ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 493, № 2, с. 41–45

ГЕОХИМИЯ

УДК 550.424:552.13

ОСОБЕННОСТИ Rb–Sr-ИЗОТОПНОЙ СИСТЕМЫ ГРАНИТОВ: РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СВЕЖЕЙ И ИЗМЕНЕННОЙ РАЗНОСТИ ПЛАГИОКЛАЗА ИЗ ЛЕЙКОГРАНИТОВ РАУМИДСКОГО МАССИВА (ПАМИР)

© 2020 г. К. Н. Шатагин[1,*], В. Н. Волков[1]

Представлено академиком И. В. Чернышевым 30.05.2020 г.
Поступило 30.05.2020 г.
После доработки 08.06.2020 г.
Принято к публикации 09.06.2020 г.

Проведено изотопное Rb–Sr-изучение разностей плагиоклаза из лейкогранитов Раумидского массива (Памир). Изученные разности представляют: 1) свежий, водяно-прозрачный магматический олигоклаз и 2) измененный, замутненный вследствие автометаморфической соссюритизации плагиоклаз. Сравнение результатов, полученных по сосуществующим в одном образце разностям, показало, что соссюритизация привела к увеличению в измененном плагиоклазе концентраций Rb и Sr, при этом изотопные отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ и $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ тоже увеличились. Полученные данные позволяют утверждать: соссюритизация плагиоклаза в гранитах сопровождается привносом щелочных и щелочноземельных элементов. Пример Раумидского массива показывает, что в процессе автометаморфизма в граниты может привноситься вещество из вмещающих пород.

Ключевые слова: граниты, автометаморфизм, плагиоклаз, соссюрит, Rb–Sr изотопная система, Раумидский массив

DOI: 10.31857/S2686739720080198

Окончательный петрографический облик гранитов формируется на ранней постмагматической стадии в процессе так называемого автометаморфического (др. назв. – автометасоматического) преобразования их породообразующих минералов. На этой стадии в ходе постмагматического взаимодействия с выделившимся из магмы флюидом полевые шпаты и биотит претерпевают характерные изменения: серицитизацию, соссюритизацию и хлоритизацию. Такие изменения проявлены в большей или меньшей степени практически во всех гранитах Земли.

Знание о деталях автометаморфического преобразования минералов необходимо при изучении хронологии процессов образования [1] и преобразования [2] гранитов и расшифровке их петрогенезиса [3]. Важную роль в таких исследованиях играет Rb–Sr-изотопный метод [3], однако, целенаправленного изучения влияния автометаморфического процесса на состояние Rb–Sr-изотопной системы гранитов до настоящего времени не проводилось, и данная статья призвана частично заполнить имеющийся пробел.

Влияние автометаморфического процесса на химический состав и изотопные системы гранитов можно определить методом прямого сравнения результатов, полученных по неизмененному и измененному веществу. К сожалению, в случае применения Rb–Sr-метода этот подход наталкивается на серьезное препятствие – невозможность выделения из гранита необходимого для проведения анализа количества свежей и измененной разности того или иного породообразующего минерала. Однако, в редких случаях выделить необходимые фракции оказывается возможно. Это удалось сделать при изучении плагиоклаза из лейкогранитов Раумидского массива.

Раумидский массив расположен на Южном Памире, на северном склоне Рушанского хребта. Массив образовался в гипабиссальных условиях 35.5 ± 0.9 млн лет назад [4]. В его составе выделены граниты восьми фаз, имеющие между собой интрузивные соотношения [5]. Все слагающие массив породы представлены петрохимически весьма сходными двуполевошпатовыми биотитовыми лейкогранитами.

[1] *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия*
**E-mail: k.shatagin@mail.ru*

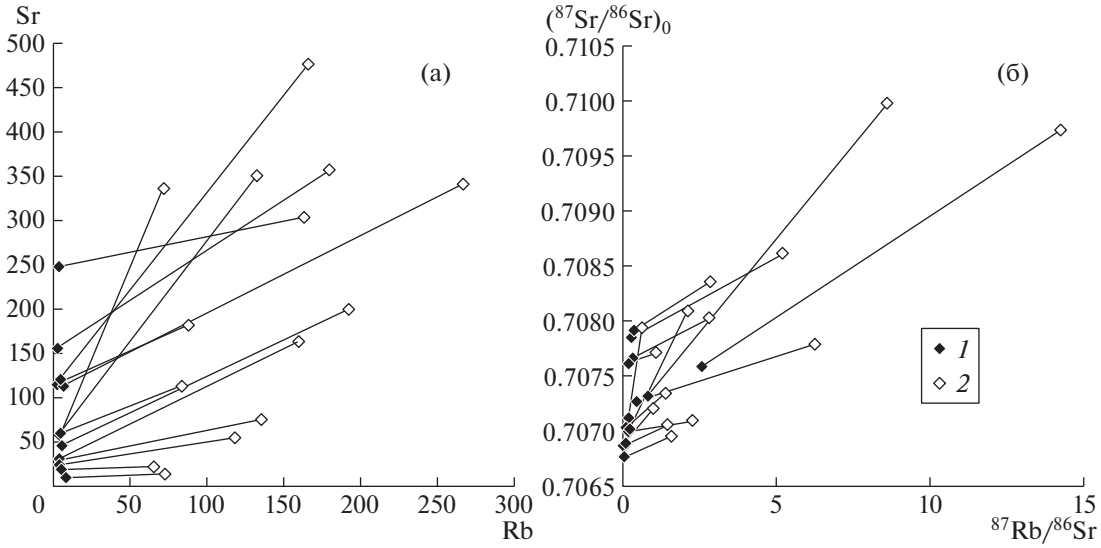

Рис. 1. Результаты сравнительного изучения фракций свежего и измененного плагиоклаза, сосуществующих в гранитах Раумидского массива: (а) соотношение концентраций Rb и Sr; (б) Rb–Sr-изотопная диаграмма. Условные обозначения: *1* – свежий плагиоклаз, *2* – измененный плагиоклаз; линии соединяют точки разностей плагиоклаза, сосуществующих в одном образце.

Плагиоклаз в гранитах Раумидского массива представлен олигоклазом (An_{10-25}). Минерал частично соссюритизирован, участками по нему развиты серицит и флюорит. Изменения проявлены неравномерно, главным образом, вдоль границ зерен и по трещинам в них. Во многих зернах плагиоклаза сохранились незатронутые постмагматическим преобразованием области, размер которых достаточно велик чтобы этот материал можно было извлечь с использованием стандартных методов разделения минералов. Визуально в образцах и мономинеральных фракциях свежий плагиоклаз выделяется водяно-прозрачным обликом. В сравнении со свежим измененный плагиоклаз выглядит замутненным, полупрозрачным вплоть до непрозрачного молочно-белого.

Фракции плагиоклаза для изотопных исследований были подготовлены методом ручной отборки под бинокулярным микроскопом после выделения плагиоклаза в тяжелых жидкостях. Этим методом отобраны пары фракций, представляющих сосуществующие в одном образце прозрачный (свежий) и замутненный (измененный) плагиоклаз. Пары разностей подготовлены для 14 образцов раумидских гранитов, представляющих все фазы становления массива.

Полученные результаты Rb–Sr-изотопного изучения плагиоклаза из гранитов Раумидского массива представлены в табл. 1. По аналитическим данным для каждой фракции плагиоклаза выполнен расчет изотопного состава стронция на момент времени 35.5 млн лет назад, соответствующий изотопному возрасту массива. Все данные вынесены на графики, представленные на рис. 1.

Сравнение между собой данных, полученных по разным образцам, показало, что свежий плагиоклаз гранитов Раумидского массива оказался сравнительно выдержанным по концентрации Rb, но резко неоднородным как по концентрации Sr (рис. 1а), так и по значению $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ (рис. 1б). Наблюдаемые вариации химического и изотопного состава отражают пространственную и временную неоднородность гранитов массива. Учитывая магматическое происхождение минерала можно заключить, что неоднородность гранитов отражает неоднородность магматического расплава, из которого опробованные граниты сформировались. Обсуждение механизма возникновения этой неоднородности выходит за рамки тематики данной статьи.

Измененный плагиоклаз характеризуется большим, чем свежий, диапазоном вариаций как химического, так и изотопного состава. Концентрация Rb в нем всегда значительно выше, чем в свежем плагиоклазе, концентрация Sr меняется от характерных для свежего плагиоклаза до в несколько раз более высоких значений (рис. 1а). По изотопным характеристикам измененный плагиоклаз отличается повышенными значениями отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$, при этом значения отношения $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ меняются в нем от в среднем сходных со свежими разностями до более высоких (рис. 1б).

Попарное сравнение сосуществующих в одном образце разностей плагиоклаза показало, что

Таблица 1. Результаты изотопного Rb–Sr-исследования фракций свежего и измененного плагиоклаза, сосуществующих в гранитах Раумидского массива

Образец	Разность[1]	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	$^{87}Rb/^{86}Sr$[2]	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$\pm 2\sigma$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$[3]
902-4	свеж.	3.15	156	0.0587	0.706891	0.000016	0.70686
	изм.	179	358	1.45	0.707787	0.000011	0.70706
909-1	свеж.	3.60	249	0.0419	0.706789	0.000015	0.70677
	изм.	163	303	1.56	0.707732	0.000009	0.70695
936-1	свеж.	2.96	114	0.0749	0.707073	0.000012	0.70704
	изм.	87.7	182	1.40	0.708047	0.000009	0.70734
928-1	свеж.	6.19	113	0.159	0.707075	0.000014	0.70700
	изм.	267	341	2.27	0.708240	0.000009	0.70710
818-1	свеж.	4.19	121	0.100	0.706948	0.000011	0.70690
	изм.	165	476	1.01	0.707720	0.000010	0.70721
956-1	свеж.	2.53	28.3	0.258	0.707991	0.000012	0.70786
	изм.	135	75.8	5.16	0.711210	0.000009	0.70861
П3	свеж.	4.13	60.5	0.198	0.707219	0.000013	0.70712
	изм.	71.8	336	0.618	0.708254	0.000020	0.70794
967	свеж.	3.93	31.9	0.356	0.708097	0.000012	0.70792
	изм.	160	163	2.83	0.709790	0.000013	0.70836
967-1	свеж.	5.03	46.1	0.316	0.707819	0.000010	0.70766
	изм.	192	200	2.78	0.709431	0.000009	0.70803
967а	свеж.	3.81	58.9	0.187	0.707704	0.000010	0.70761
	изм.	133	351	1.10	0.708271	0.000009	0.70772
826-1	свеж.	3.68	23.1	0.460	0.707506	0.000017	0.70727
	изм.	118	55.1	6.18	0.710909	0.000014	0.70779
122-1	свеж.	4.77	59.0	0.234	0.707130	0.000013	0.70701
	изм.	83.6	114	2.13	0.709161	0.000009	0.70810
832-1	свеж.	5.11	18.4	0.803	0.707729	0.000012	0.70732
	изм.	65.4	22.2	8.52	0.714270	0.000027	0.70998
826-2	свеж.	8.26	9.36	2.56	0.708872	0.000012	0.70758
	изм.	72.8	14.9	14.1	0.716865	0.000013	0.70973

Примечание. [1] свеж. – свежая водяно-прозрачная разность, изм. – измененная замутненная разность; [2] погрешность определения отношения не превышает 1% (2σ); [3] изотопный состав стронция 35.5 млн лет назад. Изотопные Rb–Sr-исследования выполнены в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН. Подготовка вещества для изотопного анализа проведена по традиционной методике [6]. Определение концентраций элементов и величины отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ осуществлено методом изотопного разбавления с использованием трасера ^{85}Rb–^{84}Sr. Измерение изотопных отношений проведено на многоколлекторном термоионизационном масс-спектрометре Sector 54 (Micromass, Англия). Величина отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ приведена к значению 0.710248 в стандарте изотопного состава стронция NIST SRM-987.

замутненный плагиоклаз имеет от 1.2 до 6.0 раз более высокую концентрацию Sr и от 3 до 57 раз более высокую концентрацию Rb (рис. 1а). Замутненный плагиоклаз во всех без исключения случаях характеризуется на 0.1–1.1% более высоким значением $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ (рис. 1б). Обнаруженное различие по изотопному составу стронция на два-три порядка превышает аналитическую погрешность.

Выявленные в каждом образце различия между разностями плагиоклаза по концентрации Rb и Sr и величине изотопных отношений $^{87}Rb/^{86}Sr$ и $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ коррелируют с отсутствием или наличием в них постмагматических изменений. Следовательно, причиной наблюдаемых различий между разностями является именно постмагматическая соссюртитзация.

Соссюритизация плагиоклаза выражается в образовании по первичному минералу тонкозернистого агрегата цоизита, альбита, серицита и, реже, некоторых других минералов. Более высокая концентрация Rb (вследствие образования

серицита) и Sr (вследствие образования цоизита) в измененном плагиоклазе, а так же относительно большее значение отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$ в нем, вполне могут быть объяснены привносом щелочных и щелочноземельных элементов флюидом, под влиянием которого по свежему плагиоклазу развился соссюритовый агрегат.

Данные по изотопному составу стронция показывают, что действовавший флюид нес стронций с более высоким, чем в свежем плагиоклазе, значением отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$. Реакция между флюидом и свежим плагиоклазом приводила к замещению части минерала соссюритом. Величина $^{87}Sr/^{86}Sr$ образующегося соссюрита определялась пропорцией смешения стронция из объема захваченного процессом свежего плагиоклаза и стронция из флюида. Таким образом, значение отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ во флюиде было выше, чем в проанализированных фракциях измененного плагиоклаза. Однако точное значение (или значения) этого отношения неизвестно.

Относительно более высокое, чем в гранитах, значение $^{87}Sr/^{86}Sr$ во флюиде можно рассмотреть в рамках трех гипотетических моделей протекания автометаморфического изменения пород Раумидского массива.

1) Если флюид был малоподвижным и обеспечивал перераспределение вещества только в ограниченных объемах гранита, тогда причиной возникновения в нем относительно более высокого значения $^{87}Sr/^{86}Sr$ мог быть только процесс радиоактивного распада рубидия, происходящего в K–Na-полевом шпате и биотите. Для накопления в стронции этих минералов достаточной радиогенной добавки требуется время. Это же время должен длиться автометаморфический процесс, обеспечивающий перенос стронция с высоким значением $^{87}Sr/^{86}Sr$ из охваченных постмагматическим изменением объемов K–Na-полевого шпата и биотита в образующийся по плагиоклазу соссюритовый агрегат.

Пользуясь данными о величине $^{87}Rb/^{86}Sr$ в пробах пород в целом раумидских гранитов из [7] можно оценить, сколько требовалось времени для изменения изотопного состава стронция от значений $^{87}Sr/^{86}Sr$ в свежем плагиоклазе до уровня величины этого отношения в измененном плагиоклазе ряда образцов. Оценки для гранитов второй, четвертой и пятой фаз составляют диапазон значений 2.5–10.4 млн лет. Это минимально необходимая по условиям модели продолжительность автометаморфического процесса.

Вместе с тем, результаты проведенного ранее изотопного датирования позволяют утверждать, что Раумидский массив сформировался за весьма короткое время – изотопные возрасты гранитов (U–Pb по циркону и Rb–Sr по неизмененным минералам) всех датированных фаз массива (включая восьмую заключительную) в пределах погрешности совпадают на уровне 35.5 ± 0.9 млн лет [4]. Тот же с учетом погрешности возраст имеют и высокотемпературные метасоматиты (грейзены) и автометаморфически измененные минералы гранитов первой фазы [8]. Таким образом, имеющиеся геохронологические данные заставляют заключить, что постмагматическое изменение минералов закончилось практически одновременно с кристаллизацией гранитов массива. Соответственно, рассматриваемая модель представляется несостоятельной.

2) В рамках второй модели допускается, что флюид циркулировал во всем объеме Раумидского массива. В этом случае можно предположить, что стронций с высоким значением отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ попадал во флюид в процессе реакции с минералами гранитов с высоким начальным изотопным составом стронция, наличие которых фиксируется данными о значении $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ в разностях свежего плагиоклаза из ряда изученных образцов. Фактор времени в данной модели не имеет значения, и предполагается, что, как было сказано выше, постмагматическое преобразование минералов произошло одновременно с формированием Раумидского массива.

Рассматриваемая модель позволяют объяснить только часть полученных результатов – для образования целого ряда образцов измененного плагиоклаза необходимо, чтобы флюид нес стронций с более высоким значением отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$, чем в максимально обогащенных радиогенным стронцием фракциях свежего плагиоклаза. Таким образом, имеющиеся данные противоречат модели.

3) Если флюид, вызвавший постмагматическое изменение породообразующих минералов, циркулировал в том числе и вне тела массива, то есть во вмещающих породах, то можно предположить, что стронций с высоким значением отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ был флюидом усвоен именно там.

Вмещающие породы Раумидского массива представлены разновозрастными метаморфогенно-осадочными толщами [9], которые к моменту образования магматического тела могли иметь высокое значение отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$. Кроме того, в эндоконтактовой и экзоконтактовой зонах массива фиксируются тела пегматитов, кварцевых и грейзеновых жил с флюоритом, молибденитом и бериллом [5], наличие которых указывает на интенсивное флюидное взаимодействие вмещающих пород и гранитов на позднемагматической и ранней постмагматической стадиях.

Взаимодействие флюида, вызвавшего соссюритизацию плагиоклаза, с вмещающими породами Раумидского массива на данный момент представляется лучшим объяснением высокого значе-

ния отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ во флюиде и, как следствие этого, в измененных разностях плагиоклаза гранитов.

Полученные результаты имеют значение не только для изученных гранитов Раумидского массива, но важны и для понимания процессов, происходящих на ранней постмагматической стадии формирования всех интрузивных гранитов. Можно уверенно утверждать, что соссюритизированный плагиоклаз гранитов существенно отличается от первичного плагиоклаза более высокой концентрацией Rb и Sr, а также более высоким значением изотопного отношения $^{87}Rb/^{86}Sr$. Пример гранитов Раумидского массива показывает, что есть вероятность искажения в измененном плагиоклазе гранитов значения начального отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$. Последнее может быть следствием привноса в граниты стронция с изотопным составом вмещающих пород, что необходимо учитывать в исследованиях, направленных на изучение процессов магматической стадии.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены в рамках тематического плана НИР ИГЕМ РАН по Государственному заданию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Engi M., Lanari P., Kohn M.J.* Significant Ages – An Introduction to Petrochronology // Revs Mineral. Geochem. 2017. V. 87. P. 1–12.
2. *Tichomirowa M., Käßner A., Sperner B., Lapp M., Leonhardt D., Linnemann U., Münker C., Ovtcharova M., Pfänder J.A., Schaltegger U., Sergeev S., von Quadt A., Whitehouse M.* Dating Multiply Overprinted Granites: The Effect of Protracted Magmatism and Fluid Flow on Dating Systems (Zircon U-Pb: SHRIMP/SIMS, LA-ICP-MS, CA-ID-TIMS; and Rb–Sr, Ar–Ar) – Granites from the Western Erzgebirge (Bohemian Massif, Germany) // Chem. Geol. 2019. V. 519. P. 11–38.
3. *Faure G.* Origin of Igneous Rocks: The Isotopic Evidence. Springer Verlag. Berlin. 2001. 496 p.
4. *Костицын Ю.А., Белоусова Е.А., Волков В.Н., Шатагин К.Н.* Сравнительные исследования изотопного и элементного состава цирконов и материнских гранитов Раумидского массива // Материалы XVIII симпозиума по геохимии изотопов им. А.П. Виноградова, Москва, 14–16 ноября 2007 г. Москва: ГЕОХИ РАН. 2007. С. 131–132.
5. *Костицын Ю.А., Волков В.Н., Журавлёв Д.З.* Редкие элементы и эволюция гранитного расплава (на примере Раумидского массива, Ю. Памир) // Геохимия. 2007. № 10. С. 971–982.
6. *Шатагин К.Н., Волков В.Н.* Опыт исследования Rb-Sr системы гидротермально измененных кислых вулканитов // Геохимия. 1998. № 2. С. 158–165.
7. *Костицын Ю.А., Волков В.Н.* Неоднородность первичного изотопного состава стронция и петрогенезис гранитов Раумидского массива (Южный Памир) // Геохимия. 1989. № 6. С. 853–864.
8. *Волков В.Н., Шатагин К.Н., Журавлев Д.З.* Петрогенетические процессы при формировании многофазных лейкогранитных плутонов по данным о распределении элементов-примесей и неоднородности первичного отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ – пример массива Раумид (Памир) // Материалы международного (X всероссийского) петрографического совещания “Петрография XXI века”, Апатиты, 20–22 июня 2005 г. Апатиты: изд-во КНЦ РАН. 2005. Т. 1. С. 39–41.
9. *Волков В.Н., Негрей Е.В.* Строение плутона Раумид и проблема становления гранитных интрузивов // Сов. геология. 1974. № 3. С. 46–59.

PECULIARITIES OF THE Rb–Sr ISOTOPE SYSTEM IN GRANITES: COMPARATIVE STUDY RESULTS FOR FRESH AND ALTERED PLAGIOCLASE VARIETIES FROM THE RAUMID PLUTON LEUCOGRANITES

K. N. Shatagin[a,#] and V. N. Volkov[a]

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

[#] *E-mail: k.shatagin@mail.ru*

Presented by Academician I.V. Chernyshev May 30, 2020

We conducted Rb–Sr study of plagioclase varieties from leucogranites of the Raumid pluton (Pamir). Studied varieties are 1) fresh, pristine magmatic oligoclase and 2) altered, turbid due to autometamorphic saossuritization plagioclase. Comparison of the data obtained for the coexisted varieties shows that saossuritization in the leucogranites led to Rb and Sr content and $^{87}Rb/^{86}Sr$ и $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ growth. This imply gain of alkaline and alkaline earth elements during saossuritization. The case of the Raumid pluton suggests a possibility of the gain from wall rocks.

Keywords: granites, autometamorphism, plagioclase, saussurite, Rb–Sr isotope system, Raumid pluton