

УДК 548.4

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КИСЛЫЕ РАСПЛАВЫ ВУЛКАНА БАЗМАН, ИРАН

В. Ю. Прокофьев<sup>1,\*</sup>, В. Б. Наумов<sup>2,\*\*</sup>, А. Е. Романько<sup>3</sup>,  
А. Л. Балашова<sup>4</sup>, П. Ю. Плечов<sup>5</sup>, Н. А. Имамвердиев<sup>6</sup>

Представлено академиком РАН И.Д. Рябчиковым 25.09.2016 г.

Поступило 01.10.2016 г.

Изучены включения силикатного расплава в кварцевых вкрапленниках экструзивного риолита кайнозойского вулкана Базман, Иран, связанного с процессом современной субдукции. Установлены низкие температуры силикатного расплава и высокие концентрации воды в нём. Микроэлементный состав расплава обнаруживает его сходство с кислыми расплавами островодужных обстановок.

*Ключевые слова:* вулкан Базман, Иран, низкотемпературный щелочной силикатный расплав, расплавные включения, островные дуги.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524855614-618>

В сообщении приводятся результаты исследования риолита позднекайнозойского (четвертичного?) возраста, слагающего экструзивное тело, расположенное примерно в 2,5 км на северо-восток от вершины неоген-четвертичного стратовулкана Базман на востоке Ирана. Стратовулкан Базман сложен в основном известково-щелочными дифференцированными базальтами — андезитами. Пирокластические породы встречаются редко.

Вулкан Базман расположен на западном окончании вулканической дуги Макран длиной около 450 км. Дуга Макран образована в результате современной субдукции океанической коры под блок Лут [1, 2]. В этой зоне известно много эпитермальных и Cu–Au–Mo-порфировых месторождений [3–5]. Поскольку все эти месторождения связаны с очагами водосодержащих магм, то вопросы формирования последних представляют особый интерес.

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва

<sup>3</sup> Геологический институт Российской Академии наук, Москва

<sup>4</sup> Institute of Geochemistry and Petrology, Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich), Zurich, Switzerland

<sup>5</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>6</sup> Бакинский государственный университет, Республика Азербайджан

\*E-mail: [vpr2004@rambler.ru](mailto:vpr2004@rambler.ru)

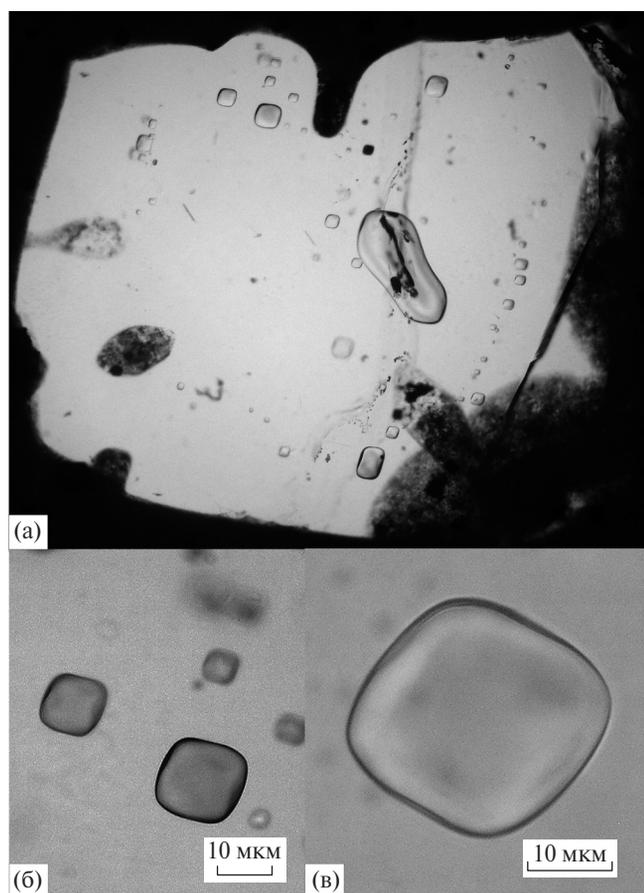
\*\*E-mail: [naumov@geokhi.ru](mailto:naumov@geokhi.ru)

Изученная экструзия образовалась на заключительном этапе активности стратовулкана. Экструзивное тело имеет форму почти изометричного штока диаметром около 300 м и выходит на поверхность на некотором удалении от вершины стратовулкана. Исследованный образец отобран вблизи секущего крутого контакта экструзии, внедрившейся в более ранние вулканиды среднего состава, слагающие стратовулкан.

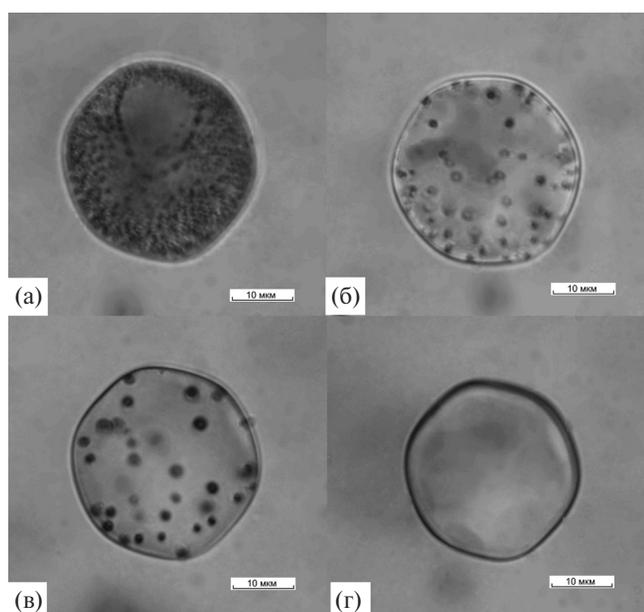
Исследованная порода на вид тёмно-серая, довольно плотная. Структура в шлифе афировая, реже порфировая с редкими вкрапленниками кварца, длина вкрапленников в среднем более 0,5 мм. В породе не наблюдается следов флюиальности и значительного количества обломков. Биотит встречается редко. Из рудных минералов обнаружен магнетит.

Для исследования включений из образцов риолита были изготовлены полированные с двух сторон пластинки толщиной 0,3 мм. В кварцевых вкрапленниках обнаружено большое количество гомогенных включений стекла размером от 3 до 50 мкм, равномерно распределённых в объёме кварца и являющихся первичными (рис. 1). Стекло включений обычно прозрачное, бесцветное, иногда с зеленоватым оттенком.

Для термометрических исследований применялся муфельный нагреватель конструкции В.Б. Наумова [6]. Нагрев включений выполнялся ступенчато, с выдержкой при постоянной температуре в течение 30 мин, после чего производилась закалка. Затем закалённые расплавные включения визуально



**Рис. 1.** Природно закалённые однофазовые включения стекла в кварцевых вкрапленниках риолитов вулкана Базман, Иран.



**Рис. 2.** Закалённые включения стекла после выдержки 30 мин при разных температурах: а — 560 °С, б — 630 °С, в — 660 °С, г — 700 °С.

изучали под микроскопом при комнатной температуре.

Результаты экспериментов приведены на рис. 2. При нагреве до температуры 560 °С в изначально гомогенных включениях появлялось большое количество пузырьков, свидетельствующих о размягчении стекла и удалении из него летучих компонентов. Дальнейший нагрев приводит к уменьшению количества пузырьков вследствие растворения летучих в стекле и увеличения объёма стекла при нагревании. После закалки при температуре 700 °С пузырьки полностью исчезают и включения становятся гомогенными. Температуру захвата этих включений можно оценить в 680 °С. Полученные полностью стекловатые включения были изучены на электронном и ионном микроанализаторах.

Для анализа силикатного стекла использован электронный микроанализатор “Самеса SX-100” (ГЕОХИ РАН, Москва, аналитик Н.Н. Кононкова) при следующих условиях: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 30 нА, развёртка в растр 12 × 12 и 5 × 5 мкм при исследовании стёкол. Точность определения элементов при их содержаниях >10 мас.% составляла 2 отн.%, при содержаниях 5–10 мас.% — 5 отн.%, при содержаниях <5 мас.% — 10 отн.%. Нижняя граница измеряемых концентраций составляла 0,1 мас.%, а среднеквадратичное отклонение в интервале измеряемых концентраций не превышало 10 отн.%

В расплавных включениях размером более 25 мкм содержания воды, фтора и элементов-примесей были определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института по методике, детально описанной в работе [7].

Химический состав стёкол расплавных включений в кварце приведён в табл. 1. Всего проанализировано 7 включений. Содержания SiO<sub>2</sub> в расплаве находятся в интервале от 71,4 до 72,8 мас.%. Средний состав расплавных включений следующий (мас.%): 72,58 SiO<sub>2</sub>; 0,10 TiO<sub>2</sub>; 11,24 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,70 FeO; 0,05 MnO; 0,12 MgO; 0,74 CaO; 2,40 Na<sub>2</sub>O; 3,62 K<sub>2</sub>O; 0,07 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 0,14 Cl; 0,02 S. Эти данные свидетельствуют о кристаллизации вкрапленников из типичных кислых расплавов с преобладанием калия над натрием (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 1,5).

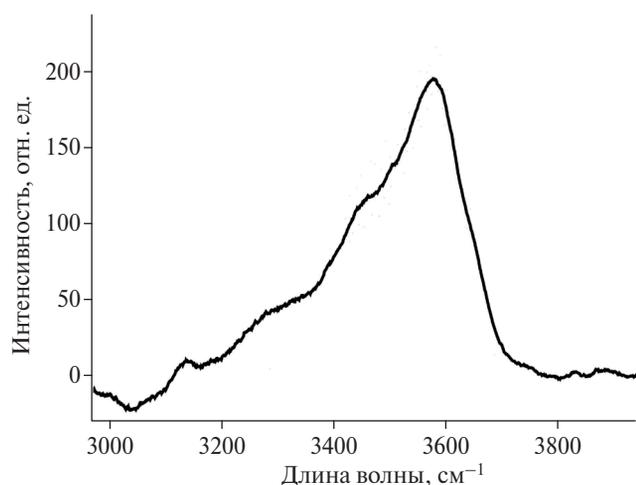
Средняя сумма компонентов составляет 91,77 мас.%, что свидетельствует о возможном среднем содержании воды в расплаве около 8,2 мас.%. Следует отметить, что, судя по суммам компонентов в разных включениях (от 91 до 92 мас.%), содержа-

**Таблица 1.** Состав (мас.%) стёкол расплавных включений в кварце риолитов

Компонент	Включения								Среднее
	1	2	3	4	5	6	7	8	
SiO <sub>2</sub>	72,7	72,78	72,59	74,5	71,44	71,96	72,03	72,61	72,58
TiO <sub>2</sub>	0,10	0,14	0,14	0,10	0,07	0,09	0,13	0,06	0,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,88	11,39	11,40	11,55	11,1	11,17	11,12	11,31	11,24
FeO	0,68	0,75	0,71	0,72	0,71	0,62	0,72	0,72	0,70
MnO	0,05	0,07	0,05	0,08	0,06	0	0,07	0	0,05
MgO	0,08	0,12	0,12	0,12	0,13	0,16	0,13	0,13	0,12
CaO	0,68	0,74	0,72	0,75	0,77	0,74	0,79	0,71	0,74
Na <sub>2</sub> O	2,49	2,63	2,22	0,7	2,64	2,78	2,88	2,83	2,40
K <sub>2</sub> O	3,69	3,69	3,74	3,12	3,57	3,7	3,71	3,75	3,62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,04	0,02	0,03	0	0,04	0,14	0,15	0,12	0,07
Cl	0,11	0,13	0,12	0,12	0,16	0,13	0,15	0,16	0,14
S	0,02	0,04	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02
Сумма	91,52	92,50	91,87	91,77	90,70	91,52	91,89	92,42	91,77
Растр, мкм	12 × 12	12 × 12	20 × 20	5 × 5	12 × 12	12 × 12	12 × 12	12 × 12	—

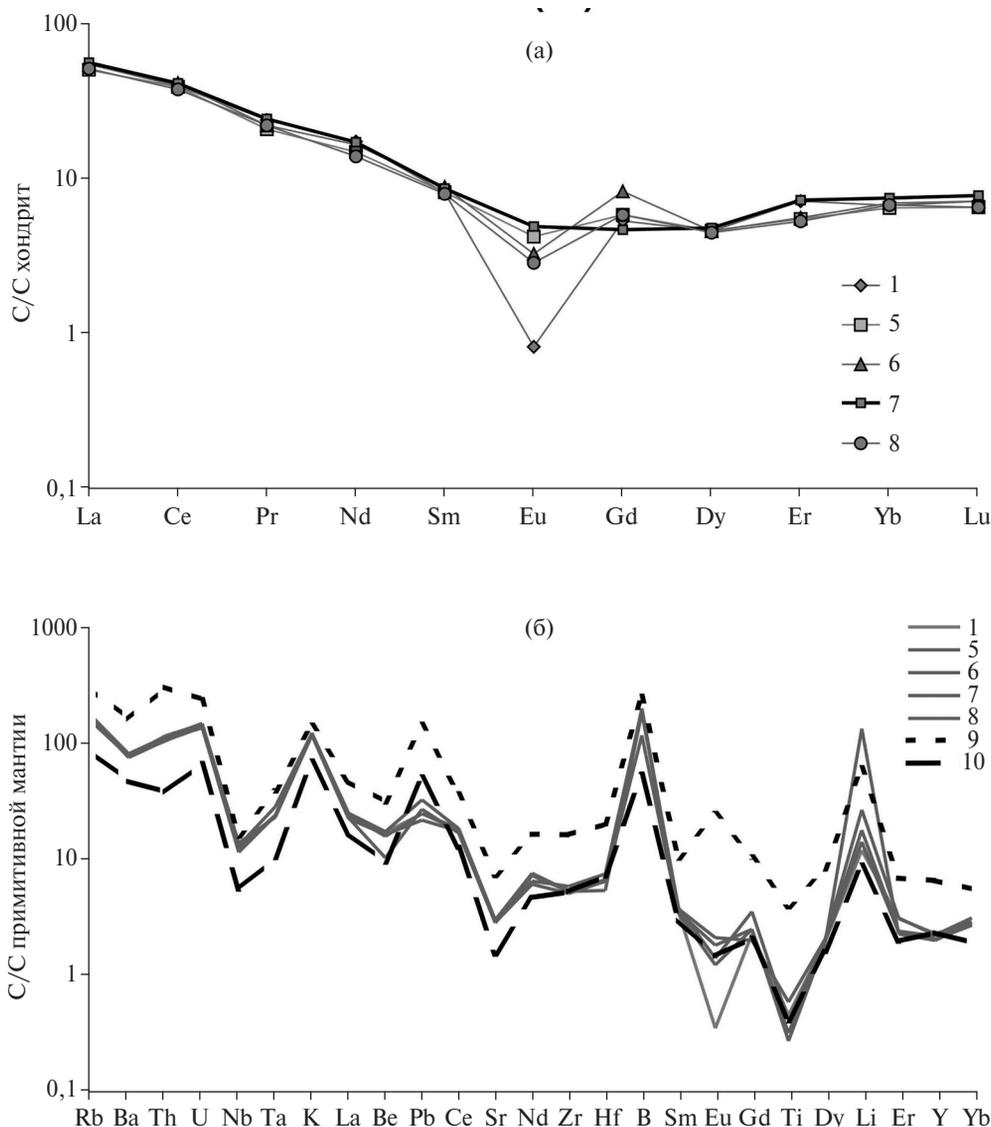
ние воды в процессе кристаллизации вкрапленников могло изменяться от 8 до 9 мас.%.  
 КР-спектры стекла включений, снятые на рамановском спектрометре “Noriga” на кафедре петрологии МГУ, показали наличие хорошего пика воды (рис. 3). Оценка концентраций воды в стекле, выполненная для 7 включений по методике, опубликованной в работах [8, 9], дала значения концентраций воды в стёклах в интервале 4,8–7,7 мас.% (среднее значение 6,4 мас.%).

Результаты анализов 5 расплавных включений на ионном микрозонде (вода и элементы-примеси) представлены в табл. 2. Минимальное содержание H<sub>2</sub>O в стекле расплавных включений по этой методике составляет 4,00 мас.%, максимальное — 5,25 мас.% при среднем содержании 4,84 мас.%, что вполне согласуется с приведёнными выше оценками содержаний воды по данным рентгеноспектрального

**Рис. 3.** Пик воды на раман-спектре включений стекла.**Таблица 2.** Содержание воды (мас.%), фтора и элементов-примесей (ppm) в стекле расплавных включений в кварце риолитов

Компонент	1*	5	6	7	8	Среднее
H <sub>2</sub> O	5,25	5,07	4,72	5,15	4,00	4,84
F	129	154	108	125	108	124,8
Li	19,5	22,9	28,9	43,3	217	66,32
Be	1,21	1,16	1,12	1,23	0,73	1,09
B	52,8	50,5	48,4	52,4	30,9	47,0
V	7,93	7,51	7,92	9,42	8,32	8,22
Cr	1,15	0,87	1,01	1,23	1,57	1,17
Cu	33,0	18,2	22,1	34,0	33,3	28,1
Rb	106	98	102	109	105	104
Sr	64,1	60,7	64,4	64,0	61,0	62,8
Y	10,6	9,44	10,1	10,3	9,23	9,93
Zr	60,4	66,4	60,2	60,9	57,7	61,1
Nb	9,12	9,99	9,16	9,51	8,34	9,22
Ta	1,00	0,96	0,98	1,18	0,99	1,02
Ba	547	550	549	575	535	551,2
La	17,0	15,6	16,9	17,4	15,9	16,6
Ce	32,0	31,6	33,4	33,3	30,5	32,2
Pr	2,92	2,54	2,69	2,96	2,69	2,76
Nd	10,4	8,91	9,92	10,3	8,34	9,57
Sm	1,58	1,59	1,72	1,68	1,55	1,62
Eu	0,06	0,31	0,24	0,36	0,21	0,24
Gd	1,38	1,51	2,14	1,21	1,51	1,55
Dy	1,47	1,48	1,47	1,54	1,44	1,48
Er	1,50	1,15	1,17	1,52	1,11	1,29
Yb	1,40	1,35	1,45	1,56	1,41	1,43
Lu	0,23	0,21	0,23	0,25	0,21	0,23
Hf	2,02	2,34	1,69	2,09	2,03	2,03
Pb	4,64	4,09	4,65	6,10	5,06	4,91
Th	10,0	9,00	9,45	9,76	9,08	9,46
U	3,11	3,08	2,89	3,16	2,93	3,03
Th/U	3,2	2,9	3,3	3,1	3,1	3,1
La/Yb	12	12	12	11	11	11,6

Примечание. 1\* — номер включения в табл. 1.



**Рис. 4.** Распределение редкоземельных элементов, нормированное к составу хондрита (а), и распределение редких и редкоземельных элементов, нормированное к составу примитивной мантии (б), в стёклах расплавных включений в риолитах вулкана Базман, Иран. 1–8 — номера анализов включений в таблицах, 9 — максимальное и 10 — минимальное значения этих же элементов в кислых расплавах островодужных обстановок (по данным [11]).

микроанализа и раман-микроанализа. Высокие концентрации воды объясняют низкую температуру расплава.

Распределение лантаноидов даёт широкий спектр составов от кривой без европиевого минимума до кривых с хорошо выраженным европиевым минимумом (рис. 4а). Такая картина свидетельствует о процессе кристаллизационной дифференциации, вызвавшем формирование низкотемпературных расплавов кислого состава с высокими концентрациями воды.

Графики содержаний элементов-примесей в стекле расплавных включений, нормированные к составу примитивной мантии [10], приведены на

рис. 4б. На графиках также нанесены средние содержания этих элементов в кислых расплавах островных дуг, взятые из работы [11]. Концентрации практически всех элементов в изученных расплавах близки к составам кислых расплавов островных дуг, за исключением свинца, титана и лития. Концентрации европия наиболее обеднённых им вследствие дифференциации составов расплавов также выходят за пределы этой области.

Таким образом, нами получены прямые доказательства формирования обогащённых водой низкотемпературных кислых калиевых расплавов при дифференциации магматических расплавов известково-щелочной серии вулкана Базман. С такими

расплавами может быть связано формирование эпиптермальных и долгоживущих порфировых рудообразующих систем региона.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках госбюджетных тем ИГЕМ РАН (программа фундаментальных научных исследований государственных академий наук 72-4) и ФГУП ГИН РАН 0135–2014–0067.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kopp C., Fruehn J., Flueh E.R., et al. // *Tectonophysics*. 2000. V. 329. P. 171–191.
2. Regard V., Hatzfeld D., Molinaro M., et al. // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2010. V. 330. P. 41–64.
3. Daliran F., Paar W.H., Neubauer F., et al. *Society for Geology Applied to Mineral Deposits Proc. VIII Bien-nial SGA Meeting. Beijing, 18–21 August 2005. Beijing, 2005. V. 2. P. 917–919.*
4. Richards J.P., Spell T., Rameh E., et al. // *Econ. Geol.* 2012. V. 107. P. 295–332.
5. Sholeh A., Rastad E., Huston D., et al. // *Econ. Geol.* 2016. V. 111. P. 619–639.
6. Наумов В.Б. // *Геохимия*. 1969. № 4. С. 494–498.
7. Sobolev A.V. // *Petrology*. 1996. V. 4. № 3. P. 209–220.
8. Di Muro A., Villemant B., Montagnac G., et al. // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2006. V. 70. P. 2868–2884.
9. Plechov P., Blundy J., Nekrylov N., et al. // *J. Volcanol. and Geothermal Res.* 2015. V. 307. P. 182–199.
10. Palme H., Jones A. In: *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 41–61.
11. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А. и др. // *Геохимия*. 2010. № 12. С. 1266–1288.

## LOW-TEMPERATURE ACIDIC MELTS OF BAZMAN VOLCANO (IRAN)

V. Yu. Prokofiev<sup>1</sup>, V. B. Naumov<sup>2</sup>, A. E. Roman'ko<sup>3</sup>,  
A. L. Balashova<sup>4</sup>, P. Yu. Plechov<sup>5</sup>, N. A. Imamverdiyev<sup>6</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>4</sup>*Institute of Geochemistry and Petrology, Swiss Federal Institute of Technology (ETH Zurich), Zurich, Switzerland*

<sup>5</sup>*Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>6</sup>*Baku State University, Baku, Azerbaijan*

Presented by Academician of the RAS I.D. Ryabchikov September 25, 2016

Received October 1, 2016

The inclusions of a silicate melt were investigated in quartz insets of the extrusive rhyolite collected at Bazman Cenozoic volcano (Iran) and associated with the process of recent subduction. Low temperatures of the silicate melt along with high concentrations of water in the melt are ascertained. The microelemental composition of the melt showed a similarity to acidic melts of island–arc formations.

**Keywords:** Bazman volcano, Iran, low-temperature acidic silicate melt, melt inclusion, island–arc.