и лавы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главные петрогенные элементы, а также Р в комендитах массива Ада-Цаг определяли методом РФА на спектрометре Axios mAX (“PANalytical”, Нидерланды) в лаборатории ИГЕМ РАН (аналитик Якушев А.И.). Полный спектр редких и редкоземельных элементов в породах был изучен методом ICP-MS в лаборатории ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа в ИПТМ РАН (Черноголовка) по методике [9].

Включения в минералах первоначально изучались оптически в полированных пластинках, толщиной 0.3 мм. Для термометрических исследований расплавных включений использовали муфельные печи и микротермокамеру с визуальным контролем (Linkam TS 1500), позволяющие проводить эксперименты при высоких температурах. Погрешность измерения температуры в муфельных печах оценивалась $\pm 10^\circ\text{C}$. Для установления равновесия между расплавом и минералом-хозяином время выдержки образцов в муфельной печи при заданной температуре составляло от 30 до 120 мин.

Изучение флюидных включений проводилось на криокамере Linkam THMSG 600, охлаждающейся жидким азотом (до -180°C) и калиброванной по эталонным искусственным включениям с

углекислотой и водными растворами определенной концентрации. Состав флюидной фазы в расплавных включениях определялся методом Раман-спектроскопии (Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, ИФХЭ РАН) на Раман-спектрометре Renishaw (аналитик А.А. Аверин).

Химические составы кристаллических включений, минеральных фаз в расплавных включениях, а также остаточных и гомогенных стекол расплавных включений изучались на электронном микроанализаторе JXA-8200 (Япония) в ИГЕМ РАН (петрогенные компоненты, F, Cl, S) при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 10 нА для стекол расплавных включений и ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 20 нА для минеральных фаз. Содержания элементов-примесей и H_2O в стеклах расплавных включений определялись методом вторично-ионной масс-спектрометрии С.Г. Симакиным на микроанализаторе Cameca IMS-3F в филиале ФТИАН (г. Ярославль) по методике [10].

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА КОМЕНДИТОВ

Петрографически изученные комендиты представлены порфиоровыми разновидностями с вкрапленниками кварца и щелочного полевого шпата. Микрофельзитовая основная масса сложена в основном калиево-натровым полевым шпатом, кварцем, щелочным амфиболом, ильменитом и титаномагнетитом. Акцессорные минералы представлены цирконом.

Калиево-натровый полевой шпат образует крупные идиоморфные кристаллы, размером до 1 см. Он содержит до 18 мас. % Al_2O_3 , до 6.6 мас. % Na_2O и до 7.5 мас. % K_2O при концентрации SiO_2 – 66–68 мас. %. Щелочной амфибол в основной массе отвечает составу фторарфведсонита ($F = 2-3$ мас. %), содержащего примеси TiO_2 – 3 мас. % и CaO – 1.4 мас. %. Сумма щелочей ($Na_2O + K_2O$) в нем составляет 9 мас. %. Ильменит содержит 49 мас. % TiO_2 и 46 мас. % FeO . Примечательно, что в основной массе также зафиксирован минерал с высокими содержаниями Ce , La и F . Определить состав этой фазы оказалось возможно только на полуколичественном уровне вследствие ее малого размера. Однако идентичный минерал встречен в виде кристаллического включения в кварце комендитов. Его состав соответствует карбонату редких земель – бастнезиту. В нем содержится 33.1 мас. % Ce_2O_3 , 25.4 мас. % La_2O_3 , 2.1 мас. % CaO , 9.2 мас. % F .

В петрохимическом отношении комендиты относятся к кислым породам щелочного ряда калиево-натровой серии с коэффициентом алгаитности (Ka) = 1.04. Геохимическими особенностями этих пород являются повышенные содержа-

ния высокозарядных элементов – Zr (до 1150 ppm), Nb (до 44 ppm), Y (до 98 ppm), а также РЗЭ (сумма = 500–580 ppm) и низкие концентрации Ba (28–32 ppm) и Sr (до 17 ppm). Накопление редких и редкоземельных элементов в изученных породах сопровождается ярко выраженной Eu -аномалией, что объясняется значительным фракционированием полевых шпатов, и свидетельствует, по-видимому, о глубокой степени дифференциации магм для этих пород (рис. 2).

ИССЛЕДОВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

Расплавные включения. Первичные расплавные включения установлены в кварце двух образцов комендитов (обр. СГ-6/6 и СГ-6/4), отобранных в разных частях разреза вулканической толщи. Они имеют форму отрицательного кристалла и размеры – от 30 до 90 мкм (рис. 3). По фазовому составу расплавные включения во вкрапленниках из обоих образцов сходны и состоят из стекла, газового пузырька и дочерних минералов, в числе которых определены флюорит, слюда, калиевый полевой шпат. Флюорит во включениях наблюдается в виде скелетных выделений и содержит незначительную примесь Ce_2O_3 . Слюда отвечает составу полилитонита. В ней содержится 60 мас. % SiO_2 , 11.3 мас. % Al_2O_3 , 3.4 мас. % FeO , 11.6 мас. % K_2O , 10 мас. % F . Дефицит в сумме компонентов, в среднем, составляет 7 мас. %. По результатам ионно-зондовых исследований нами были зафиксированы высокие содержания Li в слюде.

Остаточные (негретые) стекла расплавных включений во всех изученных образцах характеризуются крайне высокими концентрациями $Na_2O + K_2O$, в сумме достигающими 11–12 мас. % при содержании SiO_2 – 67–70 мас. %, Al_2O_3 – до 13.5 мас. %, FeO – 3.3–3.6 мас. %. Концентрация F составляет 0.4–0.7 мас. %. Содержания H_2O в стеклах расплавных включений достигают 2.3 мас. %. Согласно классификационной диаграмме SiO_2 –($Na_2O + K_2O$) составы изученных остаточных стекол расплавных включений попадают в поле риолитов [11].

Проведенная серия термометрических опытов с расплавными включениями в кварце комендитов (обр. СГ-6/6 и СГ-6/4) показала, что их гомогенизация осуществлялась в температурном интервале 880–930°C. Вместе с тем в ряде включений достигнуть полной гомогенизации включений не удалось, газовый пузырек в них сохранялся вплоть до 1200°C.

Использование метода Раман-спектроскопии позволило изучить состав газовой фазы в расплавных включениях. Полученные спектры приведены на рис. 4. На спектрах отчетливо наблюдаются два широких пика: в области 3580 см^{-1} и в

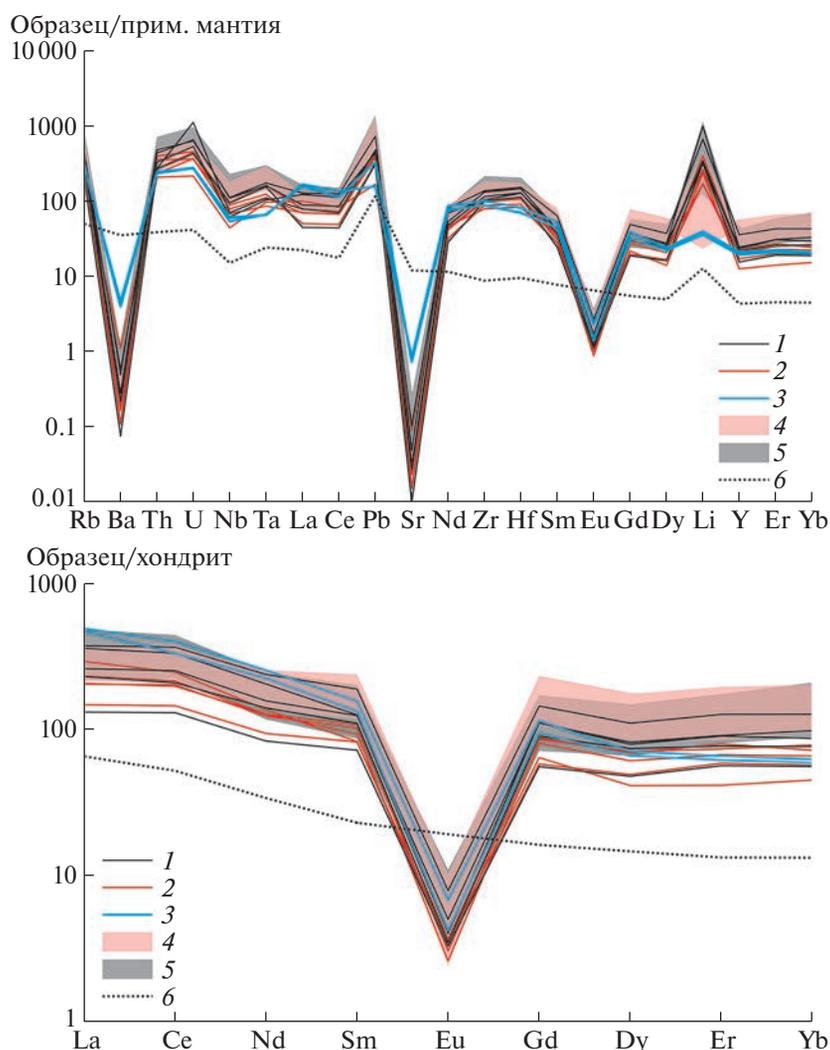


Рис. 2. Спектры распределения содержаний редких и редкоземельных элементов в комендитах (1) и гомогенных стеклах расплавных включений в кварце комендитов вулканической ассоциации Ада-Цаг (2 – из обр. СГ-6/4, 3 – из обр. СГ-6/6), а также в стеклах гомогенизированных расплавных включений в кварце комендитов комплекса Сант (4) и пантеллеритов комплекса Дзарта-Худук (5). Средний состав континентальной коры (6) по [19], составы примитивной мантии и хондрита по [20].

области 1630 см^{-1} , связанных с комбинационным рассеянием O–H в молекулах H_2O [12]. Кроме того, в спектре флюидной фазы присутствуют интенсивные линии с волновыми числами 354, 586, 4126, 4143, 4156 и 4161 см^{-1} , характерными для H_2 [12]. Таким образом, полученные характеристики рамановских спектров свидетельствуют о том, что преобладающими компонентами состава газовой фазы являются вода и водород.

Флюидные включения. Первичные флюидные включения были установлены во вкрапленниках кварца. Обнаружение флюидных и расплавных включений в разных зонах роста зёрен кварца не позволяет предполагать их одновременный захват. Флюидные включения приурочены к краевым частям вкрапленника и имеют размеры от 20

до 30 мкм и состоят из водного раствора и газового пузырька.

Криометрические исследования показали, что температуры замерзания жидкой фазы составляют $-36\text{...}-37^\circ\text{C}$. Температура начала плавления раствора (эвтектики) соответствует интервалу $-21.5\text{...}-22.1^\circ\text{C}$. Температуры плавления льда составляют от -2.7 до -2.6°C , что отвечает солёности раствора 4.5–4.3 экв. NaCl. Температура гомогенизации флюидных включений равна $101\text{--}103^\circ\text{C}$. Рассчитанная плотность флюида составила 0.96 г/см^3 .

Вместе с тем необходимо отметить, что измеренные значения температуры эвтектики близки к температуре эвтектики таких бинарных систем, как $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{NaCl}$ и $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{KF}$. Учитывая высокие концентрации F и щелочей в стеклах гомогенизи-

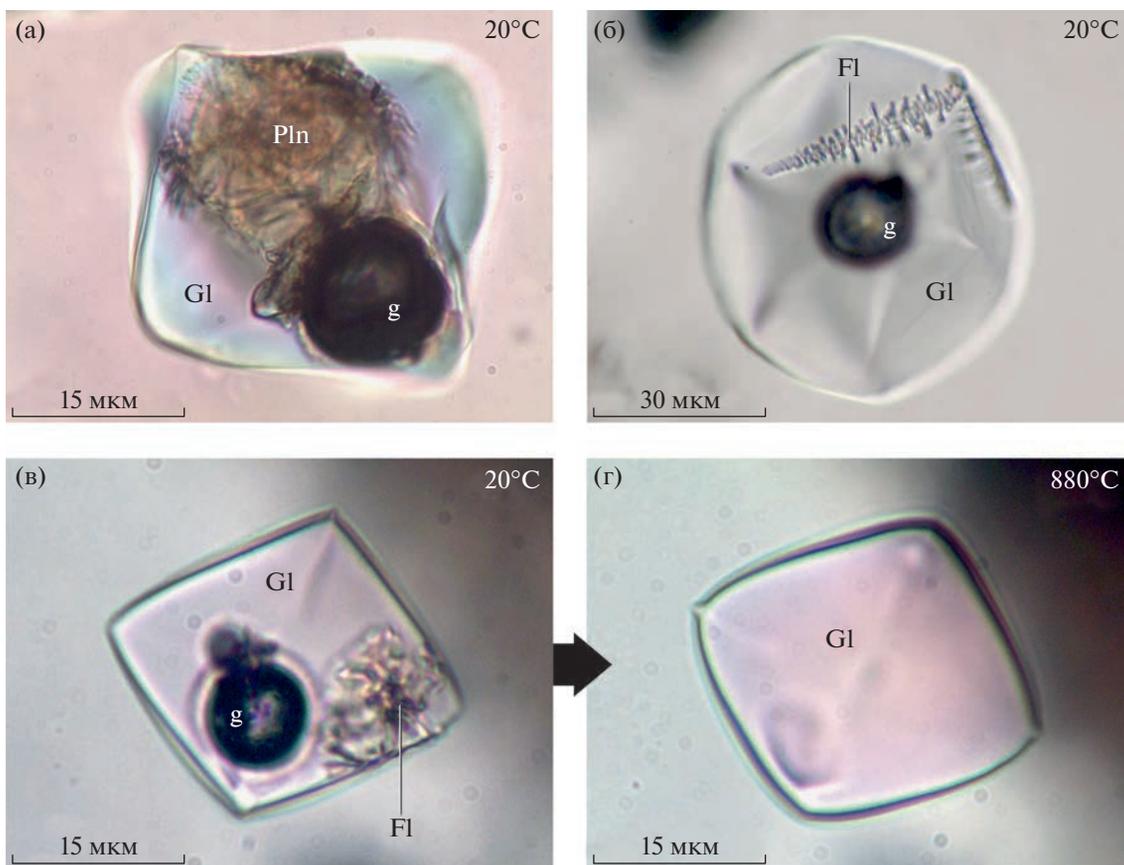


Рис. 3. Расплавные включения в кварце комендитов: а, в, г – из обр. СГ-6/4, б – из обр. СГ-6/6. Проходящий свет, без анализатора. Gl – стекло, g – газовый пузырек, Fl – флюорит, Pln – полилитоинит.

рованных расплавных включений, а также наличие флюорита в качестве дочерней фазы этих включений можно предположить, что выявленная флюидная фаза является раствором KF. Концентрация KF в растворе соответствуют 4.0–4.1 мас. %.

Породообразующие элементы и элементы-примеси в изученных расплавных включениях. Стекла гомогенных расплавных включений в кварце комендитов имеют риолитовый состав ($\text{SiO}_2 = 71\text{--}75$ мас. %) и характеризуются высокой глинозёмистостью ($A/\text{CNK} = 1.1\text{--}1.2$) и щелочностью ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 9.5\text{--}11.8$ мас. %) при практически равных содержаниях Na_2O и K_2O . Коэффициент алкаитности колеблется в интервале 1.11–1.51. Во всех анализах стекол расплавных включений наблюдается дефицит в сумме петрогенных компонентов от 1.5 до 4.5 мас. % (табл. 1). Проведенные ионнозондовые исследования показали присутствие в них заметных концентраций воды – от 1.6 до 3.7 мас. %. Кроме того, важной особенностью состава стекол расплавных включений являются высокие содержания в них фтора – от 0.9 до 1.2 мас. %.

Изучение редкоэлементного состава стекол гомогенизированных расплавных включений в

кварце всех изученных образцов, а также пород, показало, что они имеют сходный характер распределения элементов-примесей (рис. 2) и обогащены по сравнению со средним составом континентальной коры большинством редких и редкоземельных элементов. Так, например, концентрации Zr в стеклах расплавных включений варьируют в диапазоне 900–1568 ppm, Rb – 114–240 ppm, Nb – 40–70 ppm, Y – 72–112 ppm, Th – 21–40 ppm. Глубокие минимумы в содержаниях Ba, Sr, Eu, отчетливо проявленные на спайдер-диаграмме, свидетельствуют о значительном фракционировании полевых шпатов в процессе кристаллизации пород. Наибольшее различие в составе стекол расплавных включений и пород наблюдается в содержаниях Li. В комендитах концентрация этого элемента не превышает 62 ppm, в то время, как в стеклах расплавных включений она составляет 266–633 ppm для образца СГ-6/6 и 503–1566 ppm для образца СГ-6/4.

На диаграммах с нормированными содержаниями редкоземельных элементов видно, что характер распределения РЗЭ как в стеклах расплавных включений, так и в породах идентичен (рис. 2). В целом отмечается обогащение расплавов и по-

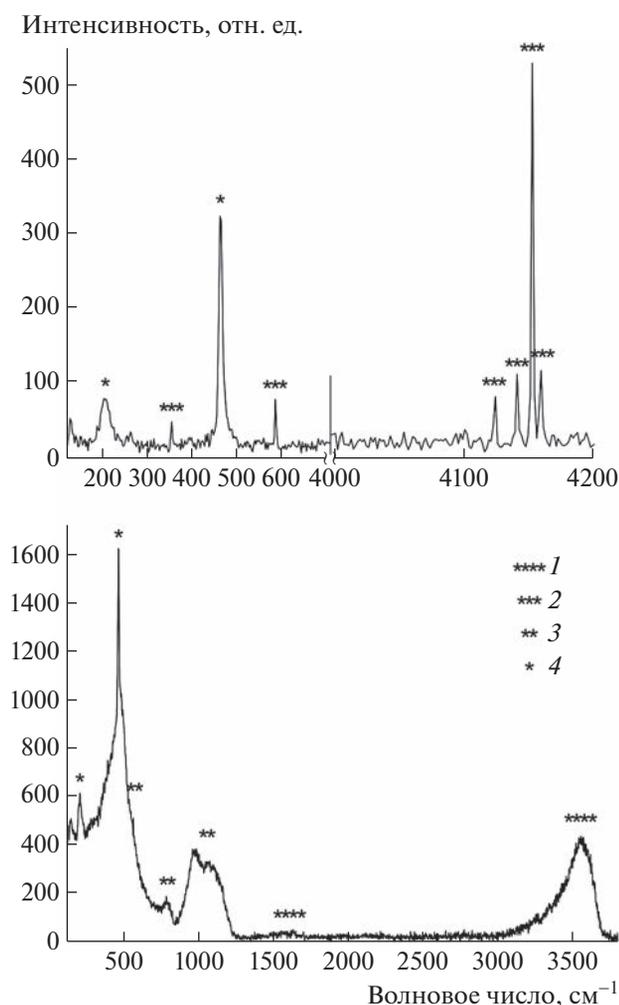


Рис. 4. Рамановские спектры газовой фазы расплавных включений. 1 – пики H_2O , 2 – пики H_2 , 3 – спектр стекла во включении, 4 – спектр кварца, содержащего расплавное включение.

род редкоземельными элементами, с некоторым преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми. Сумма РЗЭ в стеклах расплавных включений составляет 207–564 ppm при величине $(La/Yb)_N = 2-4$. Обращает на себя внимание более высокая концентрация легких РЗЭ в породах по сравнению с расплавными включениями. Это, вероятно, связано с кристаллизацией редкоземельных минералов в ходе эволюции комендитовой магмы, что подтверждается находкой кристаллических включений бастнезита в кварце комендитов, а также присутствием этого минерала в основной массе пород.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования расплавных и флюидных включений позволяют охарактеризовать состав и условия формирования магм коменди-

тов бимодальной ассоциации Ада-Цаг. Определено, что кристаллизация вкрапленников этих пород происходила в интервале температур 880–930°C из водонасыщенных (до 3.7 мас. % H_2O) редкометальных расплавов, с высокими содержаниями Li, Zr, F, а также повышенными концентрациями Rb, Nb, Y и Th.

Сопоставление полученных нами данных о содержании воды в расплаве и результатов термодинамического моделирования зависимости растворимости H_2O от температуры и давления в кислых силикатных расплавах [13] позволило оценить минимальное давление кристаллизации комендитовых магм. Содержание воды в гомогенных стеклах расплавных включений в кварце комендитов при температуре 880°C достигает 3.7 мас. %, что отвечает давлению 1000 бар. Исходя из этих данных, можно заключить, что кристаллизация кварца из комендитового расплава происходила на глубине ~3.5 км. Необходимо отметить, что использование флюидных включений для оценки давления кристаллизации нам представляется недостаточно обоснованным, поскольку убедительного доказательства сингенетичности расплавных и флюидных включений не обнаружено.

С помощью рамановской спектроскопии в газовой фазе некоторых включений в кварце комендитов из обр. СГ-6/4 были определены вода и водород. Отметим, что обнаружение водорода в газовой фазе довольно редкое явление и для магматических пород было зафиксировано при изучении расплавных включений в хромдиопсиде Инаглинского месторождения в Якутии [14] и чкаловите из щелочных пород провинции Гардар в Гренландии [15].

Выявление газообразного водорода во включении может быть объяснено разложением воды при отделении летучих от магматического расплава. В обзоре составов вулканических газов [16] показано, что наиболее высокотемпературные фумарольные газы содержат несколько мольных процентов водорода, что контролируется буфером QFM. Присутствие водорода во включении вероятно указывает на захват газовой фазы, отделившейся при дегазации расплава. Расчет содержания водорода для температуры 900°C и давления 1000 бар дает 1 мол. % H_2 [16]. При нормальных условиях в газовом пузырьке включения способно сохраняться давление водорода 2.5 бар, рассчитанное по уравнению состояния идеального газа. По-видимому, такое значительное количество водорода может сохраняться в расплавных включениях и быть выявлено методами спектроскопии комбинационного рассеяния.

Таким образом, кристаллизация магм комендитов происходила из флюидонасыщенных расплавов при температурах 880–930°C и давлении

Таблица 1. Содержания петрогенных (мас. %), летучих (мас. %) и редких (ppm) элементов в породах и в расплавных включениях в кварце комендитов проявления Ада-Цаг

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	76.54	76.20	72.20	73.45	72.03	74.70	72.62	71.17	71.83	71.25	75.62	75.50
TiO ₂	0.23	0.23	0.18	0.15	0.22	0.16	0.19	0.23	0.20	0.20	0.26	0.17
Al ₂ O ₃	11.35	11.21	12.14	11.69	12.6	10.59	11.68	10.53	9.95	11.34	10.38	10.09
FeO	1.94	2.24	1.91	2.04	1.83	2.13	2.32	3.20	2.35	2.08	2.46	2.59
MnO	0.02	0.03	0.06	0.05	0.08	0.04	0.03	0.05	0.05	0.00	0.00	0.07
MgO	0.05	0.05	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
CaO	0.17	0.19	0.13	0.16	0.20	0.13	0.10	0.14	0.10	0.16	0.14	0.14
Na ₂ O	4.03	4.00	5.34	5.32	5.59	4.72	5.04	5.68	4.75	4.20	4.50	4.38
K ₂ O	4.75	4.73	5.15	5.08	5.14	4.79	5.10	6.09	5.76	5.27	4.67	4.64
P ₂ O ₅	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
П.п.п.	0.69	0.76	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	—	—	1.10	0.97	0.99	0.92	0.88	1.21	1.26	1.15	1.00	0.98
Cl	—	—	0.04	0.06	0.04	0.05	0.03	0.08	0.06	0.03	0.04	0.08
SO ₃	—	—	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00
Сумма	99.08	98.90	98.11	98.57	98.23	97.88	97.61	97.88	95.77	95.24	98.69	98.21
H ₂ O	—	—	1.67	1.96	2.29	1.45	2.35	2.70	3.66	1.78	2.97	1.59
Ka	1.04	1.04	1.18	1.21	1.22	1.22	1.18	1.51	1.41	1.11	1.20	1.21
Li	62.4	56.3	633	412	376	266	270	1050	1566	544	521	503
Be	6.16	5.78	10.6	9.98	5.58	9.86	10.3	15.4	11.2	13.1	11.4	11.4
B	—	—	33.7	30.1	15.1	30.1	34.8	40.4	32.1	34.9	31.7	31.7
V	5.20	4.70	6.07	5.54	4.02	4.91	3.11	7.20	5.71	5.68	5.26	2.25
Rb	189	194	217	181	114	210	188	295	236	240	197	133
Sr	17.8	15.7	0.59	0.66	1.93	0.50	0.33	1.04	0.66	2.22	0.58	0.21
Y	97.6	89.5	105	89.2	58.1	95.2	79.2	112	291	109	101	71.7
Zr	1153	1007	1196	1137	900	1130	999	1568	1507	1190	1316	1140
Nb	44.0	39.0	69.4	40.0	41.1	57.0	64.6	81.5	79.2	44.8	51.0	68.6
Ba	32.0	28.3	1.44	1.43	7.98	1.18	0.77	3.47	1.96	4.01	1.54	0.53
La	120	115	56.6	50.5	71.4	50.0	36.1	91.5	63.8	87.8	56.4	32.2
Ce	254	210	137	125	156	128	92	232	160	211	132	82.5
Nd	120	106	60.1	61.0	64.4	58.3	44.3	112	74.0	96.7	66.3	39.3
Sm	23.8	20.3	16.5	14.2	12.6	15.5	12.5	28.8	20.0	19.1	16.8	11.0
Eu	0.39	0.24	0.17	0.15	0.20	0.21	0.19	0.45	0.29	0.23	0.20	0.19
Gd	23.3	19.1	17.8	16.4	13.0	17.4	11.8	29.4	22.5	22.5	18.3	11.3
Dy	17.9	16.7	17.5	15.4	10.4	17.8	12.4	27.9	20.6	20.0	18.7	12.1
Er	10.9	10.2	13.2	11.1	6.85	12.2	9.70	20.9	15.1	14.9	12.7	9.3
Yb	10.4	9.85	12.0	11.0	7.50	13.0	9.46	21.1	16.3	14.4	12.7	9.3
Hf	25.6	22.0	34.8	34.5	26.3	33.8	28.6	48.2	46.0	40.3	40.8	35.6
Ta	2.71	2.74	6.73	3.55	4.00	4.59	5.12	7.22	6.68	4.30	4.54	6.41
Pb	10.8	22.8	28.5	26.4	11.5	28.1	21.9	50.5	32.7	30.0	33.1	21.3
Th	22.1	21.3	36.2	21.0	18.8	24.5	32.3	43.6	39.6	29.8	24.6	24.2
U	5.97	5.98	9.80	7.94	4.68	9.56	7.78	13.6	14.1	11.6	8.5	9.30
ΣРЗЭ	581	498	363	329	367	339	246	564	393	487	301	207

Примечание. FeO – железо общее. 1–2 – комендит: 1 – обр. СГ-6/6, 2 – обр. СГ-6/4. 3–12 – стекла гомогенизированных расплавных включений: 3–7 – в кварце обр. СГ-6/6, 8–12 – в кварце обр. СГ-6/4, Ka – коэффициент апаитности. Прочерк – содержания не определялись.

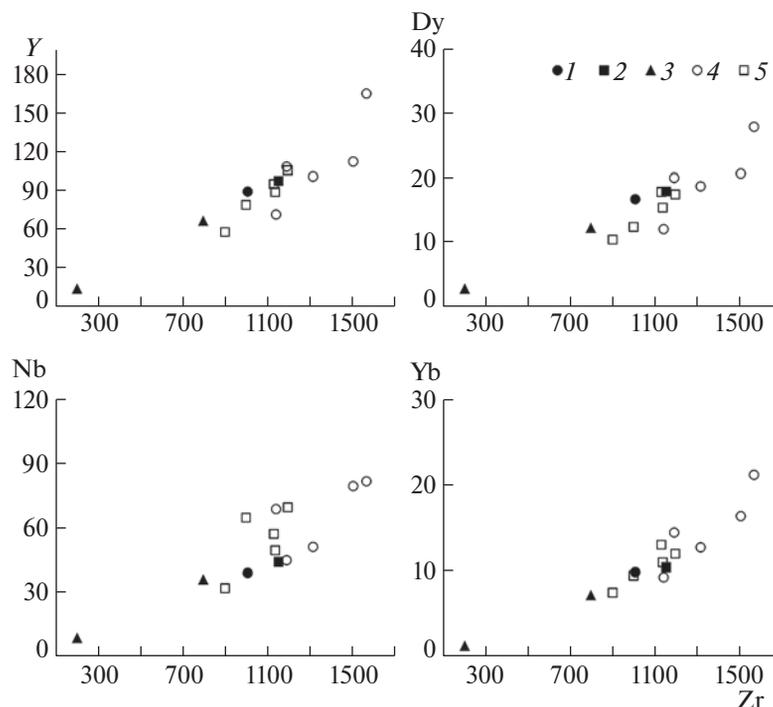


Рис. 5. Вариации содержаний (в ppm) редких элементов относительно Zr в породах (1–3) и стеклах расплавных включений в кварце комендитов (4, 5) вулканической ассоциации Ада-Цаг. 1 – комендиты, обр. СГ-6/4, 2 – комендиты, обр. СГ-6/6, 3 – риолиты, 4, 5 – стекла гомогенизированных расплавных включений в кварце комендитов: 4 – обр. СГ-6/4, 5 – обр. СГ-6/6.

1000 бар на глубине ~3.5 км и сопровождалась процессами дегазации.

Анализ редкоэлементного состава стекол расплавных включений позволил выявить следующие закономерности в поведении элементов-примесей в расплавах. На графиках (рис. 5) показаны вариации некоторых редких и редкоземельных элементов в стеклах гомогенизированных расплавных включений и породах относительно Zr, выбранного в качестве индекса дифференциации. Отчетливые прямые корреляции между содержаниями Zr и Nb, Y, Dy, Yb во всем диапазоне составов расплавов и пород свидетельствуют об их накоплении в ходе магматической эволюции. Подобные тенденции прослеживаются и для других элементов, таких как Rb, Ta, Hf, Pb, U, Sm, Gd, Er. Отсутствие корреляций между Zr и легкими РЗЭ, как уже отмечалось, связывается нами с фракционированием редкоземельных минеральных фаз на ранних этапах кристаллизации магматического расплава. Таким образом, наличие единых трендов между расплавами и породами позволяет предполагать определяющую роль процесса кристаллизационной дифференциации в накоплении многих редких элементов в кислых щелочных расплавах вулканического комплекса Ада-Цаг.

Нашими предыдущими исследованиями были получены важнейшие результаты, касающиеся

состава и эволюции магм, принимающих участие в формировании пород бимодальных магматических ассоциаций Дзарта-Худук и Сант, развитых в пределах Хархоринской рифтовой зоны [17, 18]. Следует подчеркнуть, что перечисленные комплексы и комплекс Ада-Цаг имеют идентичную специфику состава слагающих их пород. Было показано, что за образование ряда щелочно-силикатных пород отвечали сильно дифференцированные редкометалльные силикатные щелочные расплавы с высокими концентрациями Li, Zr, Rb, Y, Hf, Th, U и редкоземельных элементов. Во вкрапленниках пантеллеритов бимодальной ассоциации Дзарта-Худук проведенные термометрические исследования расплавных включений позволили зафиксировать явления несмешиваемости силикатного и литийсодержащего фторидного расплавов при температуре 800°C, что явилось бесспорным свидетельством в пользу принципиальной возможности отделения редкометалльных солевых расплавов от щелочных магм на заключительных этапах дифференциации.

Сопоставление минерального состава негретых расплавных включений бимодальных ассоциаций Ада-Цаг, Дзарта-Худук и Сант выявило их несомненное сходство. Для них типично присутствие в качестве дочерних минеральных фаз флюорита и полилитионита, что отражает специ-

ализацию расплавов в отношении Li и F. Стекла гомогенизированных расплавных включений во вкрапленниках пород всех вулканических комплексов близки по геохимическим характеристикам, в том числе по уровням концентрации и характеру распределения редких и редкоземельных элементов (рис. 2). Важной особенностью является наличие максимума в содержаниях Li в спектре распределения редких элементов, за исключением части расплавных включений из вкрапленников комендитов ассоциации Сант. Учитывая, что стекла последних характеризуются крайне низкими концентрациями Li, F и H₂O, они рассматривались нами, как остаточные силикатные магмы после отделения от них солевого (фторидно-го) расплава.

Таким образом, исследование природы комендитовых расплавов бимодальной ассоциации Ада-Цаг выявило много общего с эволюцией одновозрастных (раннемезозойских), аналогичных по составу пород бимодальных ассоциаций Хархоринской рифтовой зоны. Это дает нам основания предложить сходный для них механизм формирования, предполагающий накопление многих редких и редкоземельных элементов, а также летучих компонентов (F, H₂O) в процессе кристаллизационной дифференциации. Впоследствии от таких комендитовых магм могло произойти отделение богатого Li, F и водой солевого расплава. Обнаружение во вкрапленниках кварца водных включений предположительно фторидного состава позволяет допустить дальнейшую эволюцию солевого расплава к концентрированному водному флюиду и возможном участии последнего в метасоматических процессах.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-17-00033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В.И. Петрология и геохимия редкометалльных гранитоидов. Новосибирск: Наука. 1977. 250 с.
2. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Рифтогенный магматизм активных континентальных окраин и его рудоносность. М.: Наука, 1991. 263 с.
3. Christiansen E.H., Sheridan M.F., Burt D.M. The geology and geochemistry of Cenozoic topaz rhyolites from the Western United States // The Geol. Soc. Amer. Special Paper. 1986. V. 205. 82 p.
4. Trueman, D.L., Pedersen, J.C., de St. Jorre, et al. The Thor Lake, N.W.T., rare-metal deposits. In: Taylor, R.P., Strong, D.F. (Eds.), Granite-Related Mineral Deposits: Geology, Petrogenesis and Tectonic Setting. Canadian Institute of Mining and Metallurgy. 1988. Special Volume, Vol. 39, P. 279–284.
5. Антипин В.С., Андреева И.А., Коваленко В.И., Кузнецов В.А. Геохимические особенности онгонитов Ары-Булакского массива, Восточное Забайкалье // Петрология. 2009. Т. 17. № 6. С. 601–617.
6. Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Будников С.В., Ковач В.П., Котов А.Б., Пономарчук В.А., Козлов В.Д., Владыкин Н.В. Источники магматических пород и происхождение раннемезозойского тектономагматического ареала Монголо-Забайкальской магматической области: 1. Геологическая характеристика и изотопная геохронология // Петрология. 2003а, Т. 11. № 2. С. 164–178.
7. Коваленко В.И., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Будников С.В., Ковач В.П., Котов А.Б., Пономарчук В.А., Козлов В.Д., Владыкин Н.В. Источники магматических пород и происхождение раннемезозойского тектономагматического ареала Монголо-Забайкальской магматической области: 2. Петрология и геохимия // Петрология. 2003б. Т. 11. № 3. С. 227–254.
8. Ярмолюк В.В., Коваленко В.И. Геодинамические обстановки образования батолитов в Центрально-Азиатском складчатом поясе // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 12. С. 1305–1320.
9. Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А. и др. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. В. 73. С. 12–22.
10. Соболев А.В. // Петрология. 1996. Т. 4. № 3. С. 228–239.
11. Классификация и номенклатура магматических горных пород. М.: Недра. 1981. 160 с.
12. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. // Journal of Geochemical Exploration. 2012. V. 112, P. 1–20.
13. Papale P. Modeling of the solubility of a two-component H₂O + CO₂ fluid in silicate liquids // Amer. Mineral. 1999. V. 84. P. 477–492.
14. Наумов В.Б., Каменецкий В.С., Томас Р. и др. // Геохимия. 2008. № 6. С. 603–614.
15. Konnerup-Madsen J., Dubessy J., Rose-Hansen J. Combined Raman microprobe spectrometry and microthermometry of fluid inclusions in minerals from igneous rocks of the Gardar province (south Greenland) // Lithos. 1985. V. 18. P. 271–280.
16. Giggerbach W.F. Chemical Composition of Volcanic Gases // Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards. 1996. P. 221–256.
17. Андреева И.А., Коваленко В.И. // Петрология. 2011. Т. 19. № 4. С. 363–385.
18. Андреева И.А., Борисовский С.Е., Ярмолюк В.В. Комендитовые расплавы раннемезозойской бимодальной ассоциации Сант (Центральная Монголия) и механизмы их формирования // ДАН. 2018. Т. 481. № 4. С. 400–406.
19. Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its Evolution and Composition. London: Blackwell. 1985. 312 p.
20. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society of London Special Publications. 1989. V. 42. P. 313–345.

MAGMA COMPOSITION AND FORMATION CONDITIONS OF ALKALI-SALIC ROCKS OF THE EARLY MESOZOIC ADAATSAG BIMODAL ASSOCIATION OF THE KHARKHORIN RIFT ZONE OF CENTRAL ASIA (DATA FROM THE STUDY OF MELT INCLUSIONS IN MINERALS)

I. A. Andreeva^{a,#}, Academician of the RAS V. V. Yarmolyuk^a, and S. E. Borisovsky^a

^a *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: andreeva@igem.ru*

Based on the method of investigation of melt inclusions using electron and ion microprobe, the magma composition and formation conditions of comendites of the Early Mesozoic Adaatsag volcanic association (Mongolia) were studied. The mechanisms leading to the accumulation of rare and rare earth elements in them were determined. Melt and fluid inclusions are found in quartz from the comendites, collected from different parts of the volcanic sequence. The melt inclusions consist of glass, a gas bubble and daughter minerals represented by fluorite, polythionite and potassium feldspar. The use of the Raman spectroscopy method made it possible to study the composition of the gas phase in melt inclusions. It is determined that the predominant components of the gas phase are water and hydrogen. Fluid inclusions are represented by aqueous solutions that correspond to KF in composition. The concentration of KF in the solution reach up to 4.0–4.1 wt. %. Thermometric experiments with melt inclusions and analysis of the composition of glasses of homogenized melt inclusions in quartz of the comendites showed that the crystallization of magmas of these rocks occurred from water-saturated rare-metal melts with high contents of Li, Zr, F, Rb, Nb, Y and Th at temperatures of 880–930°C and at a pressure of 1000 bar at a depth of ~3.5 km and was accompanied by degassing processes. Comparison of the obtained data on the study of melt inclusions in the phenocrysts of the alkali-salic rocks of the same age volcanic associations Adaatsag, Dzarta-Khuduk and Sant, developed within the Kharkhorin rift zone, revealed general patterns of their magma evolution. This allowed us to propose a similar mechanism of their formation, involving the accumulation of many rare and rare-earth elements, as well as volatile components (F, H₂O) in the process of crystallization differentiation. Subsequently, a salt melt rich in Li, F and water could be separated from such comendite magmas. The detection of fluoride aqueous inclusions in quartz allows us to suppose the further evolution of the salt melt leading to the appearance of a concentrated aqueous fluid and the possible participation of the latter in metasomatic processes.

Keywords: bimodal volcanic associations, alkaline-salic rocks, melt and fluid inclusions, rare-metal melts, crystallization differentiation, liquid immiscibility