ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2023, том 509, № 2, с. 145–152

ГЕОЛОГИЯ

УДК 548.4

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ГЕОТЕРМОМЕТРИЯ ГРАНИТОИДНОГО МАССИВА АДЖ-БОГД (ЮЖНАЯ МОНГОЛИЯ) НА ОСНОВЕ ЦИРКОНА

© 2023 г. О. А. Андреева[1,*], академик РАН Л. Я. Аранович[1], А. М. Козловский[1], М. А. Голунова[1,2], Д. Д. Капланская[1], С. Е. Борисовский [1]

Поступило 28.11.2022 г.
После доработки 14.12.2022 г.
Принято к публикации 15.12.2022 г.

В строении массива Адж-Богд, расположенного в Заалтайской Гоби в пределах герцинид Центрально-Азиатского складчатого пояса, участвуют породы двух основных фаз внедрения. Породы ранней фазы представлены двуполевошпатовыми гранитами, которые прорываются поздними щелочно-полевошпатовыми гранитами. При реконструкции термальной истории гранитоидов двух фаз внедрения в качестве минерала-индикатора температурного режима их формирования был выбран циркон. Было предложено два основных подхода к использованию этого минерала как геотермометра: температура насыщения цирконом и цирконий-гафниевый геотермометр. Оба подхода демонстрируют схожую термальную картину формирования гранитов массива. Щелочно-полевошпатовые граниты поздней фазы внедрения кристаллизовались при температурах $T = 810–850°C$, в то время как двуполевошпатовые граниты ранней фазы – в температурном интервале $T = 700–770°C$. По результатам термобарогеохимических исследований расплавных включений в цирконе щелочно-полевошпатовых гранитов поздней фазы был определен схожий температурный диапазон их формирования – 825–850°C. Все полученные оценки температуры кристаллизации гранитов двух фаз внедрения массива Адж-Богд свидетельствуют о значительно более высокой (на 100–120°C) температуре образования щелочно-полевошпатовых гранитов по сравнению с более ранними двуполевошпатовыми гранитами. Значительно более высокая температура образования поздних щелочно-полевошпатовых гранитов предполагает необходимость дополнительного источника тепла, которым могли служить мантийные расплавы, свидетельством участия которых в формировании массива Адж-Богд являются мафические дайки, разделяющие породы двух гранитных фаз внедрения. Контрастный температурный режим близких по времени известково-щелочной и щелочной фаз внедрения установлен впервые в этой работе.

Ключевые слова: циркон, температура насыщения цирконом, цирконий-гафниевый геотермометр, расплавные включения

DOI: 10.31857/S2686739722602848, **EDN:** NZOLPT

ВВЕДЕНИЕ

Расшифровка физико-химических параметров кристаллизации гранитоидов важна для понимания эволюции кислых магм и процессов, приводящих к накоплению в них рудного вещества. Особый интерес представляет исследование многофазных интрузивных массивов с участием гранитов разных минералогических или геохимических типов, поскольку позволяет реконструировать эволюцию магматических расплавов, которая может приводить к формированию магм потенциально рудоносных в отношении редких и транзитных элементов. Однако точная оценка магматических температур для гранитоидов, главным образом, их щелочных разновидностей, часто затруднена в силу особенности их минерального состава. Одним из наиболее популярных минералов-индикаторов температурного режима формирования гранитоидных массивов является циркон (*Zrn*). Было предложено несколько подходов к использованию этого минерала как геотермометра: (1) – индекс насыщения цирконом [1–4]; (2) – содержания Ti в цирконе [5, 6]; (3) – распределение Zr и Hf между цирконом и расплавом [7, 8]. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Так, в подходе (1) предполагается, что *Zrn* является одним из первых минералов субликвидуса, что в общем случае невер-

[1] *Институт геологии рудных месторождений. петрографии. минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия*

[2] *Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

*****E-mail: oandreeva@igem.ru*

но [2, 8]. Подход (2) требует тщательного определения, как правило, очень низкого содержания Ti в *Zrn* и, главное – количественного учета активности TiO_2 в расплаве на момент начала кристаллизации *Zrn* [5, 6], а подход (3) предполагает, что в породе помимо *Zrn* отсутствуют минералы, способные фракционировать Zr и Hf, что также выполняется далеко не всегда. Например, в амфиболе и биотите – наиболее обычных темноцветных минералах гранитоидов – отношение Zr/Hf = 22–24 и 13 соответственно [9], что сильно отличает их от хондритового отношения ~35–40 [10].

В предлагаемой статье проблемы, связанные с использованием циркона в качестве индикатора термального режима гранитоидов, рассмотрены на примере гранитов массива Адж-Богд в юго-западной Монголии. По этим результатам высказаны также некоторые генетические соображения.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранитоидный массив Адж-Богд располагается в Заалтайской Гоби в пределах герцинид Центрально-Азиатского складчатого пояса (рис. 1). Это – субизометричный в плане массив диаметром около 20 км, относящийся к раннепермскому этапу магматизма. Гранитоиды массива прорывают раннекарбоновые известково-щелочные вулканические серии и интрузивные породы широкого диапазона состава от габбро до гранитов. В строении массива Адж-Богд участвуют породы двух основных фаз внедрения, разделенных серией мафических даек. Ранняя фаза, слагающая основное тело массива, представлена средне-мелкозернистыми двуполевошпатовыми лейкократовыми гранитами. Породы поздней фазы занимают около 15% площади массива и распространены в центральной его части, а также слагают небольшой обособленный сателлит в 1.5 км к северу. Это преимущественно крупно-среднезернистые щелочно-полевошпатовые граниты. В петрографическом отношении для двуполевошпатовых гранитов первой фазы внедрения характерны фенокристы пертитового полевого шпата и мелкозернистый матрикс из альбита, калиевого полевого шпата и кварца. Щелочно-полевошпатовые породы второй фазы внедрения состоят из крупных кристаллов пертитового полевого шпата и кварца. Темноцветных минералов в обоих типах пород не более 5%. Это, главным образом, роговая обманка и биотит. Акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом, ильменитом и сфеном. Возраст массива был определен методом U–Pb ID-TIMS по циркону из щелочно-полевошпатовых гранитов северного сателлита (массив Бум) второй фазы внедрения и составляет 294 ± 5 млн лет [11].

ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРАНИТОВ

Граниты двух типов существенно различаются по химическому составу (табл. 1). Содержание SiO_2 в двуполевошпатовых гранитах первой фазы внедрения (обр. 22. 24; далее в тексте – ГрI) составляет 71–74 мас. % при концентрации Al_2O_3 14–15 мас. % и суммы щелочей – 8 мас. % (коэффициент агпаитности $Ka = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ (мол.) = 0.7–0.8). Для щелочно-полевошпатовых гранитов второй фазы внедрения (обр. 20. 21; далее в тексте – ГрII) характерно содержание кремнекислоты 67–70 мас. %. Al_2O_3 – 16–17 мас. % при концентрации суммы щелочей – 11–12 мас. % (табл. 1), коэффициент агпаитности Ka = 0.9. Согласно классификационной диаграмме (рис. 2), основанной на известково-щелочном индексе Пикока, точки составов ГрI лежат в поле известково-щелочной серии, а ГрII относятся к щелочной серии. Резко отличаются между собой граниты ГрI и ГрII по содержанию Zr и Hf. Так, содержания Zr в ГрI составляют 131–135 ppm, Hf – около 4 ppm. тогда как в ГрII концентрации Zr варьируют от 410 до 460 ppm, а Hf – от 8–9 ppm.

СОСТАВ ЦИРКОНА

Циркон из обоих типов гранитов полупрозрачен и имеет размеры, в среднем, 0.1–0.2 мм. Внутренняя структура зёрен – наличие осцилляторной и (иногда) секториальной зональности (рис. 3) – не оставляет сомнений в их магматическом происхождении. Все зёрна неоднородны по содержанию HfO_2, причем в каждом из изученных образцов встречаются цирконы с различающимися трендами зональности. В образце 22 (ГрI) присутствуют зерна *Zrn* двух разновидностей – с эллипсовидными ядрами с низким содержанием HfO_2 и с более или менее систематическим увеличением его концентрации к краям зёрен (0.85–1.28 мас. %; рис. 3 д. R5), и слабо зональные зёрна с небольшими (в пределах 10–15 отн. %) колебаниями содержаний HfO_2 (рис. 3 е. R6). Похожие по морфологии и составу слабо зональные зёрна встречены также в образце 24 из ГрI (1.03–1.30 мас. % HfO_2). В образцах 20 и 21 (ГрII) также встречены и зональные (рис. 3 б. R9; 3 в. R3), и весьма однородные (рис. 3 а. R2; 3 г. R4) по содержанию HfO_2 зёрна *Zrn*. При этом содержание HfO_2 в более или менее однородных зёрнах *Zrn* из ГрII может быть близким как к центральным, так и к краевым участкам зональных зёрен. Похожие соотношения наблюдаются и в *Zrn* из ГрI.

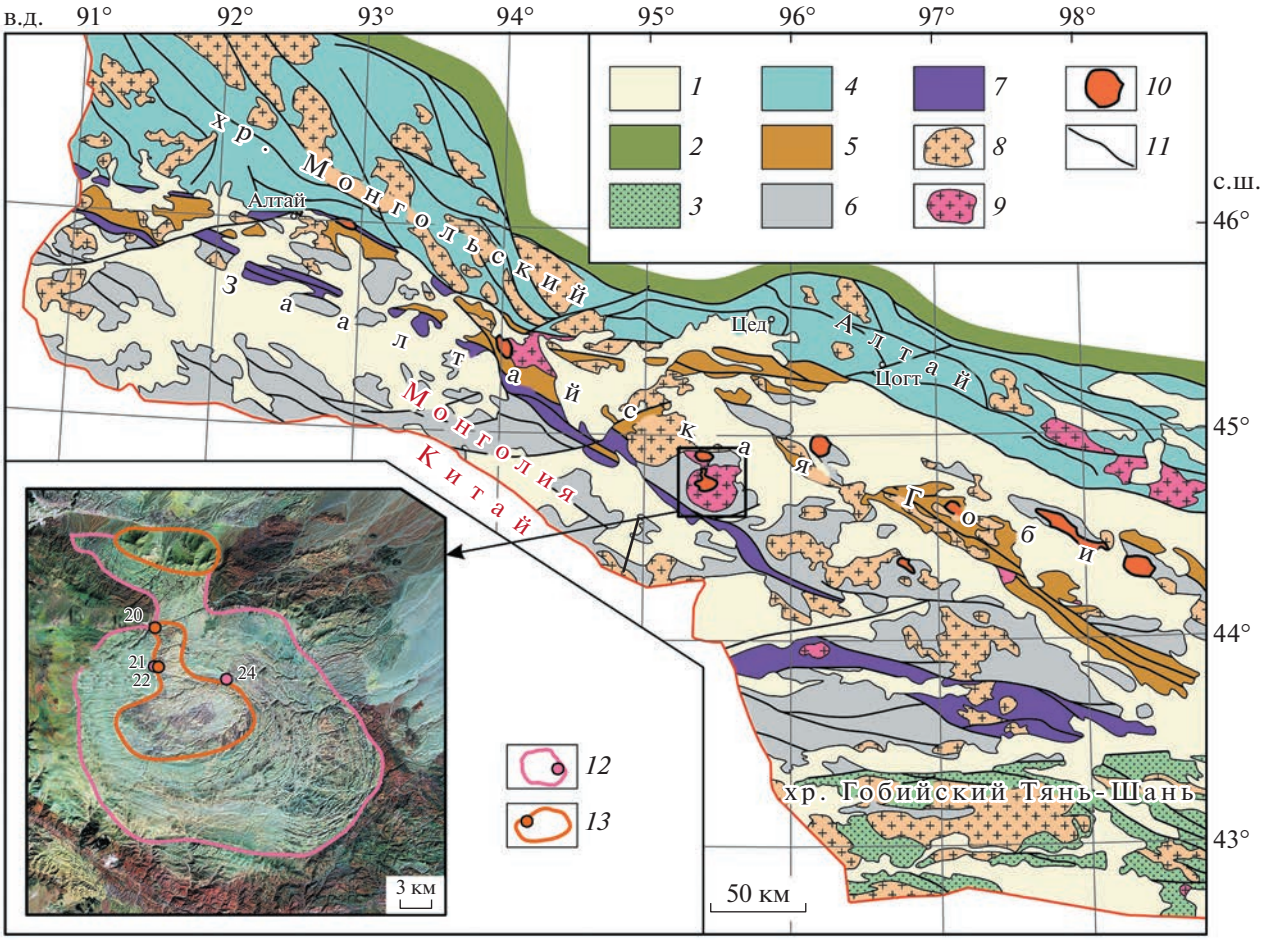

Рис. 1. Схема геологического строения Юго-Западной Монголии. *1* – мезозой-кайнозойский осадочный чехол; *2* – поздненеопротерозойские-раннепалеозойские островодужные комплексы Озёрной зоны; *3* – раннепалеозойские (?) метаморфические комплексы Гоби-Тяньшаньской зоны; *4* – раннепалеозойские метавулканогенно-осадочные комплексы Монгольского Алтая; *5* – среднепалеозойские островодужные вулканогенные комплексы Заалтайской Гоби; *6* – раннекарбоновые окраинно-континентальные вулканогенно-осадочные комплексы; *7* – зоны тектонического меланжа; *8–10* – гранитоиды: *8* – допермские известково-щелочные. *9* – пермские известково-щелочные. *10* – карбон-пермские щелочно-полевошпатовые; *11* – главные тектонические нарушения. На врезке схема дешифрирования космического снимка Landsat-7 района гранитоидного массива Адж-Богд с положением исследованных образцов. *12* – двуполевошпатовые граниты ранней фазы (ГрI); *13* – щелочно-полевошпатовые граниты поздней фазы (ГрII).

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ЦИРКОНЕ ГРАНИТОВ

В цирконе визуально диагностированы раскристаллизованные расплавные включения размером до 30 мкм. Термометрические эксперименты с включениями в цирконе из ГрII, проведенные при ступенчатом нагреве с шагом по температуре $T = 50°$ в муфельной печи (ИГЕМ РАН), показали, что их полная гомогенизация происходит при температуре $T_{гом} = 825–850°C$. Для того, чтобы предотвратить декрипитацию, возможную вследствие нагревания при атмосферном давлении и иногда приводящую к потере расплавами летучих, серия экспериментов по гомогенизации включений в цирконах из этих гранитов была также проведена в газовом аппарате высокого давления (ИЭМ РАН, г. Черноголовка) при температуре 900°C и давлении 4 кбар с выдержкой в течение 5 сут и последующей изобарической закалкой (2–3 мин). Установлено, что расплав, зафиксированный в качестве включений в цирконе из ГрII, характеризуется пониженными относительно породы содержаниями суммы щелочей, составляющей 6.7–7.6 мас. %, FeO – до 0.2 мас. %, TiO_2 – 0.16 мас. %, CaO – до 0.4 мас. %, MgO – до 0.16 мас. % (табл. 1). При этом содержания SiO_2 в расплаве включений варьируют от 72.3 до 73.6 мас. %, тогда как в породе концентрации кремнекислоты не превышает 70 мас. %. Для расплавов из включений, так же, как и для содержащих циркон гранитов второго типа, характерна калиевая специфика (табл. 1). Судя по дефициту суммы главных оксидов, рас-

Таблица 1. Состав гранитоидов массива Адж-Богд и расплавных включений в цирконе щелочно-полевошпатовых гранитоидов

Образец	20	21	22	24	20-1	21-1	21-2	21-3	21-4
Диаметр зонда	–	–	–	–	3 мкм	8 мкм	10 мкм	4 мкм	4 мкм
SiO_2	67.30	70.05	71.03	74.13	72.44	73.62	72.73	73.25	72.05
TiO_2	0.50	0.40	0.27	0.13	0.09	0.16	0.08	0.16	0.16
Al_2O_3	17.25	15.64	15.01	13.97	11.51	11.25	11.12	11.33	10.47
FeO*	1.24	1.40	1.61	0.95	0.15	0.10	0.21	0.23	0.06
MnO	0.09	0.08	0.05	0.03	0.00	0.07	0.01	0.03	0.02
MgO	0.20	0.25	0.46	0.27	0.00	0.16	0.00	0.02	0.00
CaO	0.80	0.85	1.91	1.31	0.23	0.32	0.35	0.42	0.22
Na_2O	5.01	4.58	3.19	3.45	2.12	2.85	2.79	2.06	2.22
Na_2O**	–	–	–	–	2.79	3.04	2.98	2.39	2.59
K_2O	6.70	6.01	5.17	4.95	4.65	4.59	4.27	4.36	4.49
P_2O_5	0.04	0.06	0.08	0.04	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01
П.П.П.***	0.46	0.27	0.77	0.58	–	–	–	–	–
Сумма	99.59	99.58	99.55	99.80	91.86	93.32	91.75	92.20	90.06

Примечание. 20–21 – щелочно-полевошпатовые граниты (ГрII). 22–24 – двуполевошпатовые граниты (ГрI). 20-1–21-4 – расплавные включения в цирконе щелочно-полевошпатовых гранитов 20 и 21 (ГрII). * – FeO общее; ** – Na_2O с поправкой для определенного диаметра зонда [12]; *** – потери при прокаливании.

плавы, ответственные за кристаллизацию циркона из ГрII, содержали значительное количество H_2O, оценить которое количественно по разности 100%-(сумма оксидов) (например, [7]) невозможно из-за слишком малого размера включений. Кроме того, в цирконе установлены кристаллические включения, сингенетичные расплавным. Среди них выявлены щелочной полевой шпат, кварц и фторапатит. Эти данные в совокупности с результатами исследования состава расплавных включений дают основание полагать, что циркон кристаллизовался после или одновременно с формированием щелочного полевого шпата, кварца и F-апатита.

ТЕМПЕРАТУРА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЦИРКОНА

При реконструкции термальной истории гранитов использовали два из отмеченных во введении метода: (1) – температура насыщения цирконом (T_{Zrnsat}; [4, 5]); (3) – цирконий-гафниевый геотермометр – T_{ZH}. [7]. Первоначальный вариант цирконий-гафниевого геотермометра [7] был основан на литературных экспериментальных данных по растворимости циркона и гафнона в близких по составу силикатных расплавах. Недавно нами (статья готовится к печати) были получены новые экспериментальные данные по растворимости этих минералов в широком интервале T(900–1500°C) и состава расплавов, которые подтвердили близость коэффициентов активности частиц Zr и Hf в расплавах и позволили существенно уточнить уравнение геотермометра:

$$T_{ZH}, \mathrm{K} = 1968/(14.548 + \ln[\mathrm{Hf/Zr}]^{m} - \ln[\mathrm{Hf}]^{Zrn}). \quad (1)$$

В уравнении (1) надстрочные индексы *m* и *Zrn* обозначают, соответственно, расплав (породу) и циркон, а в квадратных скобках – концентрации элементов в ppm.

Температура насыщения цирконом. Результаты оценки температуры по индексу насыщения цирконом приведены в табл. 2. Для образцов ГрII значения T, рассчитанные по уравнениям, предложенным в работах [2] и [4], практически совпадают и близки к оценке температуры гомогенизации расплавных включений в цирконе из этих образцов. Значения T, полученные для образцов ГрI, оказались значительно ниже, и расхождения между расчетами по [2] и [4] весьма велики, хотя и не выходят за пределы погрешностей обеих калибровок. Возможно, эти различия связаны с небольшой ошибкой экстраполяции высокотемпературных экспериментальных данных, на которых основывалось уравнение [2], в область относительно низких температур. Следует также отметить, что в уравнение, предложенное в [4], входят параметры, связанные с давлением (P) и содержанием H_2O в расплаве (xH_2O), что несколько повышает неопределенность оценки T. В своих расчетах мы использовали $P = 0.1$ ГПа и $xH_2O = 0.1$ (что примерно соответствует 3 мас. % H_2O, т.е. значению, близкому к максимальной

растворимости воды в гранитном расплаве при этом давлении).

Цирконий-гафниевый геотермометр. Поскольку все изученные зёрна *Zrn* неоднородны по содержанию HfO_2, результаты расчетов по уравнению (1) сильно зависят от выбора участка, соответствующего началу кристаллизации минерала. Большинство цирконов из обоих типов гранитоидов характеризуются отчетливой зональностью с увеличением содержания Hf от центра к краям зёрен, что хорошо согласуется с многочисленными данными по циркону широкого спектра магматических комплексов ([7, 8] и ссылки там). Эта особенность обусловлена предпочтительным фракционированием из расплавов Zr относительно Hf по мере роста минерала, что приводит при остывании и обогащению Hf расплавов и кристаллизующихся из них цирконов. Для оценки температуры начала кристаллизации этих цирконов по уравнению (1) мы использовали состав центральных зон кристаллов с максимальным значением Zr/Hf отношения [7]. Исключение сделано для зерна циркона из образца 20 (рис. 3 б). Во-первых, судя по внутренней структуре и резко ассиметричной зональности, это, скорее всего, обломок более крупного кристалла, а во-вторых, его ядро по содержанию HfO_2 очень близко к ядрам цирконов из образцов гранитов ГрI, что позволяет рассматривать эти зёрна как антекристы [8]. Поэтому при расчете T_{ZH} для подобных зёрен мы использовали состав внутренних зон, следующих сразу за унаследованными ядрами.

Результаты расчетов температуры по уравнению (1) (табл. 2) в целом неплохо согласуются с оценками, основанными на индексе насыщения цирконом. Для образцов ГрI они оказались ближе к значениям T по уравнению [2], а для ГрII – несколько ниже, чем по обеим калибровкам [2, 4] и ниже оценок, основанных на температуре гомогенизации расплавных включений в цирконе (~850°C), хотя в пределах ошибок оценки по всем методам достаточно хорошо согласуются друг с другом.

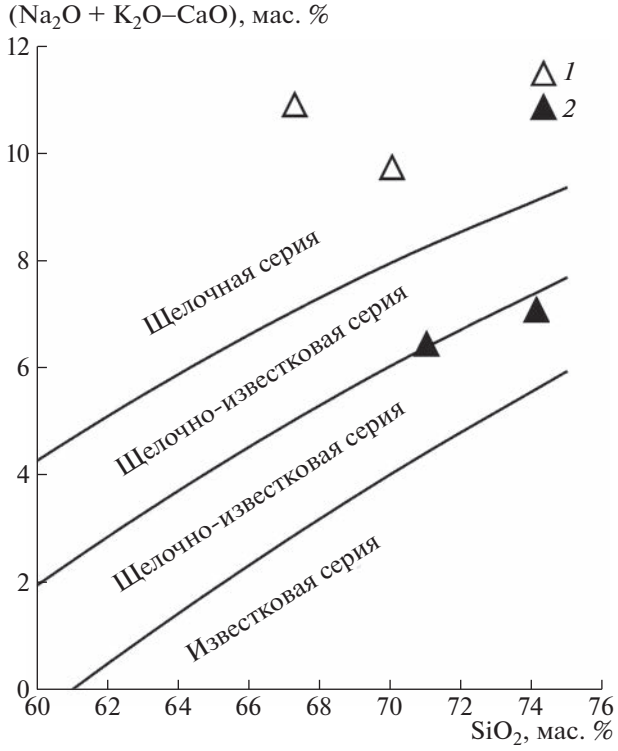

Рис. 2. Петрохимическая классификация гранитов массива Адж-Богд по известково-щелочному индексу Пикока. *1* – щелочно-полевошпатовые граниты поздней фазы внедрения (ГрII). *2* – двуполевошпатовые граниты ранней фазы внедрения (ГрI).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Различия в составе расплавных включений в цирконах и вмещающих их гранитов ГрII (табл. 1): пониженные относительно породы содержания суммы щелочей, содержания FeO, TiO_2, CaO и

Таблица 2. Оценки температуры кристаллизации циркона в гранитоидах массива Адж-Богд

Образец	20	21	22	24
Zr порода, ppm	460	411	135	131
Hf порода, ppm	9.90	8.26	3.58	3.92
Hf в *Zrn*, ppm	7360	6817–7140	7301	8768
T_{Zrnsat}, °C [4]	850	856	769	755
σT, °C	52	52	43	46
T_{Zrnsat}, °C [2]	853	853	693	701
σT, °C	51	48	52	64
T_{ZH}*, °C	817(R9)	810(R3)–840(R4)	700(R5)	730
σT, °C	39	41	38	43

Примечание. *В скобках – номер профиля на рис. 4.

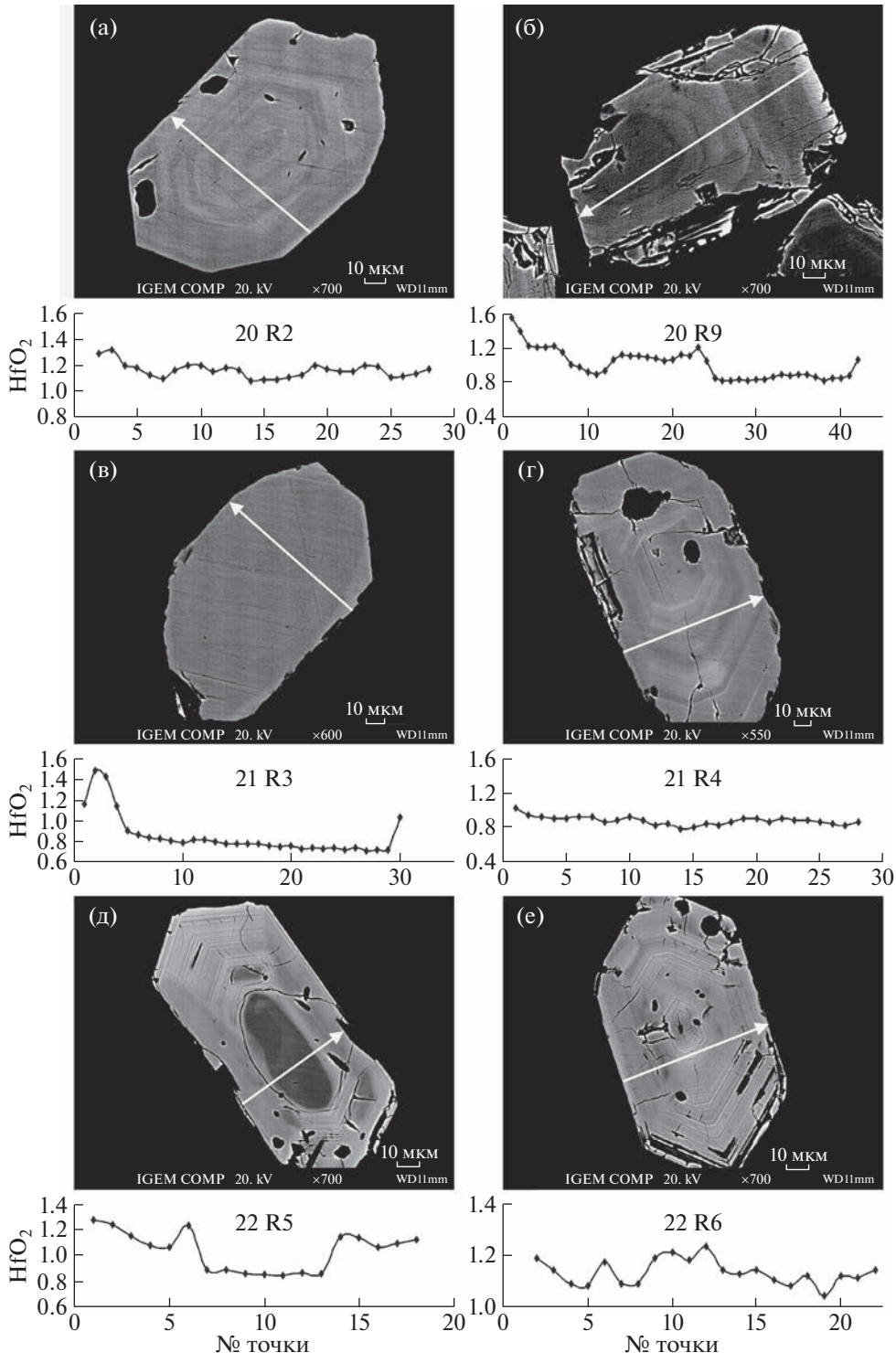

Рис. 3. Профили содержания HfO_2 в цирконах гранитоидов массива Адж-Богд: а)–г) – поздних щелочно-полевошпатовых гранитов (ГрII); д)–е) – ранних двуполевошпатовых гранитов (ГрI).

MgO, наряду с повышенным содержанием SiO_2 (табл. 1) – указывают на более раннюю или одновременную с цирконом кристаллизацию амфибола. Отношение Na_2O/K_2O во включениях также несколько ниже, чем в ГрII, что, скорее всего, связано с ранней кристаллизацией полевого шпата. Количественно оценить влияние изменения состава расплавов на оценки T_{Zrnsat} невозможно, т.к. из-за малых размеров расплавных включений нельзя надежно измерить содержание в них Zr.

Однако простые расчеты на качественном уровне позволяют заключить, что это влияние очень незначительно: ранняя кристаллизация даже всего содержащегося в породе амфибола (4–5 об. %) при среднем содержании Zr в нем примерно 53 ppm [9] могла привести лишь к небольшому (порядка 3 ppm) уменьшению концентрации Zr в расплаве по сравнению с исходным. Этот вывод справедлив и в отношении влияния ранней кристаллизации полевого шпата, среднее содержание Zr в котором примерно в 5 раз ниже, чем в амфиболе [9]. Кроме того, эффект, связанный с небольшим уменьшением валовой концентрации Zr, должен был компенсироваться увеличением содержания SiO_2 в расплаве. Приведенные выше аргументы справедливы также и в отношении оценок T_{ZH}, поскольку кристаллизация амфибола и плагиоклаза не могла значимо повлиять на Zr/Hf отношение в расплавах.

Валовая концентрация Zr в ГрI в 3–4 раза ниже, чем в ГрII, поэтому ранняя кристаллизация относительно обогащенных цирконием минералов могла потенциально сказаться на оценке T_{Zrnsat}. Однако в этих гранитах амфибол отсутствует, а кристаллизация биотита, присутствующего в количестве 5–6 об. %, в силу обычно очень низкого содержания Zr (1–2 ppm; [9]) не могла существенно повлиять на результаты расчетов.

Таким образом, полученные оценки (табл. 2) свидетельствуют о значительно более высокой (на 100–120°C) температуре образования поздних щелочно-полевошпатовых гранитов (ГрII) по сравнению с более ранними двуполевошпатовыми гранитами (ГрI). Кроме того, ГрI и ГрII относятся к двум различным магматическим сериям – известково-щелочной и щелочной соответственно. Ввиду этого, вероятнее всего, ГрII нельзя рассматривать как продукты дифференциации ГрI. Хотя этапы формирования более ранних двуполевошпатовых гранитов (ГрI) и более поздних щелочно-полевошпатовых гранитов (ГрII) могли быть разделены геологически очень коротким промежутком времени, они существенно различались по термальному режиму. Значительно более высокая температура образования гранитов ГрII предполагает необходимость дополнительного источника тепла, которым могли служить мантийные расплавы (mantle derived melts) [13], свидетельством участия которых в формировании массива Адж-Богд являются мафические дайки, разделяющие породы двух гранитных фаз внедрения. Высокотемпературная природа (суб)-щелочных гранитоидов А-типа неоднократно подчеркивалась в петрологических работах (например, [13, 14]). Однако контрастный температурный режим близких по времени известково-щелочной и щелочной фаз внедрения установлен впервые в этой работе.

ВЫВОДЫ

1. При реконструкции термальной истории гранитоидного массива Адж-Богд были изучены двуполевошпатовые граниты ранней фазы внедрения и щелочно-полевошпатовыех граниты поздней фазы. Было предложено два основных подхода к использованию циркона как геотермометра: температура насыщения цирконом и цирконий-гафниевый геотермометр. Оба подхода демонстрируют схожую термальную картину формирования гранитов массива.

2. Согласно оценке температуры по индексу насыщения цирконом, двуполевошпатовые граниты ранней фазы (ГрI) формировались при температурах $T = 700–770$°C в то время, как температура кристаллизации щелочно-полевошпатовых гранитов поздней фазы внедрения (ГрII) соответствует 850°C.

3. Результаты расчетов температуры кристаллизации двух типов гранитов массива Адж-Богд по цирконий-гафниевому геотермометру показывают довольно узкий диапазон значений. Для ранних двуполевошпатовых гранитов были получены температуры 700–730°C, а для поздних щелочно-полевошпатовых гранитов, главным образом, $T = 810–820$°C.

4. По результатам термобарогеохимических исследований расплавных включений в цирконе щелочно-полевошпатовых гранитов поздней фазы был определен температурный интервал их формирования – 825–850°C.

5. Все полученные оценки температур кристаллизации гранитов двух фаз внедрения массива Адж-Богд свидетельствуют о значительно более высокой (на 100–120°C) температуре образования щелочно-полевошпатовых гранитов (Гр II) по сравнению с более ранними двуполевошпатовыми гранитами (ГрI). Существенно более высокая температура образования поздних щелочно-полевошпатовых гранитов предполагает необходимость дополнительного источника тепла, которым могли служить мантийные расплавы. Об участии таких расплавов в формировании массива Адж-Богд свидетельствуют мафические дайки, разделяющие породы двух гранитных фаз внедрения. Контрастный температурный режим близких по времени известково-щелочной и щелочной фаз внедрения установлен впервые в этой работе.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-17-00052.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Watson E.B., Harrison T.M.* // Earth Planet. Sci. Lett. 1983. V. 64. P. 295–304.

2. *Borisov A., Aranovich L.* // Chem. Geol. 2019. V. 510. P. 103–112.
3. *Boehnke P., Watson E.B., Trail D. et al.* // Chem. Geol. 2013. V. 351. P. 324–334.
4. *Crisp L.J., Berry A.J.* // Contribs. Mineral. Petrol. 2022. V. 177. P. 71.
5. *Ferry J.M., Watson E.B.* // Contrib. Mineral. Petrol. 2007. V. 154. № 4. P. 429–437.
6. *Borisov A., Aranovich L.* // Chem. Geol. 2020. V. 556. 119817.
7. *Аранович Л.Я., Бортников Н.С.* // Петрология. 2018. Т. 26. № 2. P. 109–115.
8. *Аранович Л.Я., Бортников Н.С., Борисов А.А.* // Геология и геофизика. 2020. Т. 61. № 5–6. С. 685–700.
9. *Bea F., Montero P., Ortega M.* // Can. Mineral. 2006. V. 44. P. 693–714.
10. *Palme H., O'Neill H.St.S.* // Treatise on Geochemistry. 2nd Ed. 2014. V. 3. P. 1–39.
11. *Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б. и др.* // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2008. Т. 16. № 2. С. 59–80.
12. *Андреева О.А., Ярмолюк В.В., Андреева И.А. и др.* // Петрология. 2018. Т. 26. № 5. С. 535–566.
13. *Martin R.F.* // Lithos. 2006. V. 91. P. 125–136.
14. *Bonin B.* // Lithos. 2007. V. 97. P. 1–29.

COMPARATIVE GEOTHERMOMETRY OF THE AJ-BOGD GRANTITOID MASSIF (SOUTHERN MONGOLIA) BASED ON ZIRCON STUDY

O. A. Andreeva[a,#], Academician of the RAS L. Ya. Aranovich[a], A. M. Kozlovsky[a], M. A. Golunova[a,b], D. D. Kaplanskaya[a], and S. E. Borisovskii[a]

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

[b] *D.S. Korzhinskiy Institute of Experimental Mineralogy Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation*

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

The Aj-Bogd massif, located in the Trans-Altai Gobi within the Hercynides of the Central Asian fold belt, is composed of rocks from two main intrusion phases. The rocks of the early phase are represented by two-feldspar granites. while the late phase is characterized by alkali-feldspar granites. During the reconstruction of the thermal history of these granites zircon was chosen as a mineral-indicator of the temperature regime of their formation. Two main approaches to using this mineral as a geothermometer have been proposed: the zircon saturation index and the zirconium-hafnium geothermometer. Both approaches demonstrate a similar thermal picture of the formation of granites from Aj-Bogd massif. Alkaline feldspar granites of the late intrusion phase crystallized at temperatures of 810–850°C while two-feldspar granites of the early phase formed at temperatures of 700–770°C. According to thermobarogeochemical studies of melt inclusions in zircon of late-phase alkali-feldspar granites, a similar temperature range of their formation was defined (825–850°C). All obtained data of the formation temperatures of studied granites from Aj-Bogd massif indicate a significantly higher (by 100–120°C) temperature of formation of alkali-feldspar granites compared to earlier two-feldspar granites. The significantly higher crystallization temperature of late alkali feldspar granites allow us to suggest the appearance of an additional heat source that could be mantle derived melts. The evidence of such melt participation in the formation of Aj-Bogd massif are mafic dikes that separate granites of two intrusion phases. The contrast temperature regime of the calc-alkaline and alkaline intrusion phases close in time was determined for the first time in this work.

Keywords: zircon, zircon saturation index, zirconium-hafnium geothermometer, melt inclusions