

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ЛЕТУЧИЕ КОМПОНЕНТЫ И ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ РИОЛИТОВЫХ РАСПЛАВОВ ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ И СЕВЕРНОГО КАВКАЗА ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ

В.Б. Наумов

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия*

Исследованы расплавные включения во вкрапленниках кварца из риолитов верхнеюрского возраста в Восточном Забайкалье (Стрельцовская кальдера) и во вкрапленниках кварца, апатита и плагиоклаза из риолитов Северного Кавказа (Северная Осетия и Тырныаузский район). В Стрельцовской кальдере известно более 15 урановых месторождений и рудопоявлений. В Северной Осетии расположены Pb-Zn месторождения, в Тырныаузском районе находится крупнейшее Mo-W месторождение. Используются методы гомогенизации включений и анализ стекол более 30 включений с помощью электронного и ионного микрозонда. Установлена прямая зависимость температур полной гомогенизации расплавных включений от температур начала плавления (размягчения) стекол этих включений, что может быть обусловлено различным содержанием летучих (в первую очередь воды). Опыты по выявлению времени, необходимого для гомогенизации и гетерогенизации расплавных включений, свидетельствуют о различной вязкости расплавов во включениях, гомогенизация которых происходит при разных температурах. Риолитовые расплавы Восточного Забайкалья и Северного Кавказа близки по содержаниям петрогенных элементов. В среднем они равны (мас. %) 75.0 и 74.6 SiO₂, 0.08 и 0.05 TiO₂, 11.0 и 12.3 Al₂O₃, 0.74 и 0.40 FeO, 0.04 и 0.05 MgO, 0.29 и 0.64 CaO, 4.09 и 3.79 Na₂O, 4.30 и 4.24 K₂O соответственно для первого и второго регионов. Однако эти расплавы заметно отличаются по содержаниям Cl (в среднем 0.20 и 0.08 мас. % соответственно), F (в среднем 1.07 и 0.09 мас. %) и некоторых элементов-примесей. В расплавах первого региона по сравнению со вторым значительно выше содержания Zr, Nb, La, Ce, Th, U, но ниже содержания Sr, Ba, Eu. Это говорит о более глубокой дифференциации расплавов Восточного Забайкалья. Высокие содержания Th и U в расплавах Стрельцовской кальдеры, полученные в этой работе, хорошо согласуются с опубликованными данными французских ученых по этой же кальдере.

Расплавные включения, летучие компоненты, элементы-примеси, Восточное Забайкалье, Северный Кавказ.

RHYOLITIC MELTS IN EASTERN TRANSBAIKALIA AND THE NORTH CAUCASUS: CHEMICAL COMPOSITION, VOLATILES, AND ADMIXTURE ELEMENTS (from data of study of melt inclusions in minerals)

V.B. Naumov

We studied melt inclusions in quartz phenocrysts from Late Jurassic rhyolites in eastern Transbaikalia (Strel'tsov caldera) and in quartz, apatite, and plagioclase phenocrysts from rhyolites in the North Caucasus (Northern Ossetia and Tyrnyauz region). More than 15 uranium deposits and ore occurrences are known in the Strel'tsov caldera, as well as Pb-Zn deposits in Northern Ossetia and the largest Mo-W deposit in the Tyrnyauz region. For the studies we used the inclusion homogenization methods and performed electron and ion microprobe analyses of glasses from more than 30 inclusions. The temperatures of the total homogenization of melt inclusions are shown to depend directly on the initial melting points of their glasses, which might be due to the different contents of volatiles (first of all, water). The experiments on determining the time required for the homogenization and heterogenization of melt inclusions showed that the melts in the inclusions are of different viscosity and homogenize at different temperatures. The rhyolitic melts from eastern Transbaikalia and the Northern Caucasus have similar contents of rock-forming elements (average, wt.%): 75.0 and 74.6 SiO₂, 0.08 and 0.05 TiO₂, 11.0 and 12.3 Al₂O₃, 0.74 and 0.40 FeO, 0.04 and 0.05 MgO, 0.29 and 0.64 CaO, 4.09 and 3.79 Na₂O, and 4.30 and 4.24 K₂O, respectively. But these melts differ significantly in the contents of Cl (on average, 0.20 and 0.08 wt.%, respectively), F (1.07 and 0.09 wt.%), and some admixture elements. The melts from the first region are much richer in Zr, Nb, La, Ce, Th, and U but poorer in Sr, Ba, and Eu than the melts from the second region, which evidences their deeper differentiation. The revealed high contents of Th and U in the melts from the Strel'tsov caldera agree with the literature data of the French geologists on the same caldera.

Melt inclusions, volatiles, admixture elements, eastern Transbaikalia, North Caucasus

ВВЕДЕНИЕ

Первые данные о составе стекол расплавных включений и анализы нескольких расплавных включений в кварце, полученные с помощью электронного микронзонда, были приведены Р. Клоккьятти [Clocchiatti, 1971]. С тех пор наблюдается постоянный рост числа публикаций и определений составов расплавных включений (табл. 1). За прошедшие 40 лет общее количество публикаций превысило 1150, а число анализируемых микрообъектов (расплавных включений и закалочных стекол пород) достигло 39100. Отметим, что за последние 10 лет опубликовано более 50 % от всех статей, а количество определений за это время составило почти 70 %. Это означает, что большинство определений получено по уже хорошо разработанным методикам. Такое внимание к изучению включений в минералах объясняется тем, что они дают, вероятно, наиболее надежный путь к оценке состава и физико-химических параметров природных магматических расплавов. Эти исследования стали особенно эффективными после появления локальных методов количественного химического анализа (электронный, ионный и протонный микронзонд, раман-спектроскопия, лазерная абляция (LA-ICP MS), локальная инфракрасная спектроскопия и др.).

Несмотря на такое обилие данных (более 39000, см. табл. 1), количество определений для кислых расплавов в обстановках внутриконтинентальных рифтов и областей континентальных горячих точек до сих пор весьма незначительно (6.1 %). В настоящей работе представлены результаты изучения расплавных включений во вкрапленниках кварца из риолитов верхнеюрского возраста в Восточном Забайкалье (Стрельцовская кальдера) и во вкрапленниках кварца, апатита и плагиоклаза из риолитов Северного Кавказа (Северная Осетия и Тырныаузский район). В Стрельцовской кальдере известно более 15 урановых месторождений и рудопроявлений. В Северной Осетии расположены Pb-Zn месторождения, в Тырныаузском районе находится крупнейшее Mo-W месторождение.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования включений из образцов пород готовили полированные с двух сторон пластинки толщиной 0.3 мм, которые просматривались под микроскопом. Расплавные включения во вкрапленниках кварца по фазовому составу являются или многофазовыми (газ + стекло + кристаллы, рис. 1, а, б), или двухфазовыми (газ + стекло, рис. 2, а, б). Их размеры варьируют от 2 до 150 мкм, преобладают включения размером 10—40 мкм. Обычно более крупные включения раскристаллизованы более полно, но включений без стекла не встречено. Гомогенизация включений проводилась в печи с платиновым нагревателем [Наумов, 1969; Наумов и др., 1975; Наумов, Учамейшвили, 1977] с использованием метода закалки, который позволяет в одной серии опытов следить за фазовыми изменениями сразу большого количества включений. Это особенно важно при изучении включений в породах кислого состава, поскольку из-за высокой вязкости кислых расплавов для достижения равновесных условий требуются длительные выдержки — обычно от 1—2 до 10—15 ч и более. Кроме того, наблюдения, а при необходимости и фотографирование можно вести при максимальных увеличениях микроскопа.

При нагревании в прозрачном стекле расплавных включений появляются газовые пузырьки (от 1—2 до нескольких десятков), так что некоторые включения становятся черными, непрозрачными (см. рис. 1, в). Температуры начала расплавления стекол различны для разных включений — от 400 до 700 °С, причем чем выше температура нагрева, тем меньше времени необходимо для плавления стекла. Дальнейшее увеличение температуры ведет к постепенному растворению этих газовых пузырьков в расплаве (см. рис. 1, д, е), а в частично раскристаллизованных включениях также и к плавлению кристаллических фаз, полное растворение которых наступает при 800—850 °С. Скорость растворения пузырьков при низких температурах весьма мала. Например, в образце, где газовые пузырьки появились при 500—520 °С, 100-часовая выдержка при 620—680 °С привела к полному исчезновению их лишь в мелких включениях.

Очень четкая зависимость отмечается между температурами начала плавления стекла включений и температурами полной их гомогенизации (табл. 2), что может быть обусловлено различным содержанием летучих (в первую очередь воды). Опыты по выявлению времени, необходимого для гомогенизации и гетерогенизации включений, свидетельствуют о различной вязкости разнотемпературных включений, причем чем выше температура гомогенизации, тем больше вязкость расплава. Так, например, для гомогенизации включений при 800—1000 °С обычно достаточно 0.5—5 ч, а при температурах более

Таблица 1. Количество публикаций и определений по расплавным включениям в минералах и закалочным стеклам пород в разные периоды времени

Период, годы	Количество публикаций	%	Количество определений	%
1971—1980	32	2.8	371	1.0
1981—1990	137	11.9	1956	5.1
1991—2000	387	33.6	9680	25.4
2001—2010	595	51.7	26132	68.5
1971—2010	1151	100.0	38139	100.0

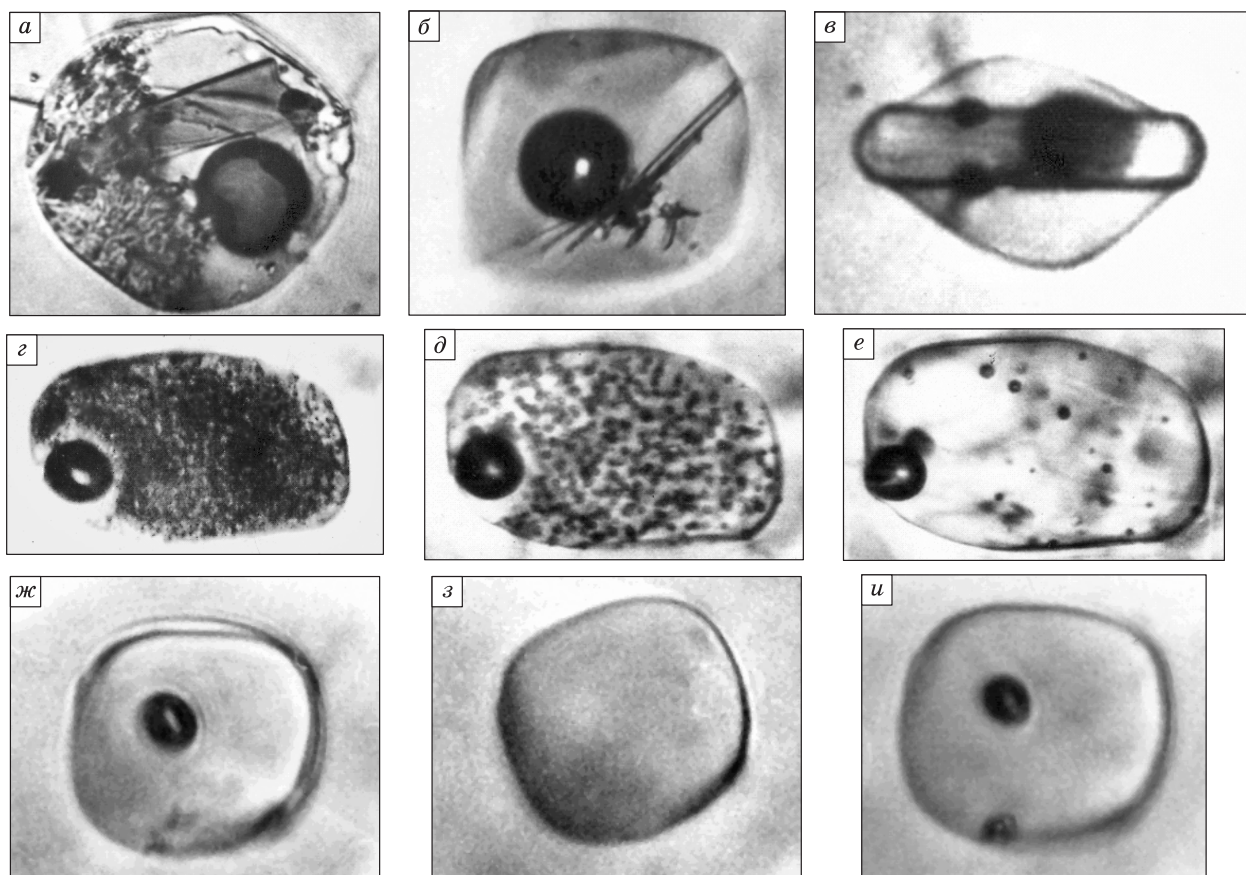


Рис. 1. Расплавные включения во вкрапленниках кварца из риолитов Восточного Забайкалья.

а — частично раскристаллизованное включение в обр. 33 с крупным кристаллом биотита, начало плавления стекла 400—420 °С; *б, в* — включения в обр. 8-2: *б* — частично раскристаллизованное включение, начало плавления стекла 520 °С, *в* — кристалл апатита с прилипшим к нему расплавом; *з-и* — включения в обр. 19: *з-е* — включение при разных температурах (°С): *з* — 750, *д* — 900, *е* — 1040; *ж* — 980 (включение до гомогенизации), *з* — 1040 (гомогенное включение), *и* — 920 (гетерогенизация включения при его охлаждении).

1100 °С — от 10—20 ч и более. В одном из образцов кварца из риолитов Восточного Забайкалья гомогенизация самого крупного из всех изученных включений (120 мкм) была достигнута при 1040 °С всего за 1 ч. В этом же образце для включений с температурами гомогенизации 980—1060 °С достаточно выдержки в 5—30 мин при 900—920 °С, чтобы вызвать гетерогенизацию (выделение газовых пузырьков). Часть этих включений выдерживалась при 940 °С в течение 7 ч, но гомогенизация не наступала; выдержка при 980 °С в течение 40 мин приводит к гомогенизации. Гетерогенизация этих включений наступает и при охлаждении со скоростью 40—50 °С/мин. В то же время для включений с температурами гомогенизации выше 1180 °С для гетерогенизации необходимы гораздо более длительные выдержки — от 8 час и более.

Таблица 2. Зависимость температур полной гомогенизации расплавных включений в кварце из риолитов Восточного Забайкалья от температуры начала плавления стекла включений

№ образца	Температура (°С)	
	начала плавления	полной гомогенизации
33	400—420	800—850
31	470—480	900—950
19	500—520	980—1020
8-2	550—600	1000—1100
8-1	650—700	1180—1260

Силикатное стекло и дочерние кристаллические фазы во включениях анализировались на электронных микроанализаторах Camebax Microbeam и Cameca SX-100 в ГЕОХИ РАН (г. Москва). Работа велась при следующих условиях: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток 30 нА, развертка в растр 12 × 12 и 5 × 5 мкм при исследовании стекол, 2 × 2 мкм при определении кристаллических фаз. Точность определения элементов при их содержаниях > 10 мас. % составляла 2 отн. %, при содержаниях 5—10 мас. % — 5 отн. %, при содержаниях < 5 мас. % — 10 отн. %. Измерения фтора проводили на кристал-

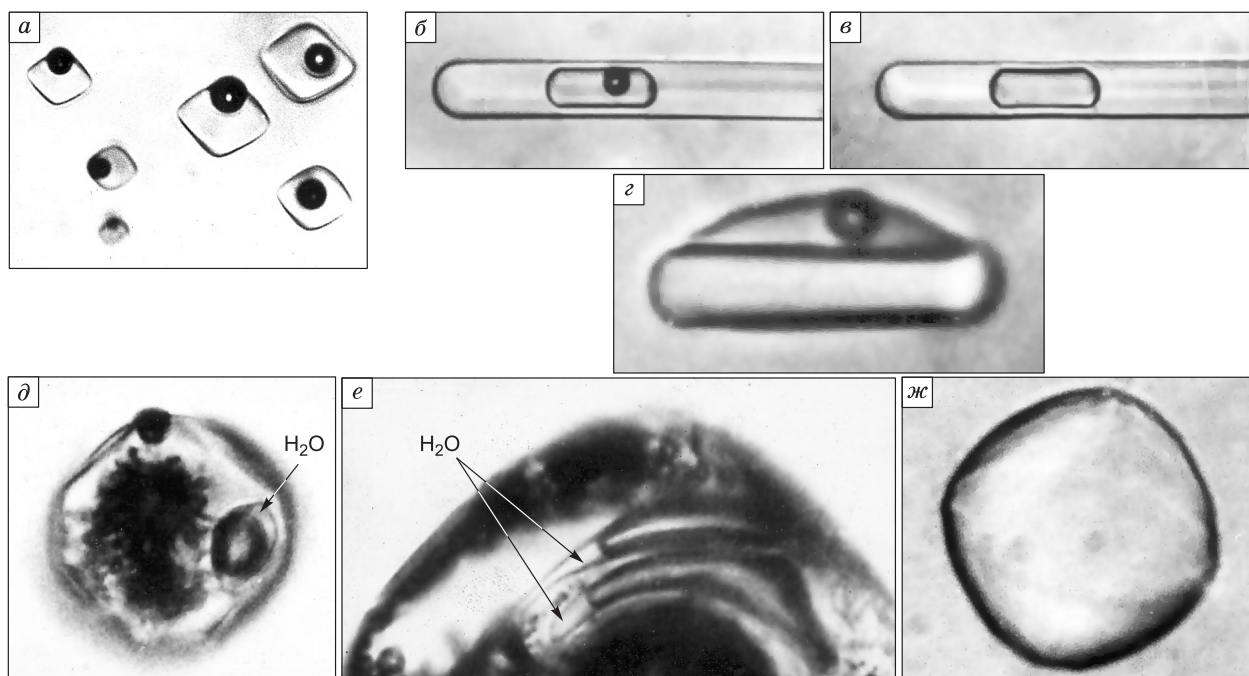


Рис. 2. Расплавные включения во вкрапленниках кварца из риолитов Северного Кавказа.

a — серия двухфазовых включений (газ + стекло) в кварце риолитов Кыргыцкого массива; *б, в* — расплавное включение в апатите риолитов Кыргыцкого массива: *б* — 20 °С, *в* — 1050 °С; *з* — кристалл апатита с прилипшим к нему расплавом, 20 °С; *д–жс* — включения в кварце из риолитов Малого Мукулана (включения нагревались до 600 °С и охлаждались до 20 °С, после чего наблюдалась фаза жидкой воды), *жс* — гомогенизированное включение при 800 °С.

ле-анализаторе ТАР ($2d = 25.745 \text{ \AA}$) по линии FK_{α} в интегральном режиме, так как на аналитическую линию F нет наложений линий других присутствующих при данном замере элементов. В качестве стандартного образца сравнения использовался наиболее стабильный и подходящий по составу MgF_2 . 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 (г. Ярославль) по методике, детально описанной в работах [Соболев, 1996; Носова и др., 2002; Портнягин и др., 2002].

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Восточное Забайкалье. Исследованные образцы эффузивных пород отобраны в бассейне р. Урулунгуй в пределах Стрельцовой кальдеры. В геологическом строении этого района принимают участие гранитоиды палеозойского возраста и мезозойские (верхняя юра) осадочные, туфогенные и эффузивные породы. В осадочно-вулканогенных образованиях преобладают покровы эффузивов, озерные, русловые и пролювиальные отложения. Мощность этого комплекса пород изменяется от 200 до 1200 м. Эффузивные породы составляют в среднем 90 % от мощности всего разреза. Осадочно-вулканогенные образования делятся на две основные толщи: нижнюю, состоящую из базальтов, андезитобазальтов, дацитов и перемежающихся с ними горизонтов песчаников, алевролитов, конгломератов, и верхнюю, сложенную главным образом риолитами. Содержание SiO_2 в риолитах колеблется от 75 до 76 мас. %.

Северный Кавказ. Изучены образцы из двух районов Северного Кавказа — из риолитов нижнеюрской вулканогенной свиты района р. Архон (Северная Осетия) и риолитов кайнозойского комплекса Тырнаузского района. Среди последних исследованы образцы из нескольких объектов. Первый — риолиты, взятые в балке Малый Мукулан. Они представляют собой зеленовато-серые породы, в которых видны фенокристаллы санидина, плагиоклаза и кварца, листочки биотита. Основная масса состоит из тех же минералов и стекла, в различной степени раскристаллизованного. Акцессорные минералы — апатит, циркон и сфен. Второй объект — дайка витрофиров, расположенная на склоне горы Будурху-Субаш, где она сечет риолиты, представляет собой черную породу с вкрапленниками кварца, полевого

шпата и стекловатой основной массой. Из аксессуарных минералов отмечаются апатит и циркон. Третий объект — риолиты Кыртыкского массива (северный склон долины р. Кыртык) представляют собой исключительно свежие светло-серые породы с порфировой структурой. Среди вкрапленников отмечаются санидин (размером до 5 см), более мелкие зерна кварца, плагиоклаза и биотита, из аксессуарных — апатит и циркон.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Температуры полной гомогенизации, замеренные в 880 расплавных включениях в кварце из 12 образцов риолитов Восточного Забайкалья, приведены в табл. 3. Интервал между максимальной (1260 °С) и минимальной (800 °С) температурами значителен, но видно, что преобладают три интервала распределения температур гомогенизации включений: 1260—1180, 1100—980 и 940—820 °С. Первые пять образцов были взяты на разной глубине из одной скважины (рис. 3). Сравнивая данные (см. рис. 3, табл. 3), можно сделать вывод о том, что для более молодых разновидностей пород получены более высокие температуры гомогенизации. Это может свидетельствовать о поступлении все более глубинных и, вероятно, более высокотемпературных магматических расплавов.

Температуры гомогенизации более 600 расплавных включений в кварце и апатите из кислых эффузивов Северного Кавказа приведены в табл. 4. Так же, как и для расплавных включений в кварце из Восточного Забайкалья, наблюдается значительный диапазон этих температур — от 750 до 1270 °С. Апатит в этих породах является ранним минералом, поэтому нередко при кристаллизации кварца к апатиту прилипает капелька расплава, образующая затем первичное включение (см. рис. 2, з). Включения в апатите двухфазовые, состоят из стекла и газовой фазы (см. рис. 2, б, з). Как видно из результатов (см. табл. 4), они гомогенизируются (см. рис. 2, в) при высоких температурах — от 1050 до 1250 °С.

Во включениях расплавов в кварце риолитов Тырныаузского района впервые была обнаружена и изучена растворенная в расплаве вода [Наумов, Учайейшвили, 1977]. Все включения из риолитов Малого Мукулана оказались частично раскристаллизованными. Для них характерны очень низкие температуры начала плавления стекла включений: оно заметно при выдержке 1 ч уже при 450—460 °С. Несколько крупных включений размером 50—150 мкм после нагрева в течение 5 мин до 600 °С были закалены. Во всех при 20 °С наблюдалось большое количество различной формы газовых пузырьков с мениском жидкой фазы воды (см. рис. 2, д, е), гомогенизация которой происходила при 305—315 °С в газовую фазу. Полная гомогенизация включений с растворением воды в силикатном расплаве наблюдалась при 790—940 °С.

Химический состав стекол расплавных включений в кварце и плагиоклазе риолитов Восточного Забайкалья (20 анализов) и Северного Кавказа (11 анализов) приведен в табл. 5. Расплавы этих двух регионов близки по содержаниям петрогенных элементов. В среднем они равны (мас. %) 75.0 и 74.6 SiO₂, 0.08 и 0.05 TiO₂, 11.0 и 12.3 Al₂O₃, 0.74 и 0.40 FeO, 0.04 и 0.05 MgO, 0.29 и 0.64 CaO, 4.09 и 3.79 Na₂O, 4.30 и 4.24 K₂O соответственно для первого и второго регионов. Однако эти расплавы заметно отличаются по содержаниям Cl (в среднем 0.20 и 0.08 мас. % соответственно), F (в среднем 1.07 и

Таблица 3. Температуры гомогенизации включений расплава во вкрапленниках кварца риолитов Стрельцовой кальдеры (Восточное Забайкалье)

№ образца	Количество гомогенных включений в каждом температурном (°С) интервале											
	780—820	820—860	860—900	900—940	940—980	980—1020	1020—1060	1060—1100	1100—1140	1140—1180	1180—1220	1220—1260
8-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27	40
8-2	—	—	—	1	—	19	15	31	2	1	23	32
8-3	—	—	—	—	2	—	1	—	—	14	11	—
8-4	—	—	—	—	—	1	—	5	11	1	7	11
8-8	14	—	9	—	4	7	27	29	—	—	—	—
17	—	—	—	2	—	16	12	1	—	—	—	—
19	—	—	—	—	—	89	23	5	—	—	12	11
31	—	—	—	26	8	2	—	—	—	—	—	2
33	2	93	91	1	—	—	—	—	—	—	—	—
64	—	—	—	—	—	35	21	—	—	—	—	7
80	—	—	19	10	12	—	—	—	3	—	—	—
93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	12	19

Таблица 4. Температуры гомогенизации включений расплава во вкрапленниках кварца и апатита из риолитов Северного Кавказа

Местонахождение	Минерал	Температура гомогенизации, °С	Количество включений
Северная Осетия	Кварц	1140—1270	43
Малый Мукулан	Апатит	Более 1100	1
	Кварц	790—940	150
Будурху-Су-Баш	Апатит	1120—1160	4
	Кварц	750—830	120
Кыргыкский массив	Апатит	1180—1250	18
	»	1050	1
	Кварц	1030—1220	300
	»	900	3

0.09 мас. %). Высокое содержание фтора в расплавах приводит к тому, что при охлаждении включений в них происходит кристаллизация флюорита и богатых фтором слюд. Флюорит был определен нами на электронном микроскопе в расплавленном включении 19 (см. табл. 5, фтора в расплаве 1.92 мас. %), а богатая фтором слюда — во включении 14 (см. табл. 5, фтора в расплаве 1.57 мас. %). Химический анализ этой слюды, а также литературные данные анализов различных по составу слюд из расплавленных включений в кварце риолитов Восточного Забайкалья приведены в табл. 6.

В Восточном (и Западном) Забайкалье известно большое количество флюоритовых гидротермальных месторождений. Высокие концентрации фтора в расплавах кислого состава, обнаруженные при изучении включений в минералах, свидетельствуют о том, что расплавы могли служить источником фтора при образовании этих месторождений.

В табл. 7 приведены данные о содержании воды и элементов-примесей в расплавленных включениях в кварце и плагиоклазе риолитов Восточного Забайкалья и Северного Кавказа. Высокие содержания воды, определенные для двух включений из риолитов Северного Кавказа (22 — 6.4 мас. %, 24 — 5.94 мас. %), хорошо согласуются с низкими суммами петрогенных элементов (см. табл. 5, суммы 92.3 и 93.3 мас. %). Отметим, что расплавы этих регионов заметно отличаются по содержаниям некоторых редких элементов. В расплавах первого региона по сравнению со вторым значительно выше содержания Zr, Nb, La, Ce, Th, U, но ниже содержания Sr, Ba, Eu. Это свидетельствует о более глубокой дифференциации расплавов Восточного Забайкалья. Установленные нами высокие концентрации Li в расплавах первого региона (в среднем 270 г/т) хорошо согласуются с опубликованными данными [Fabre et al., 2002]. Авторы при изучении расплавленных включений в кварце из риолитов Стрельцовской кальдеры определили высокие концентрации Li как в дочерних минералах включений (от 2 до 6.2 мас. %), так и в стекле включений (от 90 до 400 г/т при среднем в 300 г/т).

На рис. 4 и 5 представлены спайдер-диаграммы, построенные по данным табл. 7 (9 анализов для расплавов Восточного Забайкалья и 6 анализов для расплавов Северного Кавказа). Эти данные нормированы к составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989]. На рисунках также приведены данные из работы [Наумов и др., 2010] по средним содержаниям элементов в магматических расплавах кислого состава внутриконтинентальных рифтов и областей континентальных горячих точек. Составы расплавленных включений обоих регионов в целом

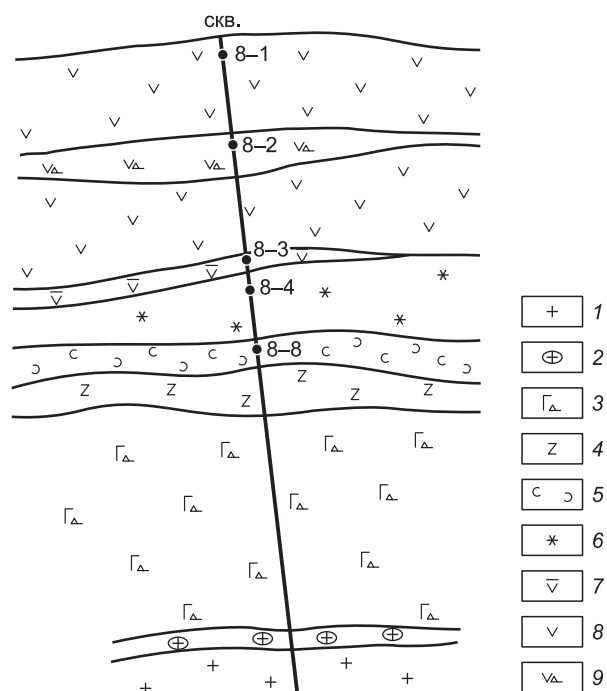


Рис. 3. Схематический разрез по скважине.

1 — граниты; 2 — базальные конгломераты; 3 — базальты, андезитобазальты; 4 — дациты; 5 — туфы дацитов; 6 — сферолитовые риолиты; 7 — туфы, туфолавы риолитов; 8 — риолиты; 9 — лавобрекчии риолитов. Глубина отбора образцов (м): 8-1 — 13, 8-2 — 90, 8-3 — 184, 8-4 — 197, 8-8 — 250.

Таблица 5.

**Химический состав (мас. %) стекол расплавных включений в кварце
и плагиоклазе риолитов Восточного Забайкалья и Северного Кавказа**

№ образца/ включения	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	F	Сумма	T, °C
Восточное Забайкалье														
8-1/1	76.22	0.08	11.83	0.90	0.03	0.05	0.49	3.55	4.59	0.00	0.23	2.21	100.18	1150
8-1/2*	79.12	0.12	9.99	0.74	0.06	0.05	0.31	2.11	4.05	0.00	0.20	1.56	98.28	1200
8-1/3	79.76	0.08	9.25	0.77	0.11	0.04	0.30	2.11	3.81	0.02	0.22	1.81	98.28	1150
8-1/4	80.17	0.08	10.28	0.89	0.07	0.05	0.34	2.32	3.99	0.00	0.22	0.97	99.38	1150
8-2/5	72.58	0.04	13.25	1.02	0.00	0.01	0.30	4.33	6.38	0.10	0.20	0.10	98.31	1100
8-2/6*	73.75	0.17	10.88	0.75	0.09	0.04	0.29	5.08	4.19	0.00	0.25	0.57	96.06	1100
8-2/7*	76.44	0.07	10.85	0.52	0.07	0.04	0.25	4.46	4.21	0.00	0.20	0.11	97.22	1180
8-4/8*	70.64	0.09	14.85	1.57	0.05	0.04	0.56	6.29	6.11	0.00	0.13	0.12	100.45	1140
8-4/9*	72.82	0.09	12.63	1.56	0.15	0.05	0.50	5.88	4.92	0.02	0.19	0.05	98.86	1180
8-4/10	76.13	0.03	10.10	0.83	0.16	0.04	0.34	4.50	3.67	0.01	0.13	0.09	96.03	1140
8-4/11*	78.36	0.11	9.06	0.68	0.06	0.07	0.22	3.44	4.04	0.01	0.20	0.28	96.53	1130
8-4/12	78.71	0.05	8.49	0.64	0.05	0.05	0.33	4.03	3.30	0.00	0.15	0.15	95.95	1100
8-4/13	80.79	0.06	8.48	0.71	0.01	0.04	0.32	3.98	3.22	0.03	0.14	—	97.78	1100
64-1/14*	68.16	0.05	13.66	0.66	0.03	0.03	0.05	4.91	5.73	0.03	0.26	1.57	95.14	20
64-1/15	72.03	0.06	11.17	0.66	0.05	0.04	0.24	3.85	3.61	0.01	0.18	1.81	93.71	1040
64-1/16*	72.29	0.10	10.39	0.71	0.08	0.05	0.24	4.07	3.32	0.00	0.17	1.78	93.20	1040
64-1/17	72.82	0.11	10.26	0.67	0.04	0.03	0.24	3.96	3.40	0.00	0.19	1.81	93.53	1040
64-1/18	73.67	0.10	11.17	0.71	0.06	0.04	0.24	4.07	3.61	0.01	0.18	1.80	95.66	1040
19-2/19	71.64	0.09	12.96	0.91	0.04	0.02	0.05	4.40	5.48	0.00	0.26	1.92	97.77	1000
19-2/20*	74.70	0.12	10.75	0.80	0.11	0.04	0.26	4.46	4.29	0.06	0.23	1.56	97.38	1000
Северный Кавказ														
К-1/21*	81.26	0.08	8.73	0.51	0.06	0.06	0.49	3.06	3.04	0.05	0.08	0.02	97.44	1180
К-4/22*	68.56	0.02	13.87	0.15	0.11	0.02	0.38	3.34	5.43	0.00	0.05	0.36	92.29	20
К-4/23	69.29	0.01	13.73	0.08	0.02	0.00	0.48	3.28	5.56	0.00	0.10	0.22	92.77	20
К-4/24*	72.55	0.04	12.65	0.50	0.12	0.08	0.64	5.27	4.62	0.04	0.10	0.03	96.64	1150
К-4/25	75.08	0.07	13.52	0.41	0.06	0.06	0.82	4.82	4.10	0.01	0.10	0.00	99.05	1100
К-4/26	76.71	0.03	12.45	0.40	0.04	0.05	0.72	3.35	3.95	0.01	0.08	0.14	97.93	1100
К-4/27*	77.08	0.07	11.48	0.37	0.11	0.03	0.62	5.06	4.08	0.03	0.03	0.02	98.98	1150
К-4/28	77.86	0.03	11.77	0.50	0.09	0.05	0.67	4.13	3.27	0.03	0.07	0.14	98.61	1100
К-5/29	73.56	0.07	10.58	0.52	0.01	0.07	0.63	3.72	3.86	0.00	0.09	0.00	93.11	870
К-5/30*	73.92	0.04	10.94	0.50	0.04	0.07	0.72	2.68	4.24	0.02	0.08	0.08	93.33	870
К-9/31*	74.97	0.11	15.53	0.46	0.00	0.05	0.82	3.03	4.47	0.03	0.07	0.01	99.55	1120

Примечание. FeO — железо общее; минерал-хозяин для включений 1—30 — кварц, для 31 — плагиоклаз (An₃₅). 21 — включения из Северной Осетии, 22—28 — из Кыргыцкого массива, 29, 30 — из Малого Мукулана, 31 — из влк. Эльбрус [Толстых и др., 2001].

* Включения, для которых имеются определения воды и элементов-примесей на ионном микрозонде (табл. 7).

Таблица 6. Химический состав (мас. %) дочерних фаз (слюда) в расплавных включениях в кварце из риолитов Восточного Забайкалья

Компонент	1	2	3	4
SiO ₂	41.61	40.2	48.3	49.2
TiO ₂	2.66	0.7	0.4	0.2
Al ₂ O ₃	10.55	18.0	14.3	15.4
FeO	19.56	13.0	13.5	9.1
MnO	2.20	2.2	1.8	1.7
MgO	3.01	6.6	0.3	0.5
CaO	0.19	0.0	0.0	0.8
Na ₂ O	0.59	0.5	0.4	0.5
K ₂ O	9.71	8.9	8.6	9.4
Cl	0.11	—	—	—
F	9.00	5.2	9.7	8.9
Сумма	99.19	95.3	97.3	95.6
O = F	3.79	2.2	4.1	3.7
Сумма	95.40	93.1	93.2	91.8
Li ₂ O*	—	2.0	4.3	4.6
Сумма	95.40	95.1	97.5	96.4

Примечание. 1 — наши данные, 2—4 — литературные данные [Chabiron et al., 2001].

* Содержание Li₂O оценено.

Таблица 7. Содержание воды (мас. %) и элементов-примесей (г/т) в расплавных включениях в кварце и плагиоклазе риолитов Восточного Забайкалья и Северного Кавказа

Компо- нент	Восточное Забайкалье									Северный Кавказ					
	8-1/2	8-2/6	8-2/7	8-4/8	8-4/9	8-4/11	64-1/14	64-1/16	19-2/20	К-1/21	К-4/22	К-4/24	К-4/27	К-5/30	К-9/31
H ₂ O	0.11	2.40	0.56	1.26	0.20	0.46	4.75	2.33	2.10	0.25	6.40	0.65	0.35	5.94	0.07
Li	3.45	113	120	434	515	31.6	83.0	1900	261	478	1120	189	207	520	67.6
Be	8.90	8.73	7.98	19.0	16.2	4.24	19.5	9.28	7.90	1.12	13.5	5.36	5.73	6.31	7.20
B	25.3	33.9	31.3	104	83.9	13.7	60.7	27.1	24.3	26.7	111	60.3	62.0	45.6	34.4
Rb	200	318	277	427	426	258	480	231	333	78.5	483	254	248	237	—
Sr	0.74	0.96	0.79	1.97	3.23	0.86	0.58	0.78	0.64	33.2	5.83	37.9	41.3	23.8	341
Y	21.5	22.7	21.8	43.4	51.9	10.8	4.24	23.0	20.3	4.34	45.3	13.8	15.0	14.1	14.6
Zr	130	180	167	121	124	68.4	353	152	135	27.5	37.2	45.7	43.6	27.8	511
Nb	37.0	58.9	47.7	59.5	67.2	25.0	88.1	43.3	44.3	6.96	43.7	12.1	13.2	12.0	50.1
Ba	2.87	3.54	3.36	8.60	15.4	1.60	2.80	3.01	2.70	172	4.61	63.7	67.6	32.3	229
La	29.0	29.6	32.4	23.6	23.5	12.8	8.65	29.8	24.1	11.4	12.8	19.3	14.1	10.9	13.5
Ce	54.0	54.2	57.5	61.0	60.1	23.5	19.1	57.0	48.6	23.6	28.3	41.6	30.6	23.5	37.0
Nd	14.3	12.9	14.3	24.1	23.5	5.39	3.52	14.6	10.6	5.66	12.4	14.5	11.0	8.54	33.7
Sm	2.65	2.34	2.62	6.60	6.65	0.97	0.65	2.59	2.13	1.10	4.26	3.35	2.65	2.17	14.7
Eu	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.03	0.05	0.46	0.02	0.27	0.30	0.16	—
Gd	4.03	—	2.94	—	—	—	1.30	4.04	—	—	—	—	—	—	—
Dy	3.19	3.03	2.93	6.04	7.65	1.31	1.07	3.32	2.60	0.73	7.34	2.23	2.32	2.23	26.1
Er	2.36	2.25	2.24	4.26	4.51	0.97	1.09	2.47	1.99	0.45	4.54	1.43	1.40	1.19	15.9
Yb	2.68	2.40	2.70	3.45	4.59	1.22	2.33	2.95	2.25	0.44	5.12	1.42	1.55	1.38	18.3
Th	40.0	40.1	44.3	50.3	50.0	17.7	108	41.6	33.3	10.8	20.5	27.4	25.6	14.4	90.1
U	14.6	17.0	17.1	21.8	18.8	14.9	42.7	16.3	16.1	3.6	8.9	12.5	11.0	11.6	—
Th/U	2.74	2.36	2.59	2.31	2.66	1.19	2.53	2.55	2.07	3.00	2.30	2.19	2.33	1.24	—
La/Yb	10.8	12.3	12.0	6.8	5.1	10.5	3.7	10.1	10.7	25.9	2.5	13.6	9.1	7.9	0.7

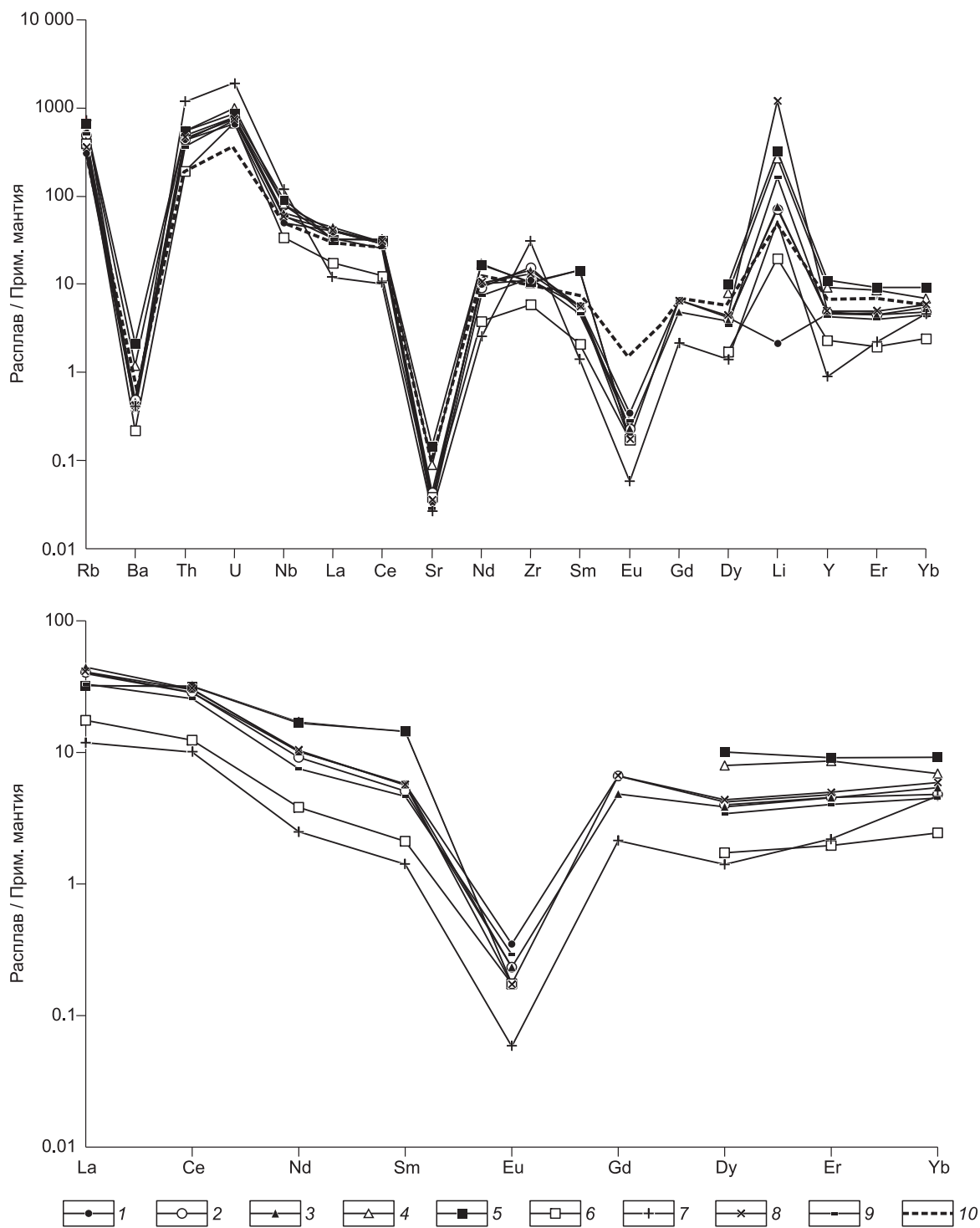


Рис. 4. Нормированное к составу примитивной мантии, по [Sun, McDonough, 1989], распределение редких и редкоземельных элементов в расплавах Восточного Забайкалья.

1—9 — данные табл. 7; 10 — данные из работы [Наумов и др., 2010] по средним составам элементов в магматических расплавах кислого состава внутриконтинентальных рифтов и областей континентальных горячих точек.

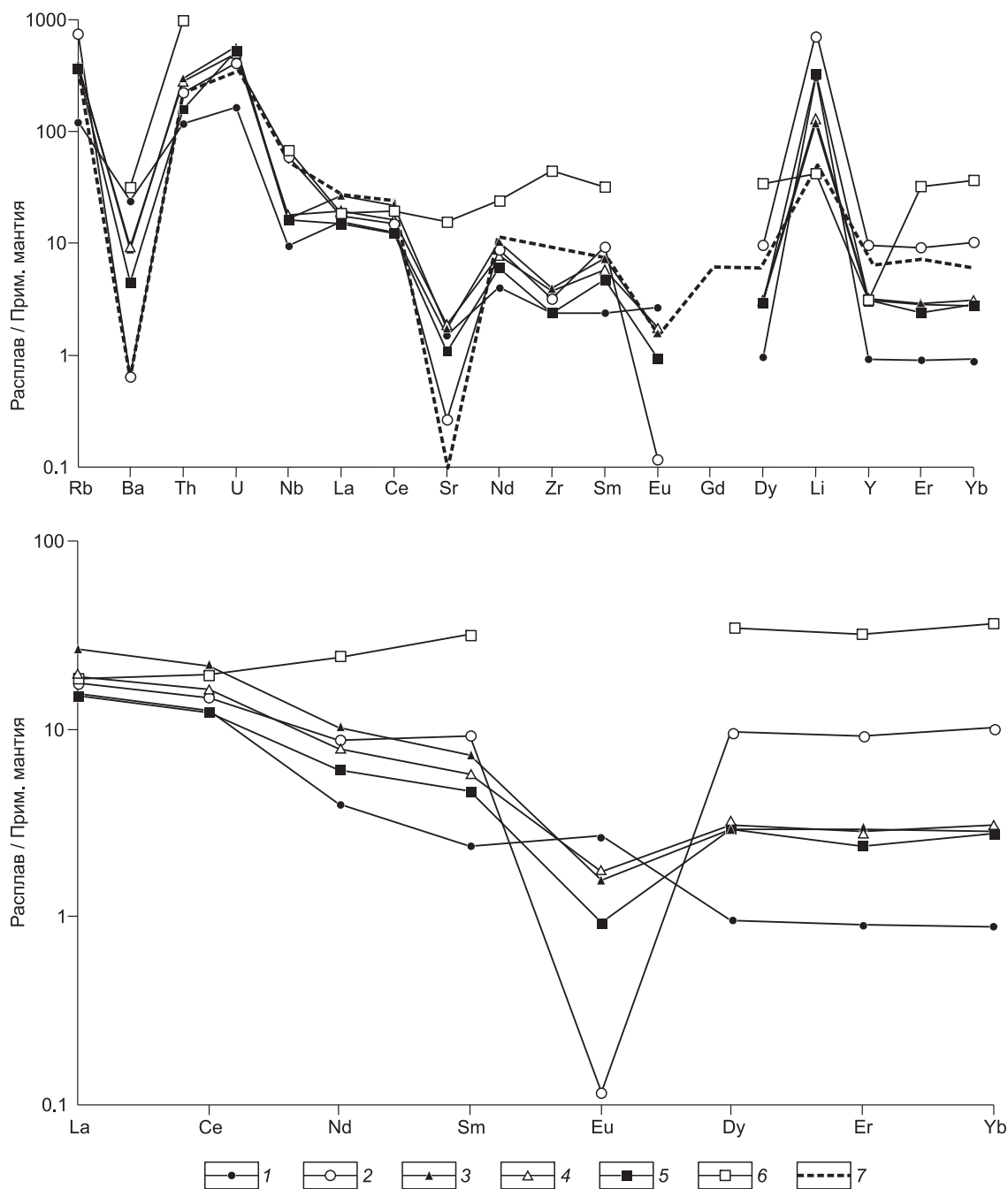


Рис. 5. Нормированное к составу примитивной мантии, по [Sun, McDonough, 1989], распределение редких и редкоземельных элементов в расплавах Северного Кавказа.

1—6 — данные табл. 7; 7 — данные из работы [Наумов и др., 2010] по средним содержаниям элементов в магматических расплавах кислого состава внутриконтинентальных рифтов и областей континентальных горячих точек.

близки к среднему составу расплавов внутриконтинентальной обстановки. Максимальное обогащение относительно примитивной мантии наблюдается для Rb, Th, U, Li. Минимальные концентрации характерны для Ba, Sr, Eu, что, вероятнее всего, отражает существенное фракционирование системы со значительной долей полевых шпатов при кристаллизации магматических расплавов. Минимум Zr для расплавов Северного Кавказа и его вариации для расплавов Восточного Забайкалья, по-видимому, отражают кристаллизацию из расплава циркона.

Таблица 8. Содержание H₂O, Cl, F (мас. %) и элементов-примесей (г/т) в расплавных включениях в кварце риолитов Стрельцовой кальдеры (Восточное Забайкалье)

Компонент	Данные настоящей работы				Литературные данные*			
	<i>n</i>	1	2	3	<i>n</i>	1	2	3
H ₂ O	9	0.11	4.75	1.57	45	0.57	3.73	1.63
Cl	20	0.13	0.26	0.20	34	0.15	0.20	0.17
F	19	0.05	2.21	1.07	45	0.51	2.68	1.67
Sr	9	0.58	3.23	1.17	54	0.60	30.6	14.2
Ba	9	1.60	15.4	4.88	54	0.60	4.40	2.01
Y	9	4.24	51.9	24.4	54	17.7	61.5	47.0
Nb	9	25.0	88.1	52.3	54	47.1	169	135
La	9	8.65	32.4	23.7	54	31.2	72.5	63.6
Ce	9	19.1	61.0	48.3	54	69.4	154	123
Nd	9	3.50	24.6	13.7	54	20.9	40.9	33.9
Sm	9	0.97	6.65	3.02	54	3.10	10.6	8.17
Eu	9	0.01	0.06	0.04	54	0.02	0.23	0.16
Dy	9	1.07	7.65	3.46	54	3.50	13.5	10.1
Er	9	0.97	4.51	2.46	54	2.10	11.7	8.66
Yb	9	1.22	4.59	2.73	54	3.40	14.9	11.4
Th	9	17.7	108	47.3	14	33	49	41.9
U	9	14.9	42.7	19.9	50	14	26	18
<i>T</i> , °C	—	1000	1200	1120	—	980	1045	1014

Примечание. *n* — количество изученных включений; 1, 2, 3 — данные выборки: 1 — минимальное, 2 — максимальное, 3 — среднее значение.

* Данные из работ [Chabiron et al., 1999, 2001, 2003].

Итак, сравним полученные в этой работе анализы воды, хлора, фтора и элементов-примесей в расплавных включениях в кварце риолитов Стрельцовой кальдеры с данными, опубликованными французскими учеными [Chabiron et al., 1999, 2001, 2003]. Эти результаты представлены в табл. 8. В целом наблюдаются близкие концентрации летучих компонентов — воды (в среднем 1.57 и 1.63 мас. %) и хлора (в среднем 0.20 и 0.17 мас. %). Отметим также близкие (и очень высокие) концентрации в расплаве тория (в среднем 47.3 и 41.9 г/т) и урана (в среднем 19.9 и 18 г/т). Напомним, что в пределах Стрельцовой кальдеры известно более 15 урановых месторождений и рудопроявлений. Следует обратить внимание на то, что французские ученые анализировали более низкотемпературные расплавные включения (980—1045 °C) по сравнению с включениями в нашей работе (1000—1200 °C). Возможно, именно поэтому в этих включениях получены значительно более высокие концентрации F, Y, Nb и редкоземельных элементов.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы расплавные включения во вкрапленниках кварца из риолитов Восточного Забайкалья (Стрельцовская кальдера) и во вкрапленниках кварца, апатита и плагиоклаза из риолитов Северного Кавказа (Северная Осетия и Тырныаузский район). В Стрельцовой кальдере известно более 15 урановых месторождений и рудопроявлений. В Северной Осетии расположены Pb-Zn месторождения, в Тырныаузском районе находится крупнейшее Mo-W месторождение.

2. Использованы методы гомогенизации включений и анализ стекол более 30 включений с помощью электронного и ионного микрозонда. Установлена прямая зависимость температур полной гомогенизации расплавных включений от температур начала плавления (размягчения) стекол этих включений, что может быть обусловлено различным содержанием летучих (в первую очередь воды). Опыты по выявлению времени, необходимого для гомогенизации и гетерогенизации расплавных включений, свидетельствуют о различной вязкости расплавов во включениях, гомогенизация которых происходит при разных температурах. Установлен значительный диапазон температур гомогенизации расплавных включений в обоих изученных регионах — 800—1260 °C (Восточное Забайкалье, более 800 включений) и 750—1270 °C (Северный Кавказ, более 600 включений).

3. Риолитовые расплавы Восточного Забайкалья и Северного Кавказа близки по содержаниям петрогенных компонентов. В среднем они равны (мас. %) 75.0 и 74.6 SiO₂, 0.08 и 0.05 TiO₂, 11.0 и 12.3 Al₂O₃, 0.74 и 0.40 FeO, 0.04 и 0.05 MgO, 0.29 и 0.64 CaO, 4.09 и 3.79 Na₂O, 4.30 и 4.24 K₂O соответственно для первого и второго регионов. Однако эти расплавы заметно отличаются по содержаниям Cl (в среднем 0.20 и 0.08 мас. % соответственно), F (в среднем 1.07 и 0.09 мас. %) и некоторых элементов-примесей. В расплавах первого региона по сравнению со вторым значительно выше содержания Zr, Nb, La, Ce, Th, U, но ниже содержания Sr, Ba, Eu. Это свидетельствует о более глубокой дифференциации расплавов Восточного Забайкалья.

4. Проведено сравнение полученных в этой работе анализов воды, хлора, фтора и элементов-примесей в расплавных включениях в кварце риолитов Стрельцовой кальдеры с данными, опубликованными французскими учеными для этой же кальдеры. В целом наблюдаются близкие концентрации летучих компонентов (воды и хлора), а также тория и урана. Более высокие концентрации F, Y, Nb и редкоземельных элементов в анализах французских ученых, возможно, объясняются тем, что исследовались более низкотемпературные (980—1045 °C) расплавы по сравнению с включениями в нашей работе (1000—1200 °C).

Статья подготовлена при поддержке РФФИ (грант 10-05-0020).

ЛИТЕРАТУРА

Наумов В.Б. Термометрическое исследование включений расплава во вкрапленниках кварца кварцевых порфиров // *Геохимия*, 1969, № 4, с. 494—498.

Наумов В.Б., Учамейшвили Н.Е. Термометрическое исследование включений в минералах магматических пород Тырнаузского района (Северный Кавказ) // *Геохимия*, 1977, № 4, с. 525—532.

Наумов В.Б., Никитин А.А., Салазкин А.Н. Термометрическое исследование включений расплава во вкрапленниках кварца кислых эффузивов Восточного Забайкалья // *Геохимия*, 1975, № 2, с. 295—298.

Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород // *Геохимия*, 2010, № 12, с. 1266—1288.

Носова А.А., Сазонова Л.В., Наркисова В.В., Симакин С.Г. Элементы-примеси в клинопироксенах из палеозойских вулканитов Тагильской островной дуги Среднего Урала // *Геохимия*, 2002, № 3, с. 254—268.

Портнягин М.В., Симакин С.Г., Соболев А.В. Фтор в примитивных магмах офиолитового комплекса Троодос (о. Кипр): методика определения и основные результаты // *Геохимия*, 2002, № 7, с. 691—699.

Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // *Петрология*, 1996, т. 4, № 3, с. 228—239.

Толстых М.Л., Наумов В.Б., Гурбанов А.Г., Газеев В.М., Богатиков О.А., Кононкова Н.Н. Состав магматических расплавов вулканов Эльбрус и Казбек (Кавказ) по данным изучения включений в минералах // *Геохимия*, 2001, № 4, с. 441—448.

Chabiron A., Alyoshin A.P., Cuney M., Deloule E., Golubev V.N., Velitchkin V.I., Poty B. Original compositions of the Streltsovka rhyolitic magmas (Russia): a melt inclusion study // *Terra Nostra: ECROFI XV, Abstract and Program*, 1999, № 6, p. 66—67.

Chabiron A., Alyoshin A.P., Cuney M., Deloule E., Golubev V.N., Velitchkin V.I., Poty B. Geochemistry of the rhyolitic magmas from the Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia): a melt inclusion study // *Chem. Geol.*, 2001, v. 175, № 3—4, p. 273—290.

Chabiron A., Cuney M., Poty B. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism: the Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia) // *Miner. Depos.*, 2003, v. 38, № 2, p. 127—140.

Clocchiatti R. Composition chimique des inclusions vitreuses des phenocristaux de quartz de quelques laves acides par l'analyse à la sonde électronique // *C. R. Acad. Sc. Paris*, 1971, t. 272, p. 2045—2047.

Fabre C., Boiron M.-C., Dubessy J., Chabiron A., Charoy B., Crespo T.M. Advances in lithium analysis in solids by means of laser-induced breakdown spectroscopy: an exploratory study // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, v. 66, № 8, p. 1401—1407.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the Ocean Basins* / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. London, Geological Society Special Publication, 1989, v. 42, p. 313—345.

Поступила в редакцию

17 февраля 2011 г.