

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

УДК 552.11:550.34:548.4

ОСОБЕННОСТИ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В НАДСУБДУКЦИОННЫХ
БАЗАЛЬТОВЫХ РАСПЛАВАХ ВУЛКАНА ТОЛБАЧИК (*Камчатка*)

Н.Л. Добрецов^{1,3}, В.А. Симонов^{2,3}, А.В. Котляров², С.И. Ступаков²

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

³Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Исследования стекловатых базальтов и кристаллов-лапиллей с помощью высокотемпературной газовой хроматографии свидетельствуют о необычных для надсубдукционных расплавов особенностях флюидного режима влк. Толбачик. Устанавливается явное истощение преобладающими в островодужных и океанических расплавах летучими компонентами, что подтверждает аномальность флюидных систем вулкана. Стекловатые базальты содержат незначительное количество воды (0.16—0.27 мас. %) и углекислоты (95—440 г/т). Новые данные по летучим компонентам в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик свидетельствуют о минимальных значениях CO₂, а также суммы всех газов (кроме H₂O) и об относительном обогащении восстановленными флюидами (CO, CH₄) по сравнению с базальтами. В целом данные по базальтам и кристаллам-лапиллям плагиоклаза показывают эволюцию составов летучих компонентов во времени с увеличением роли восстановленных флюидов (CO, CH₄) и падением количества CO₂, а также суммы всех газов (кроме воды) от древних к современным извержениям вулкана. Установлена закономерная связь характеристик летучих компонентов и химических составов базальтов и кристаллов-лапиллей плагиоклаза влк. Толбачик — падение содержания углекислого газа и рост количества восстановленных флюидов (CO и CH₄) при увеличении значений FeO/MgO, K₂O в породах и анортитового компонента в плагиоклазах.

Летучие компоненты, надсубдукционные базальтовые расплавы, высокотемпературная газовая хроматография, влк. Толбачик, Камчатка.

VOLATILES IN SUPRASUBDUCTION BASALTIC MELTS
FROM TOLBACHIK VOLCANO (*Kamchatka*)

N.L. Dobretsov, V.A. Simonov, A.V. Kotlyarov, and S.I. Stupakov

Vitreous basalts and plagioclase lapilli from Tolbachik Volcano studied by high-temperature gas chromatography reveal features of a fluid regime uncommon to suprasubduction melts. Prominent depletion in volatiles confirms the anomalous behavior of the Tolbachik fluid systems. Vitreous basalts contain minor amounts of water (0.16–0.27 wt.%) and carbon dioxide (95–440 ppm). New data on volatiles in the Tolbachik plagioclase lapilli show very low contents of CO₂ and total gas (exclusive of H₂O) and enrichment in reduced fluids (CO and CH₄) relative to the basalts. In general, analysis of basalts and plagioclase lapilli from different eruptions trace a progressive increase in reduced fluids (CO and CH₄) and decrease in CO₂ and total gas from past to present events. The concentrations of CO₂ decrease, while those of CO and CH₄ in basalts and plagioclase lapilli increase systematically with an increase in FeO/MgO ratios and K₂O contents in the lavas and in anorthite component in plagioclase.

Volatiles, suprasubduction basaltic melt, high-temperature gas chromatography, Tolbachik Volcano, Kamchatka

ВВЕДЕНИЕ

Главную роль при катастрофических извержениях вулканов играют летучие компоненты, содержащиеся в магмах. В связи с этим возникает практическая необходимость отслеживать случаи аномального поведения флюидных систем в расплавах отдельных вулканов, развитие которых может привести к взрывам с катастрофическими последствиями. Подобная ситуация с необычными характеристиками летучих отмечена для влк. Толбачик (Камчатка), научно-исследовательские работы на котором во время последнего (2012—2013 гг.) извержения показали, что лавы были насыщены не водой, как в случае большинства надсубдукционных расплавов, а другими флюидными компонентами. Об этом свидетельствуют данные о выделяющихся из лавовых потоков вулкана высокотемпературных газах, о составе которых можно судить по характеру новообразованных минералов (вулканических возгонов), представленных хлоридами и сульфатами натрия, железа, калия и меди, в меньшей степени гидрохлоридами меди [Савельев, 2013]. Таким образом, в составе вулканических газов, выделяющихся из магмы влк. Толбачик в поверхностных условиях, заметную роль играли хлористые и сернистые соединения.

Отбор и анализ летучих компонентов, выделяющихся из лавовых потоков непосредственно во время извержения, подтверждает заметное присутствие сернистых и хлористых газов, показывая при этом значительную роль водорода [Большое..., 1984; Halmer et al., 2002].

Летучие компоненты в глубинных условиях влк. Толбачик также имеют свои особенности, отличающиеся от обычных надсубдукционных систем. В частности, исследования стекол расплавных включений в оливинах извержения 2012—2013 гг. [Plechov et al., 2015] показали, что исходные расплавы необычайно обеднены водой (до 1.45 мас. %) по сравнению с другими островодужными базальтовыми магмами, для которых типичны значительно более высокие содержания H_2O от 2 до 6 мас. % [Plank et al., 2013].

В целом, рассматривая ситуацию с летучими компонентами в базальтовых расплавах влк. Толбачик, необходимо отметить, что отбор и анализ газов непосредственно во время извержения дают очень полезную информацию, но она касается только тех флюидов, которые непосредственно выделяются из лавы в поверхностных условиях. С другой стороны, изучение расплавных включений позволяет судить о флюидном режиме в достаточно глубинных условиях. В то же время летучие, сохраняющиеся в матрице стекловатых и кристаллических фаз и отражающие свойства флюидной системы, существовавшей в магме во время ее подъема с глубинных горизонтов к приповерхностным уровням, остаются фактически вне поля зрения. В связи с этим были проведены исследования составов летучих компонентов, содержащихся в стекловатых базальтах и в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик, результаты которых приводятся в данной статье.

ГЕОЛОГО-ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВУЛКАНА ТОЛБАЧИК

Толбачинский вулкан расположен в юго-западной части Ключевской группы вулканов Камчатки (рис. 1). Он состоит из трех основных частей: Острый Толбачик, Плоский Толбачик и Толбачинский дол на юго-западном фланге Плоского Толбачика.

Острый и Плоский Толбачик начали формироваться около 7—10 тыс. лет назад, примерно одновременно с Ключевским вулканом [Churikova et al., 2013], но Острый Толбачик прекратил свою активность, а Плоский Толбачик и вулканические центры на юго-западном фланге Плоского Толбачика продолжают быть активными.

Во всех наиболее древних извержениях Толбачика (начиная с 7000 лет) преобладали высокоглиноземистые андезибазальты. Высокомагнезиальные базальты, появившиеся в последние 2000 лет [Федотов и др., 2010], связаны с более глубокими очагами и сопровождалась развитием системы даек. Высокоглиноземистые базальты извергались из менее глубоких камер [Волынец и др., 2013; Belousov et al., 2015].

В период с 1740 по 2013 г. вулканические извержения из кратера Плоского Толбачика и вулканических аппаратов на его юго-западном фланге зафиксированы 14 раз. Наиболее крупные извержения происходили в 1941, 1975—1976 гг. и 2012—2013 гг. По своему составу они были преимущественно базальтовыми с выделением двух типов — высокомагнезиальных и высокоглиноземистых базальтов. Андезиты появляются только в виде бомб, образовавшихся в промежуточных вулканических очагах.

Наиболее крупное Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ, Северный и Южный прорывы в 1975—1976 гг.) длительностью 450 дней дало объем вулканического материала 0.87 км³. Второе по значению извержение 2012—2013 гг. длилось 280 дней и дало 0.55 км³ вулканитов.

Во время раннего извержения 1975 г. (Северный прорыв) преобладали пирокластические выбросы, по составу отвечающие магнезиальным базальтам. В самом крупном извержении Южного прорыва 1976 г. изливались только лавы высокоглиноземистых базальтов.

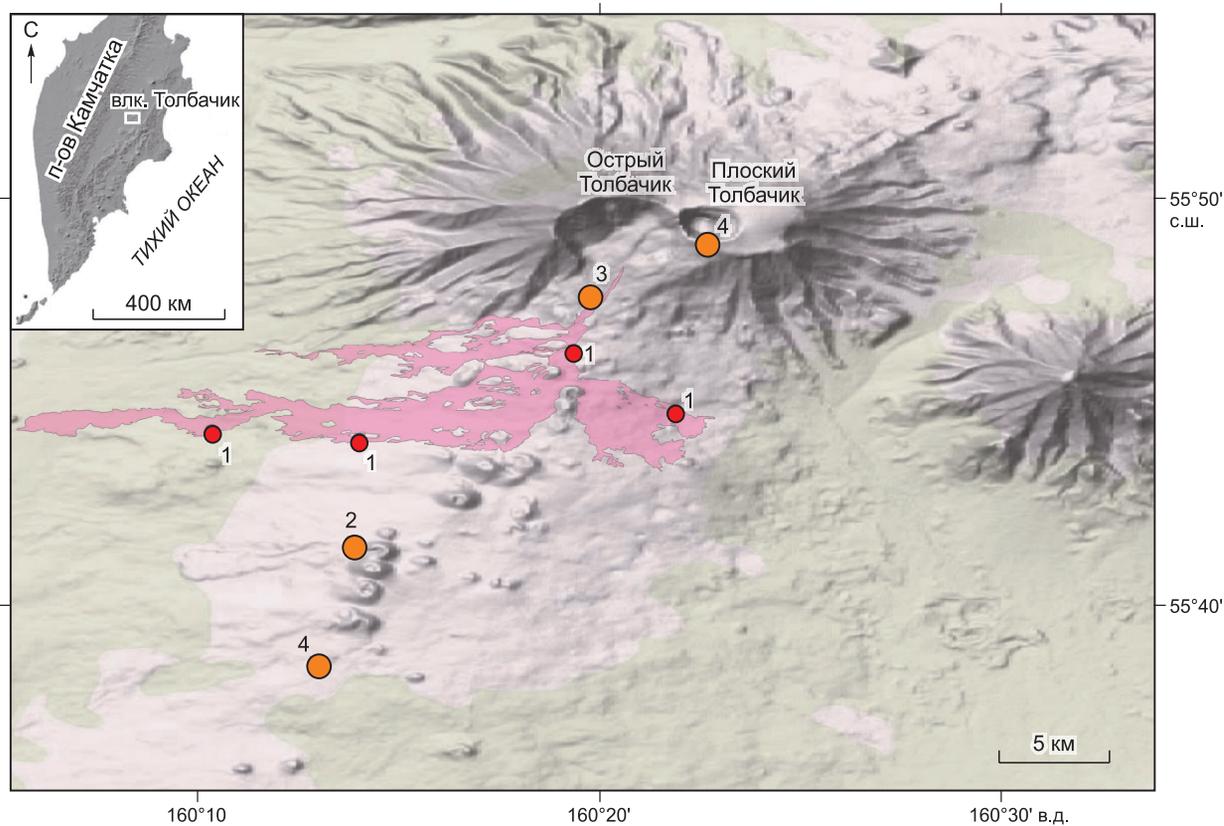


Рис. 1. Расположение изученных базальтов в структурах влк. Толбачик.

1—4 — точки отбора стекловатых базальтов, образовавшихся во время извержений 2012—2013 гг. (1), 1975—1976 гг. (2) и 1941 г. (3), а также более древних извержений (4). Рисунок составлен на основе данных из работ [Флеров и др., 1984; Федотов и др., 2011] с использованием материалов С.А. Хубуная, В.Н. Двигаго и И.М. Романовой.

В начальную стадию извержения 2012—2013 гг. (прорыв Меняйлова) изливались андезибазальты с содержанием K_2O свыше 1.5 мас. %. В главную стадию (конусы Красный и Набоко) преобладали базальтовые лавы [Вольнец и др., 2013]. Большинство лав, а также бомб и пирокластики содержат значительное количество стекловатых обломков. В начале главной стадии было выброшено много уплощенных кристаллов и сростков плагиоклаза (кристаллов-лапиллей), покрытых тонкой пленкой стекла. В целом характерной особенностью извержения 2012—2013 гг. влк. Толбачик является максимальная стекловатость и высокая пористость пород при интенсивном выделении вулканических газов.

Нами были изучены составы летучих компонентов, содержащихся в стекловатых базальтах извержений влк. Толбачик в 2012—2013, 1975—1976, 1941 годах и древнее 1000 лет (см. рис. 1). Проанализированы также составы флюидов в кристаллах-лапиллях плагиоклаза, выброшенных в виде самостоятельных фаз во время извержений в 2012—2013 гг. и в 1975—1976 гг. и сформировавшихся, наиболее вероятно, на самых верхних горизонтах магматической колонны при активном участии летучих компонентов [Добрецов и др., 2016].

При исследовании особенностей летучих компонентов в базальтовых расплавах влк. Толбачик были использованы образцы стекловатых базальтов, собранные авторами во время экспедиционных работ 2015 г. Часть проб базальтов и кристаллов-лапиллей плагиоклаза была предоставлена сотрудником ИВиС ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский) С.А. Чирковым.

Изученные образцы базальтов (независимо от их возраста) содержат значительное количество пор различного размера (рис. 2), располагающихся в стекловатом матриксе. Основным объемом самого матрикса занимает стекло, в котором находятся микролиты плагиоклаза и реже клинопироксена.

Исследованные кристаллы-лапилли плагиоклаза имеют вид плоских ограниченных табличек (шириной до 15 мм и толщиной 1—2 мм), покрытых пленкой базальтового стекла и тесно ассоциирующих с мелкими базальтовыми вулканическими бомбами — микролапиллями (рис. 3). Эти кристаллы содержат множество первичных включений базальтового стекла, которые часто буквально пропитывают весь

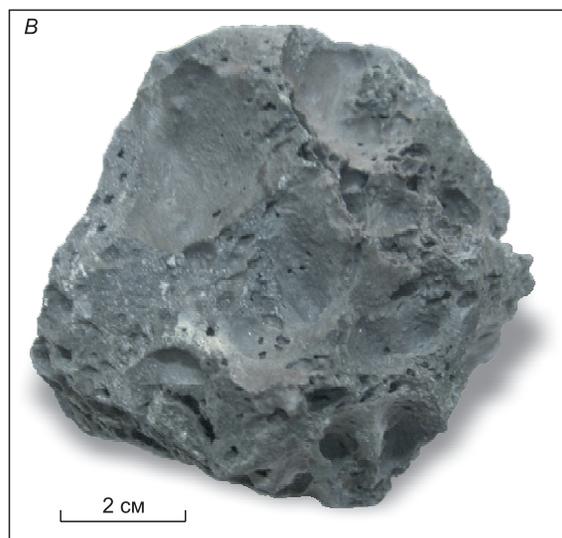
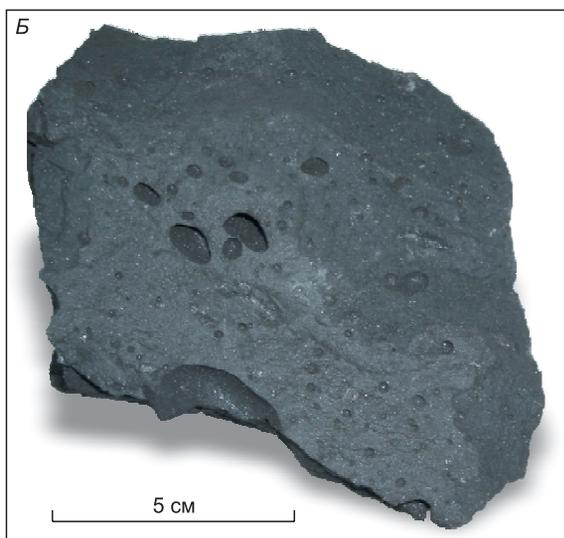


Рис. 2. Внешний облик изученных стекловатых базальтов влк. Толбачик.

A — потоки стекловатых базальтов (извержение 2012—2013 гг.); *Б, B* — образцы пористых стекловатых базальтов извержения 2012—2013 гг. (*Б*) и древних извержений (*B*).

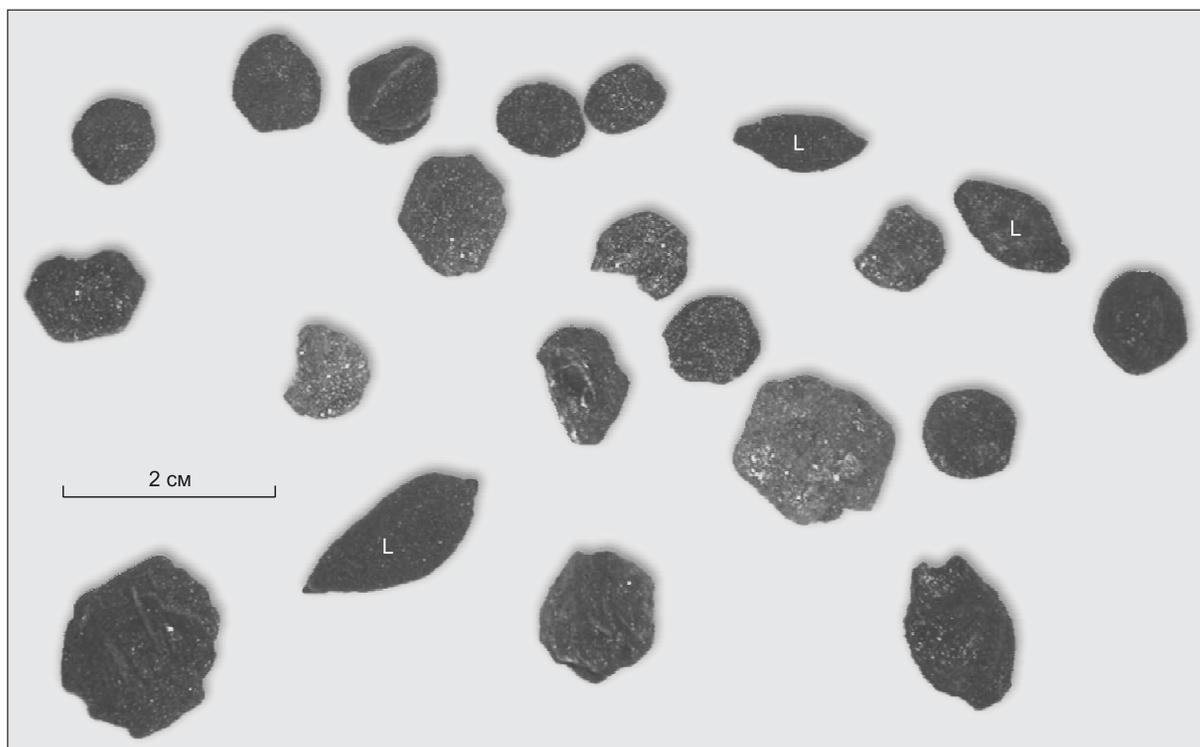


Рис. 3. Внешний облик кристаллов-лапиллей плагиоклаза влк. Толбачик.

L — мелкие базальтовые вулканические бомбы (микролапилли). Остальное — кристаллы-лапилли плагиоклаза.

кристаллик плагиоклаза (рис. 4). Именно эти стекловатые включения содержат основной объем летучих компонентов, которые выделяются из кристаллов-лапиллей при их нагреве во время анализа с помощью высокотемпературной газовой хроматографии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования стекловатых базальтов и кристаллов-лапиллей плагиоклаза влк. Толбачик проводились с использованием целого ряда методов. Особенности структуры базальтов и внутреннего строения кристаллов-лапиллей были рассмотрены при изучении под микроскопом шлифов и полированных пластинок. Химический состав пород определен с помощью силикатного рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования СО РАН» (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Составы кристаллов-лапиллей плагиоклаза влк. Толбачик были проанализированы на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Пределы обнаружения (мас. %) компонентов этим методом следующие: SiO_2 — 0.007, TiO_2 — 0.032, Al_2O_3 — 0.011, FeO — 0.019, MnO — 0.034, MgO — 0.011, CaO — 0.008, Na_2O — 0.017, K_2O — 0.009. Стандартами при анализе на микрозонде служили минералы — альбит (Ab), ортоклаз (Or), диопсид (Di) и гранат (O-145).

Анализ летучих компонентов в базальтах и в кристаллах-лапиллях плагиоклаза проводился с помощью газовой хроматографии. Необходимо отметить, что существуют два основных способа из-

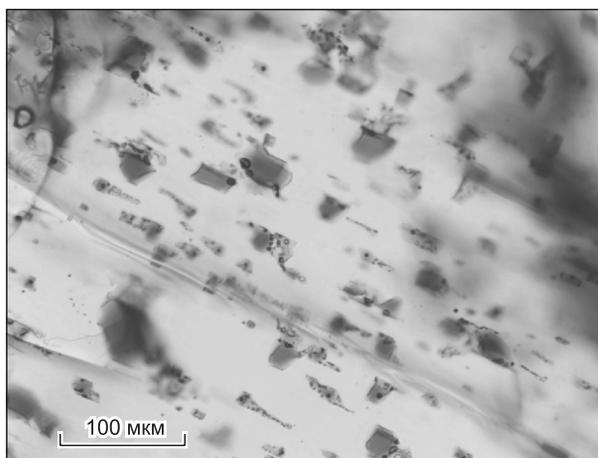


Рис. 4. Расплавные включения (стекло + газовый пузырек) в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик.

влечения летучих компонентов из проб для газовой хроматографии. Один связан с разрушением образца обычно при комнатной температуре. При этом извлекаются разнообразные флюиды, в том числе разлагающиеся при повышенных температурах. Таким образом, мы получаем набор летучих компонентов, который не может существовать в расплавах, и, соответственно, данный способ не подходит для изучения магматических систем. В отличие от деструктивного метода, термический способ позволяет извлекать из пробы летучие компоненты, находящиеся при температурах около 1000 °С в условиях, близких к магматическим. Нагревая пробы до близмагматических температур, мы фактически приводим флюидные компоненты в состояние, в котором они вполне могут находиться в магматических системах. Учитывая это, а также принимая во внимание то, что нам необходимо было рассмотреть особенности летучих компонентов, существовавших в высокотемпературных расплавах влк. Толбачик, был использован термический способ извлечения газов.

Для обоснования методики анализа летучих компонентов с помощью высокотемпературной газовой хроматографии проделана серия экспериментов [Симонов, 1993]. Прежде всего, необходимо было выяснить оптимальный температурный режим нагрева пробы. С этой целью на вакуумном декрепитометре ВД-3 исследована кинетика газовой выделенности из базальта. Было выяснено, что максимальные пики выделения газов наблюдались до 950 °С. При более высокой температуре, даже когда происходило плавление базальта, газ практически не выделялся (рис. 5). Таким образом, для фактически полного извлечения летучих компонентов из базальтов прогревать пробы следует максимум до 950—1000 °С и совершенно не обязательно их переплавлять.

Следующие эксперименты позволили определить нижнюю температурную границу нагрева базальтовой пробы для извлечения магматогенных газов. Переплавленные полностью и закаленные в стекло базальты после выдержки на воздухе в течение 24 ч. были исследованы на вакуумном декрепитометре и показали отчетливые пики газовой выделенности при 225—390 °С. То есть установлена явная сорбция воздуха и содержащейся в нем воды при комнатной температуре, а выделение сорбированных газов происходит при температурах, близких к 400 °С. Таким образом, летучие компоненты, выделяющиеся при нагреве базальтовых проб до 400 °С, являются, скорее всего, наложенными в ходе низкотемпературных вторичных процессов, включая воздействие природных систем. В связи с этим, при обработке результатов хроматографических анализов выделяющиеся до 400 °С газы, представленные обычно продуктами вторичных изменений образцов, не учитывались. При дальнейших построениях использовались только высокотемпературные (950 °С) компоненты.

В целом составы летучих компонентов в базальтах и в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик были определены с помощью высокотемпературной газовой хроматографии в ИГМ СО РАН согласно опубликованной ранее методики [Осоргин, 1990; Симонов, 1993] и с учетом результатов экспериментов, приведенных выше. Флюидные компоненты извлекались из стекловатой матрицы базальтов и фактически из стекол включений в кристаллах-лапиллях плагиоклаза (см. рис. 4) с помощью ступенчатого нагрева отобранных под бинокулярным микроскопом проб (50—100 мг, фракция 0.50—0.25 мм) с выдержками при температурах 400 и 950 °С. Погрешность определения количества летучих компонентов с помощью использованного метода газовой хроматографии составляет около ± 5 отн. %. Минимальные значения летучих компонентов, определяемые с помощью хроматографии, — около 1 мг/кг.

Достоверность полученных с помощью высокотемпературной газовой хроматографии результатов обеспечивалась контрольными анализами эталонных образцов базальтовых стекол Срединно-Атлантического хребта [Симонов и др., 1999] и повторным изучением проб эффузивов Толбачика с аномальными значениями летучих. Для оценки реальности новых данных по магматогенным летучим компонентам влк. Толбачик проводилось сравнение с полученной ранее на основе аналогичной методики информацией по стеклам из субдукционных комплексов типичных островных дуг Тонга и Курильской (Тихий океан) [Симонов, 1993], а также по базальтовым стеклам Срединно-Атлантического хребта [Симонов и др., 1999]. Значительное внимание было уделено сопоставлению с данными по содержанию H₂O и CO₂ в расплавах влк. Толбачик, полученными с помощью анализа расплавных включений

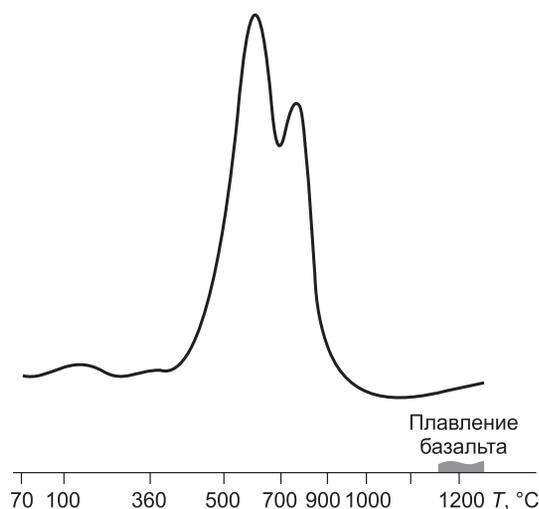


Рис. 5. Особенности выделения летучих компонентов при нагреве пробы базальта в вакуумном декрепитометре.

[Plechov et al., 2015] и представляющими информацию о флюидном режиме в глубинных условиях, а также с результатами замеров составов вулканических газов, непосредственно выделяющихся из лавовых потоков во время извержений влк. Толбачик [Большое..., 1984; Halmer et al., 2002].

В статье содержания летучих компонентов приведены в единицах, используемых другими исследователями и наиболее удобных для оценки роли каждого из газов. Для H_2O практически всегда используются мас. %. В случае CO_2 обычно применяются г/т. Для летучих компонентов, находящихся при атмосферном давлении в газовом состоянии, широко используются объемные % (об. %). Учитывая то, что массы газов весьма различаются и сравнение (например H_2 и CO_2) в мас. % может дать искаженное представление о роли этих газов, использование об. % при выяснении соотношений отдельных летучих компонентов представляется наиболее правильным. В целом при обработке хроматографических данных нами использовались все отмеченные выше единицы измерения: H_2O — мас.%; CO_2 — г/т (и в об. %); летучие компоненты, находящиеся при атмосферном давлении в газообразном состоянии (все летучие, кроме соответственно H_2O), в об. % от суммы всех газов (кроме H_2O), представленной в cm^3 на 1 кг пробы. Подобный подход использовался нами во всех предыдущих публикациях [Симонов, 1993; Симонов и др., 1999; и др.], в которых приводились результаты хроматографических анализов.

СОСТАВЫ БАЗАЛЬТОВ И КРИСТАЛЛОВ-ЛАПИЛЛЕЙ ПЛАГИОКЛАЗА

Для всех образцов стекловатых базальтов и кристаллов-лапиллей влк. Толбачик, проанализированных на летучие компоненты, были определены химические составы (табл. 1, 2).

Стекловатые базальты, в которых установлены содержания флюидных компонентов, по соотношению суммы щелочей и SiO_2 принадлежат к субщелочным сериям. При этом наиболее молодые породы, образовавшиеся во время извержений влк. Толбачик в 2012—2013 гг., содержат существенно больше щелочей (более 6 мас. %), чем древние (сформировавшиеся в 1975—1976, 1941 годах и древнее 1000 лет) базальты (менее 5.2 мас. %), минимальны в пробе 1976 г. № 5 (3.63 %).

На вариационных диаграммах, показывающих зависимость содержания химических элементов от SiO_2 , рассмотренные базальты не выделяются среди других эффузивов Толбачинского вулкана. При этом среди изученных на летучие компоненты образцов устанавливаются заметные отличия практически по всем компонентам (кроме Al_2O_3) пород, образовавшихся во время извержений влк. Толбачик в 2012—2013 гг., от более древних эффузивов. В общем наблюдается эволюция во времени составов базальтов с ростом титана, железа, натрия, калия и падением магния, кальция на фоне увеличения содержания SiO_2 (рис. 6). В этом же направлении растет и железистость пород. Причем часть фигуративных точек древних базальтов приурочена к началу тренда, показывающего изменение состава базитовых пород с увеличением в них количества клинопироксена [Симонов и др., 2016], но основная эволюция составов эффузивов влк. Толбачик во времени идет согласно тренду остаточных расплавов при кристаллизации базальтовых систем [Золотухин и др., 2003]. Необходимо отметить, что в целом базальты влк. Толбачик разбиваются на две группы, соответствующие этим двум трендам, созданным ранее на основе данных по другим объектам (рис. 7).

Таблица 1. Составы (мас.%) стекловатых базальтов влк. Толбачик, для которых определены содержания летучих компонентов

№ п/п	№ образца	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	П.п.п.	Сумма
1	126–13	51.79	2.00	16.27	12.03	0.17	4.38	7.49	3.56	2.44	0.72	–0.78	100.08
2	10–15	51.63	1.94	16.12	11.39	0.17	4.18	7.42	3.65	2.44	0.68	–0.47	99.15
3	11–15	52.96	1.87	16.36	10.70	0.17	3.68	7.30	3.78	2.53	0.69	–0.40	99.64
4	14–13	52.96	1.88	15.99	11.03	0.17	3.57	7.42	3.62	2.49	0.69	–0.51	99.31
5	1–15	50.16	1.07	14.25	10.24	0.17	10.02	10.49	2.54	1.09	0.27	–0.27	100.02
6	3–15	51.76	1.40	18.18	9.53	0.15	4.75	8.56	3.42	1.68	0.47	–0.40	99.49
7	4а–15	50.46	1.36	15.38	10.55	0.17	8.09	9.32	2.93	1.50	0.41	–0.44	99.72
8	4б–15	50.09	1.38	15.34	10.71	0.17	7.89	9.36	2.94	1.50	0.41	–0.46	99.33
9	5–15	50.35	1.42	15.60	10.51	0.16	7.55	9.32	2.99	1.56	0.44	–0.49	99.39
10	7–15	51.12	1.59	16.48	11.26	0.18	5.66	8.87	3.11	1.75	0.51	–0.32	100.21
11	2–15	51.13	1.51	17.59	10.41	0.15	4.98	8.47	3.36	1.80	0.48	–0.30	99.58

Примечание. 1—11 — базальты различных по времени извержений Толбачинского вулкана: 2012—2013 гг. (1—4), 1976 г. (5), 1941 г. (6—9) и древнее 1000 лет (10, 11).

Таблица 2. Представительные анализы (мас. %) кристаллов-лапиллей плагиоклаза влк. Толбачик

№ п/п	№ образца	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	An
1	1	1.2B	53.39	0.10	28.57	0.83	0.02	0.14	11.84	4.53	0.53	99.96	57.29
2		1.3A	51.86	0.10	28.88	0.79	0.03	0.15	12.22	4.15	0.46	98.64	60.26
3		1.3B	52.66	0.07	28.80	0.83	0.02	0.13	12.19	4.24	0.50	99.45	59.58
4		1.4B	52.82	0.08	28.73	0.80	0.01	0.14	12.01	4.38	0.51	99.48	58.46
5	1—1	2.3B	53.02	0.12	28.86	0.76	0.00	0.13	12.12	4.17	0.51	99.69	59.79
6		2.4B	53.01	0.07	28.54	0.80	0.00	0.13	11.75	4.49	0.50	99.29	57.42
7		2.5A	52.81	0.10	28.75	0.64	0.03	0.10	11.80	4.24	0.59	99.06	58.50
8		2.5B	52.78	0.08	28.61	0.73	0.04	0.12	11.89	4.35	0.60	99.20	58.06
9	1—2	3.1A	53.14	0.08	28.47	0.75	0.01	0.14	11.87	4.59	0.53	99.57	57.05
10		3.2A	53.50	0.09	28.71	0.79	0.02	0.15	11.73	4.51	0.51	100.00	57.23
11		3.3A	52.35	0.08	28.69	0.78	0.01	0.15	12.01	4.26	0.48	98.81	59.18
12		3.5B	53.14	0.10	28.51	0.76	0.00	0.13	11.75	4.42	0.54	99.36	57.61
13	1—3	4.2A	53.18	0.09	28.81	0.75	0.01	0.14	11.87	3.90	0.50	99.25	60.80
14		4.3A	52.36	0.09	28.66	0.74	0.02	0.13	12.07	4.39	0.50	98.96	58.57
15		4.4B	52.68	0.09	28.28	0.78	0.02	0.14	11.75	4.41	0.50	98.65	57.82
16		4.5A	53.41	0.08	28.16	0.76	0.01	0.12	11.30	4.68	0.57	99.08	55.28
17	1—4	5.1A	52.66	0.09	28.81	0.69	0.05	0.12	11.95	4.37	0.48	99.21	58.49
18		5.2B	52.79	0.09	28.71	0.62	0.01	0.13	11.66	4.52	0.51	99.04	57.02
19		5.4B	52.64	0.09	29.09	0.71	0.01	0.12	11.96	3.94	0.54	99.10	60.63
20		5.5A	52.61	0.08	28.15	0.80	0.00	0.13	11.27	4.66	0.61	98.32	55.16
21	4	6.2A	53.12	0.11	28.28	0.73	0.01	0.13	11.39	4.43	0.60	98.80	56.60
22		6.2B	52.53	0.09	28.23	0.81	0.01	0.14	11.71	4.24	0.60	98.35	58.27
23		6.3A	52.65	0.08	28.29	0.71	0.00	0.14	11.55	4.29	0.61	98.31	57.65
24		6.3B	52.54	0.09	28.18	0.73	0.03	0.12	11.47	4.49	0.55	98.21	56.65
25		6.4A	52.75	0.08	28.29	0.77	0.02	0.12	11.61	4.28	0.50	98.43	58.18
26		6.5A	52.44	0.09	28.37	0.76	0.01	0.13	11.81	4.23	0.53	98.37	58.78
27		6.5B	52.66	0.10	28.29	0.77	0.01	0.14	11.58	4.17	0.54	98.25	58.57
28	4—1	7.1A	52.79	0.10	28.06	0.79	0.01	0.14	11.35	4.69	0.57	98.48	55.31
29		7.1B	52.32	0.09	28.48	0.82	0.00	0.13	11.82	4.41	0.52	98.59	57.87
30		7.2B	52.80	0.08	28.14	0.75	0.02	0.11	11.37	4.47	0.64	98.37	56.24
31		7.3A	51.86	0.09	28.50	0.72	0.03	0.13	11.89	4.32	0.55	98.08	58.39
32		7.4B	52.44	0.08	28.57	0.69	0.01	0.12	11.79	4.27	0.58	98.55	58.36
33		7.5A	52.96	0.08	28.44	0.80	0.01	0.13	11.54	4.71	0.58	99.25	55.62
34		7.5B	52.90	0.07	28.09	0.79	0.03	0.11	11.32	4.45	0.62	98.38	56.31

Примечание. 1—34 — кристаллы-лапилли плагиоклаза извержений 2013 г. (1—20) и 1976 г. (21—34).

Анализ составов кристаллов-лапиллей плагиоклаза показал, что они отвечают в целом лабрадору. В то же время эти плагиоклазы отчетливо разделяются на две группы. Для одних кристаллов-лапиллей, представляющих большую часть анализов, характерны повышенные содержания K₂O (0.46—0.64 мас. %) и Na₂O (3.9—4.7 мас. %) при относительно невысоких значениях анортитового компонента (55—61). В случае других наблюдается обратная картина с пониженными содержаниями калия (0.26—0.4 мас. %) и натрия (3.2—3.9 мас. %) на фоне существенно более высоких значений An (63-70). Наличие двух групп плагиоклазов в эффузивах влк. Толбачик подтверждается и данными других исследователей (рис. 8). В целом изученные кристаллы-лапилли явно отличаются от плагиоклазов из андезитовых бомб извержения 1976 г. этого вулкана, для которых характерны существенно меньшие значения An и калия. При этом кристаллы-лапилли располагаются фактически на едином тренде с плагиоклазами из

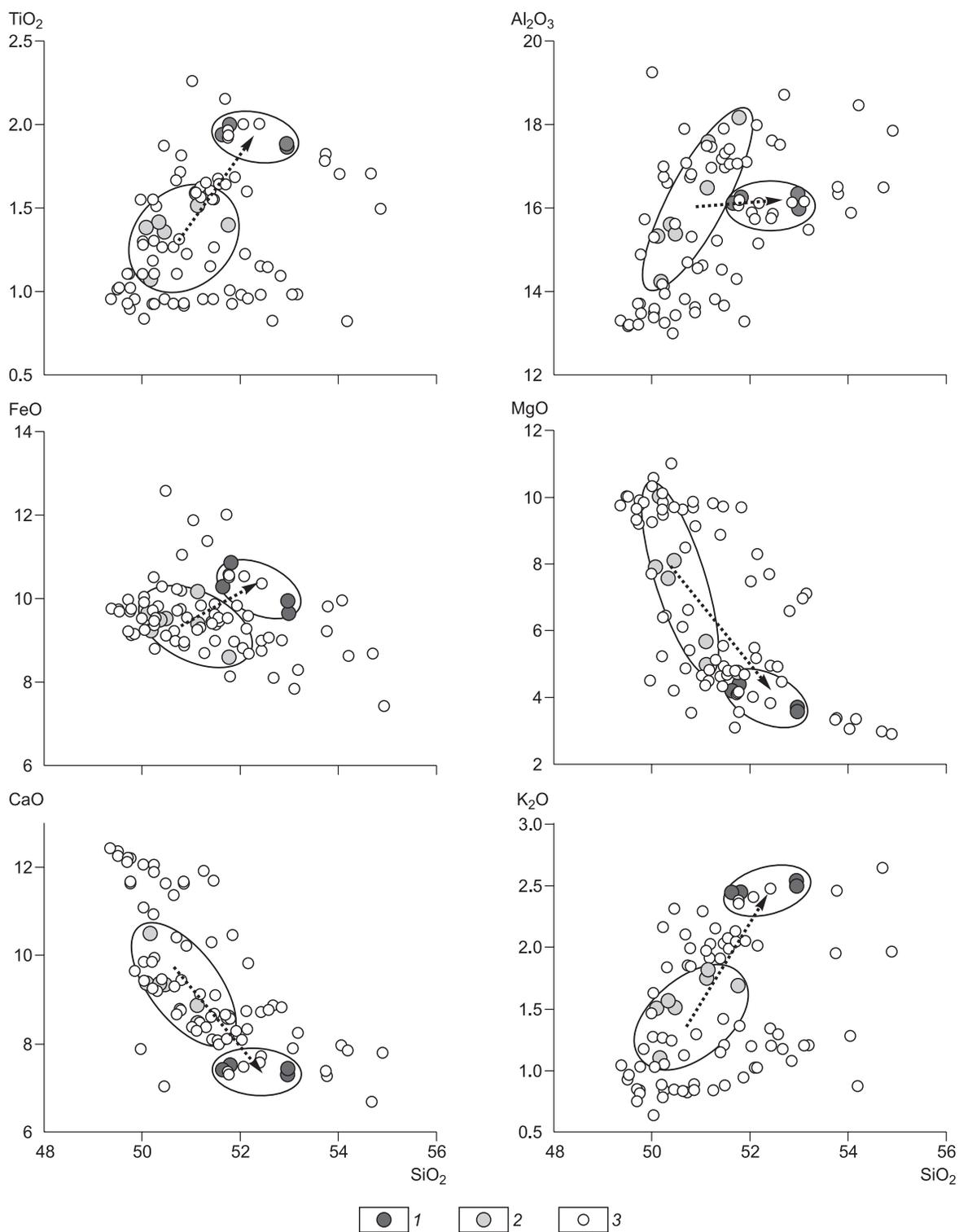


Рис. 6. Вариационные диаграммы (мас. %) для базальтов влк. Толбачик.

1, 2 — авторские анализы стекловатых базальтов извержения 2012—2013 гг. (1) и более ранних извержений (1975—1976 гг., 1941 г. и древнее 1000 лет) (2), проанализированных на летучие компоненты; 3 — данные по эффузивам влк. Толбачик из базы данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>). Тренды эволюции во времени составов изученных на флюидные компоненты базальтов показаны пунктирными линиями.

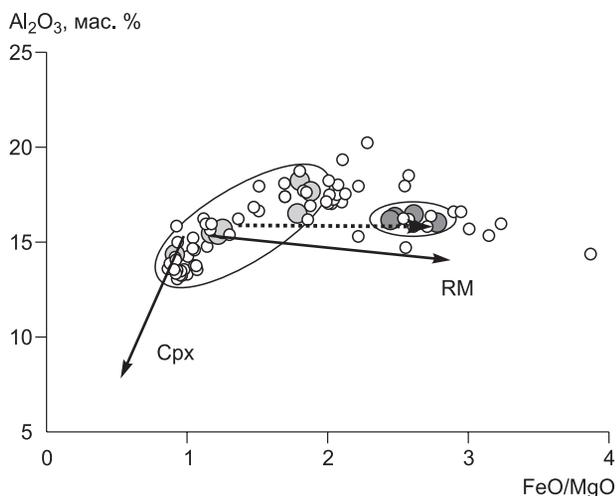


Рис. 7. Диаграмма Al_2O_3 — FeO/MgO для эффузивов влк. Толбачик.

Срх — тренд изменения состава базитовых пород с увеличением в них количества клинопироксена [Симонов и др., 2016], RM — тренд остаточных расплавов при кристаллизации базальтовых систем [Золотухин и др., 2003]. Остальные усл. обозн. см. на рис. 6.

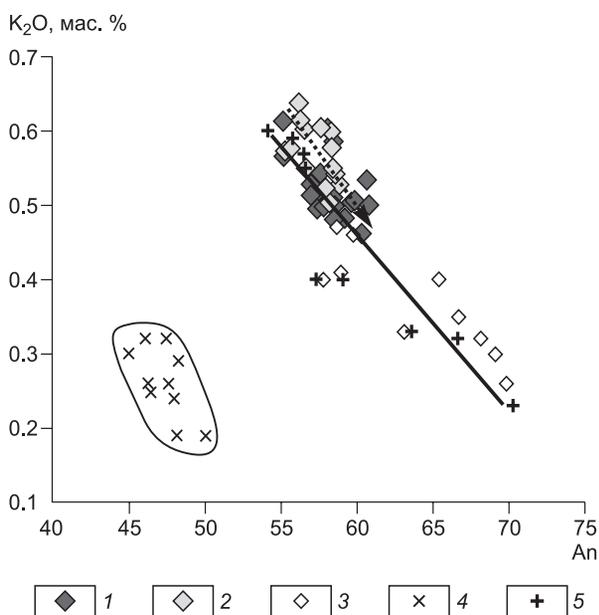


Рис. 8. Зависимость содержания K_2O от значений анортитового компонента в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик.

1, 2 — авторские анализы кристаллов-лапиллей плагиоклаза извержений 2012—2013 гг. (1) и 1975—1976 гг. (2), проанализированных на летучие компоненты; 3 — кристаллы-лапилли плагиоклаза влк. Толбачик извержения 2012—2013 гг. [Добрецов и др., 2016]; 4, 5 — плагиоклаз из андезитов (4) [Добрецов и др., 2016] и из базальтов (5) [Pleschov et al., 2015] влк. Толбачик. Тренд эволюции во времени составов изученных на флюидные компоненты кристаллов-лапиллей показан пунктирной линией, сплошной — тренд изменения составов плагиоклазов из базальтов вулкана.

базальтов влк. Толбачик (см. рис. 8), показывая явную связь своего происхождения с базальтовым типом магматизма.

Для рассмотренных в статье кристаллов-лапиллей влк. Толбачик, входящих в первую более многочисленную группу, устанавливаются закономерные изменения составов на фоне роста значений анортитового компонента. При этом эта же эволюция прослеживается и во времени (при переходе от кристаллов-лапиллей извержения 1975—1976 гг. к извержению 2012—2013 гг.) — падение содержания калия при увеличении значений анортитового компонента (см. рис. 8).

СОСТАВЫ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В БАЗАЛЬТАХ И В КРИСТАЛЛАХ-ЛАПИЛЛЯХ ПЛАГИОКЛАЗА

Для выяснения особенностей поведения летучих компонентов в надсубдукционных расплавах влк. Толбачик с помощью газовой хроматографии были проанализированы образцы стекловатых базальтов и кристаллов-лапиллей плагиоклаза, представляющих последовательную смену извержений начиная с древнее 1000 лет и до 2012—2013 гг. (табл. 3, 4).

В образцах базальтов и кристаллов-лапиллей влк. Толбачик было установлено постоянное присутствие H_2O , CO_2 , CO , CH_4 при практически полном отсутствии H_2 (см. табл. 3, 4). В отдельных пробах определены и другие газы: углеводороды (ацетилен, этан, пентан) и азот. Обращает на себя внимание отсутствие сернистых и хлористых газов, продукты которых отмечались в ходе извержения 2012—2013 гг. [Савельев, 2013]. Хлор, к сожалению, с помощью использованного метода газовой хроматографии не определяется. Сернистые летучие компоненты, полностью ушли из расплава (и, соответственно, из базальтов и плагиоклазов) во время извержения, сформировав минеральные продукты, представленные в основном хлоридами и сульфатами натрия, железа, калия и меди, в меньшей степени гидрохлоридами меди и описанные ранее [Савельев, 2013].

В целом среди установленных для базальтов и кристаллов-лапиллей влк. Толбачик летучих компонентов основную часть занимают вода и углекислый газ. Это хорошо видно при пересчете полученных данных на мольные проценты, показывающие явное преобладание воды — до 92—99 моль. %. Подобная картина (H_2O до 88 моль. %) характерна и для вулканических газов, непосредственно выделяющихся из лавовых потоков влк. Толбачик [Большое..., 1984; Halmer et al., 2002]. В результате на тройной диаграмме С—О—Н (учитывающей все летучие компоненты, включая воду) точки составов трех типов флюидов (извлеченных из базальтов и из кристаллов-лапиллей, а

Таблица 3. Составы летучих компонентов в стекловатых базальтах влк. Толбачик

Год извержения	H ₂ O, мас. %	CO ₂ , г/т	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	H ₂ S/SO ₂	Сумма, см ³ /кг
			об. %						
2013	0.21	252	97.13	1.81	1.06	0.00	0.00	0.00	132.32
2013	0.17	95	78.24	19.48	2.27	0.00	0.00	0.00	61.60
2013	0.18	113	80.29	17.77	1.94	0.00	0.00	0.00	72.03
2013	0.16	252	78.69	19.59	1.71	0.00	0.00	0.00	163.32
1976	0.18	284	74.00	24.57	1.43	0.00	0.00	0.00	195.39
1941	0.21	347	87.78	11.52	0.70	0.00	0.00	0.00	201.32
1941	0.18	252	88.08	10.96	0.96	0.00	0.00	0.00	145.92
1941	0.16	221	86.69	12.33	0.97	0.00	0.00	0.00	129.72
1941	0.18	284	89.26	9.88	0.86	0.00	0.00	0.00	161.99
ДИ	0.23	441	92.93	6.61	0.46	0.00	0.00	0.00	242.03
ДИ	0.27	252	82.75	15.45	1.80	0.00	0.00	0.00	155.32

Примечание. ДИ — древние (более 1000 лет) извержения. H₂S; SO₂ — сернистые соединения.

Таблица 4. Составы летучих компонентов в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик

Год извержения	H ₂ O, мас. %	CO ₂ , г/т	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂	H ₂ S, SO ₂	Сумма, см ³ /кг
			об. %						
2013	0.21	32	63.09	31.42	5.50	0.00	0.00	0.00	25.47
2013	0.19	63	63.09	31.42	5.50	0.00	0.00	0.00	50.93
2013	0.17	28	45.38	50.22	4.39	0.00	0.00	0.00	31.86
2013	0.16	79	53.58	42.69	3.74	0.00	0.00	0.00	74.96
2013	0.16	22	56.67	36.28	7.05	0.00	0.00	0.00	19.85
1976	0.28	191	92.64	3.49	0.00	0.00	3.87	0.00	206.53
1976	0.23	158	70.63	28.14	1.23	0.00	0.00	0.00	113.73

также выделившихся из лавовых потоков) располагаются фактически на стороне O—H в районе отношения этих элементов, типичного для H₂O. При рассмотрении летучих компонентов без учета воды данные по стекловатым базальтам и кристаллам-лапиллям приурочены к стороне C—O (в районе соотношения, близкого к характерному для CO₂). В то же время для вулканических газов, поступающих из лавы и отобранных непосредственно во время извержения [Большое..., 1984; Halmer et al., 2002], устанавливается явное обогащение водородом (табл. 5) с формированием на треугольнике C—O—H тренда от области, близкой к углу H, в сторону базальтов и кристаллов-лапиллей (рис. 9), показывающего фактически изменение состава летучих компонентов в ходе излияния расплавов в приповерхностных условиях и удаления из них части флюида (преимущественно H₂).

Таким образом, среди летучих компонентов влк. Толбачик основную роль играют H₂O и CO₂, поэтому соотношения этих флюидов, а также их взаимосвязи с другими газами и с химическим составом базальтов и кристаллов-лапиллей имеют важное значение для выяснения особенностей эволюции магматических систем.

Таблица 5. Представительные анализы высокотемпературных (920—1050 °C) (об. %) газов, выделявшихся из лавовых потоков во время извержения влк. Толбачик

№ п/п	H ₂	CO ₂	CO	CH ₄	SO ₂	H ₂ S	HCl
1	36.00	47.24	н.д.	н.д.	1.52	2.67	12.57
2	18.53	23.35	1.92	1.78	0.14	0.05	0.98
3	37.43	22.42	3.67	5.78	0.34	0.00	1.16
4	36.56	23.16	3.60	1.44	0.03	0.00	1.61
5	19.09	41.55	2.72	0.76	0.00	0.05	1.41

Примечание. Объемные процентные содержания газов рассчитаны на основе данных, являющихся частью опубликованных ранее таблиц в работах: 1 — [Halmer et al., 2002]; 2—5 — [Большое..., 1984]. н.д. — нет данных.

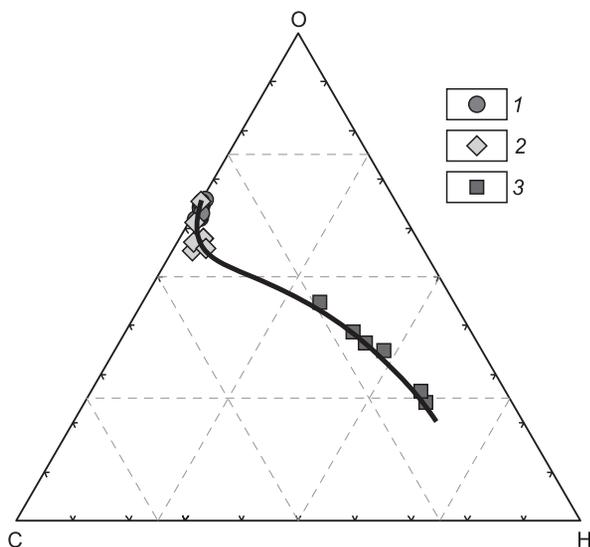


Рис. 9. Составы летучих компонентов влк. Толбачик на тройной диаграмме C—O—H (без учета содержания воды).

1—3 — данные по стекловатым базальтам (1), кристаллам-лапиллям плагиоклаза (2) и по вулканическим газам, выделявшимся непосредственно во время извержений из лавовых потоков (3), [Большое..., 1984; Halmer et al., 2002]. Сплошной линией показан вероятный тренд изменения состава летучих компонентов в расплаве при дегазации преимущественно водорода в приповерхностных условиях.

При этом полученные нами результаты попадают в поле с минимальными значениями летучих компонентов (H_2O и CO_2) в расплавных включениях в оливинах из базальтов Толбачинского вулкана [Plechov et al., 2015] (см. рис. 10). По количеству воды (до 0.23 мас. %) кристаллы-лапилли плагиоклаза близки к базальтам, но содержат существенно меньше углекислого газа (22—191 г/т). В целом видна отчетливая эволюция во времени состава флюида с падением роли CO_2 к продуктам извержения 2012—2013 гг.

Близкая к особенностям распределения CO_2 ситуация установлена для суммы всех газов кроме H_2O (см. рис. 10). Таким образом, в случае рассмотренных эффузивов устанавливается явное истощение обычными для островодужных и океанических расплавов летучими компонентами (прежде всего H_2O и

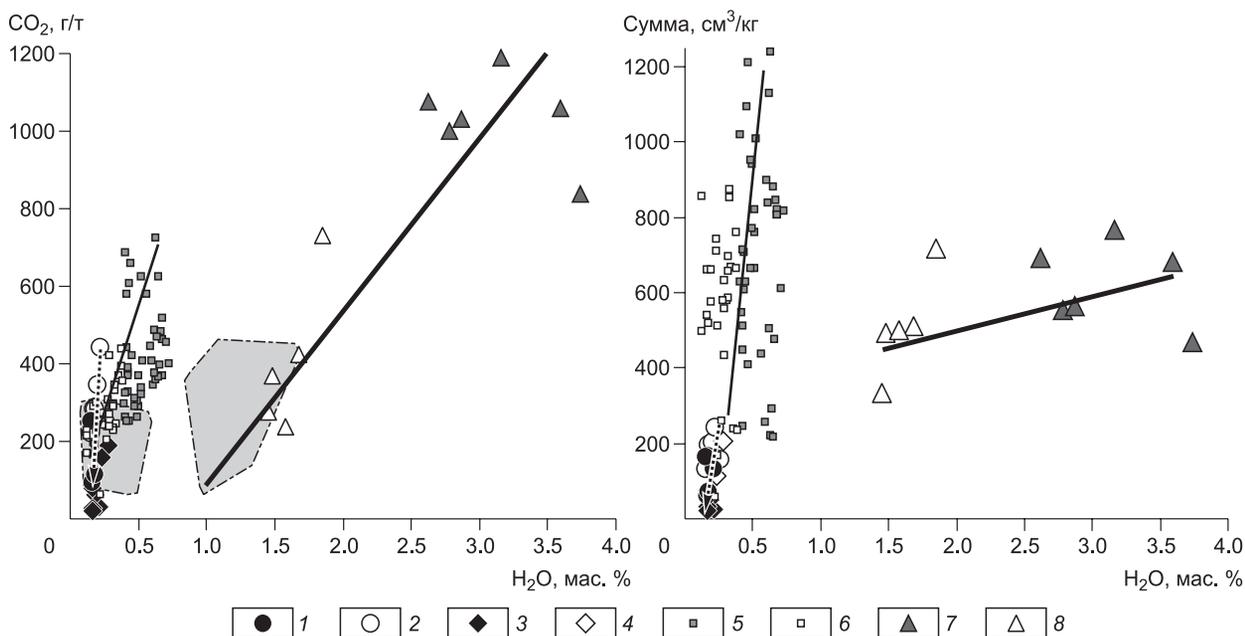


Рис. 10. Зависимость содержаний CO_2 и суммы газов (кроме воды) от количества H_2O в стекловатых базальтах и в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик.

1, 2 — стекловатые базальты извержения 2012—2013 гг. (1), более древних извержений (2) и 3, 4 — кристаллы-лапилли плагиоклаза влк. Толбачик извержений 2012—2013 гг. (3) и 1975—1976 гг. (4); 5—8 — магматические стекла Срединно-Атлантического хребта (5 — обогащенные базальты типа E-MORB, 6 — нормальные базальты типа N-MORB), островных дуг Курильской (7) и Тонга (8) на западе Тихого океана. Тренды эволюции во времени флюидных компонентов влк. Толбачик показаны пунктирными линиями. Серым фоном отмечены поля данных по расплавным включениям в оливинах влк. Толбачик [Plechov et al., 2015]. Сплошные линии — тренды для островных дуг Курильской и Тонга. Рисунок составлен с использованием материалов [Симонов, 1993; Симонов и др., 1999].

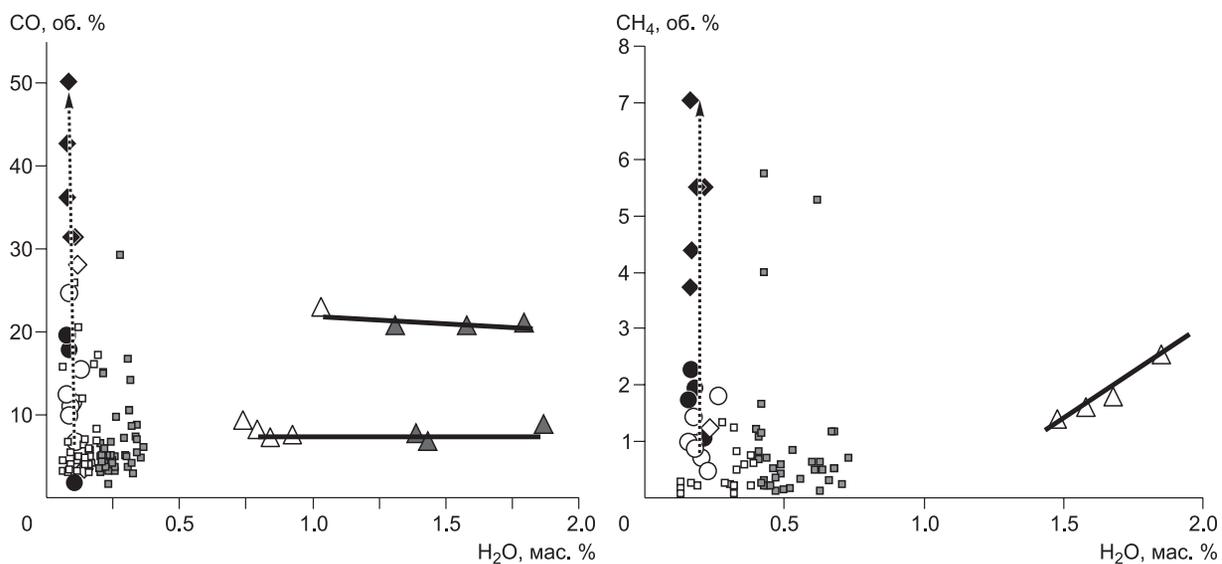


Рис. 11. Зависимость содержаний CO и CH₄ от количества H₂O в стекловатых базальтах и в кристаллах-лапиллях плаггиоклаза влк. Толбачик.

Усл. обозн. см. на рис. 10.

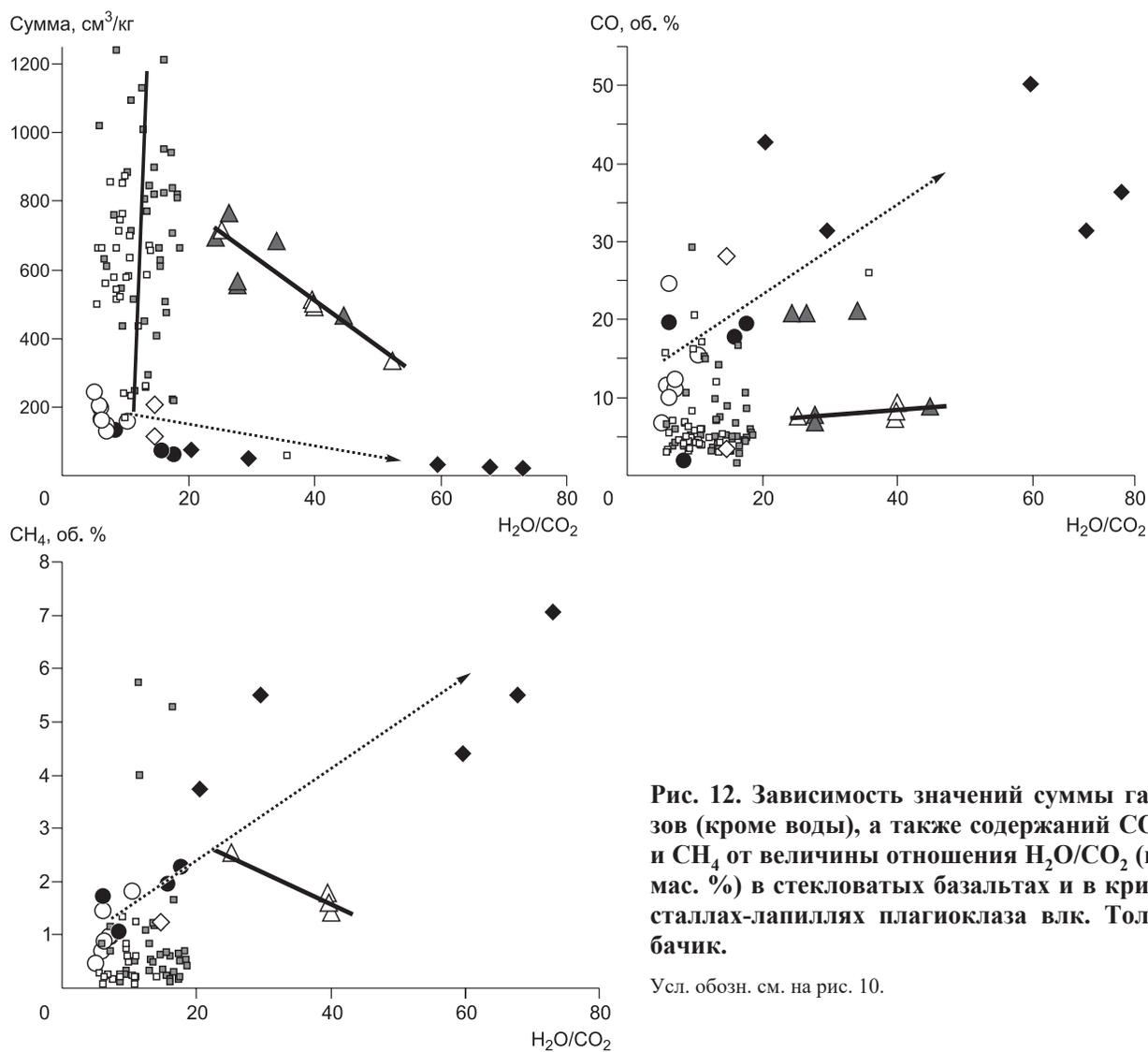


Рис. 12. Зависимость значений суммы газов (кроме воды), а также содержаний CO и CH₄ от величины отношения H₂O/CO₂ (в мас. %) в стекловатых базальтах и в кристаллах-лапиллях плаггиоклаза влк. Толбачик.

Усл. обозн. см. на рис. 10.

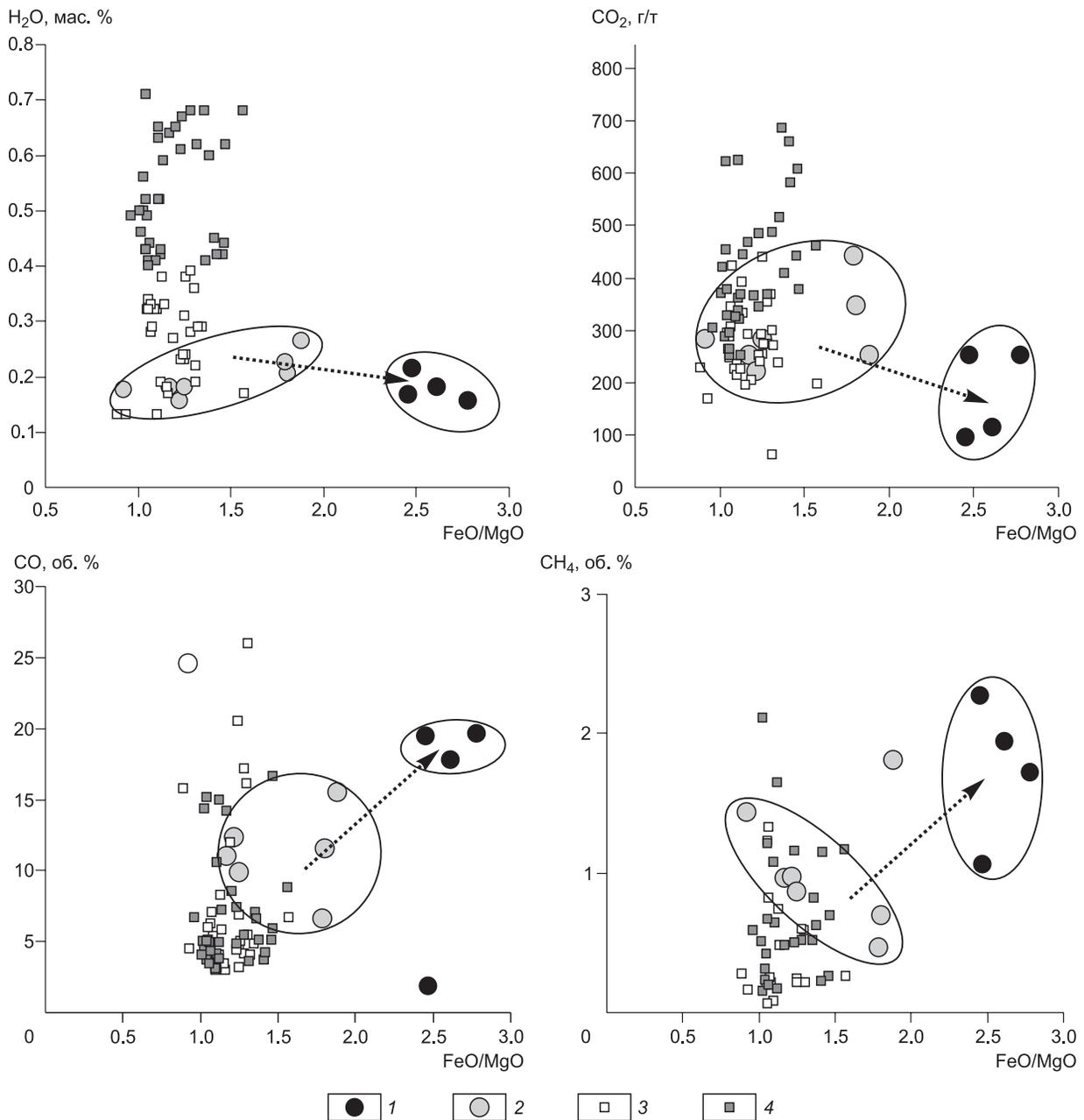


Рис. 13. Вариации содержаний летучих компонентов в стекловатых базальтах влк. Толбачик в зависимости от значений их железистости (FeO/MgO).

1, 2 — стекловатые базальты влк. Толбачик извержения 2012—2013 гг. (1) и более древних извержений (2); 3, 4 — магматические стекла Срединно-Атлантического хребта (3 — базальты типа N-MORB, 4 — базальты типа E-MORB). Тренды эволюции во времени флюидных компонентов в базальтах влк. Толбачик показаны пунктирными линиями.

CO₂), что подтверждает аномальность флюидных систем влк. Толбачик. В связи с этим высокая пористость пород извержения 2012—2013 гг. должна быть связана с накоплением других (не воды и углекислоты) газов. Об этом свидетельствуют минимальные значения H₂O (0.17—0.21 мас. %) и CO₂ (95—252 г/т) в пробах 2012—2013 гг. по сравнению с данными по базальтам других более ранних извержений (см. рис. 10).

Предполагалось [Добрецов и др., 2016] значительное участие восстановленных флюидных компонентов в расплавах влк. Толбачик. Наши исследования стекловатых базальтов этого вулкана показали, что общее количество восстановленных летучих (CO + CH₄ + H₂) существенно меньше, чем в океанических и островодужных стеклах. Это обусловлено тем, что для рассмотренных образцов влк. Толбачик

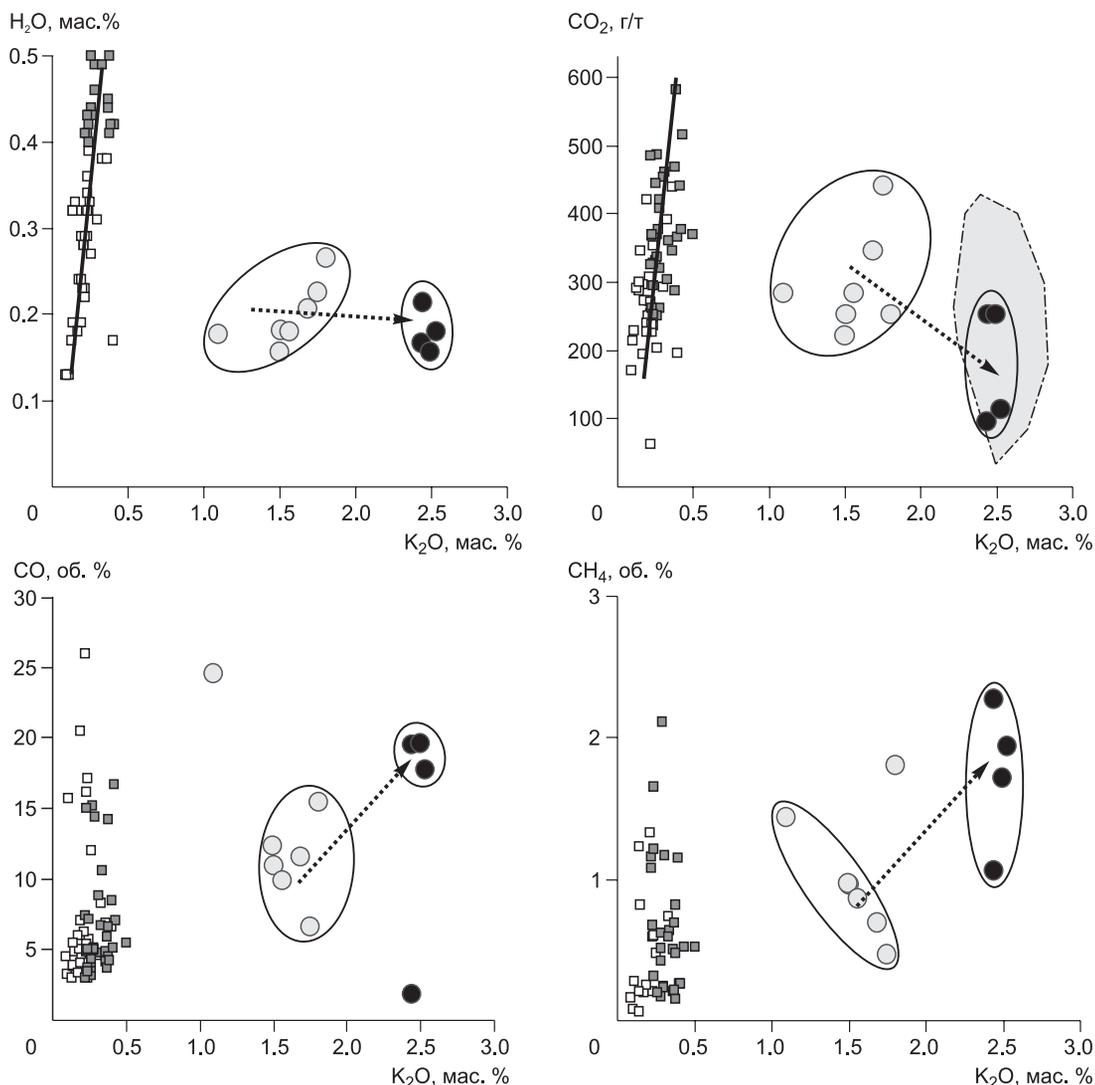


Рис. 14. Вариации содержаний летучих компонентов в стекловатых базальтах влк. Толбачик в зависимости от количества калия.

Серым показано поле летучих компонентов в расплавных включениях в оливине из базальтов влк. Толбачик (по данным [Plechov et al., 2015]). Остальные усл. обозн. см. на рис. 13.

установлено постоянное присутствие CO и CH₄ при практически полном отсутствии H₂, который характерен, в частности, для магматических систем срединно-океанических хребтов [Симонов и др., 1999]. В то же время большое значение имеет не абсолютное количество восстановленных летучих, а относительная роль отдельных компонентов. В частности, эффузивы влк. Толбачик при фактически постоянных минимальных значениях воды показывают широкие вариации содержания CO (базальты — до 25 об. %, кристаллы-лапиллы — до 50 об. %), существенно превышающие показатели для океанических и островодужных стекол (рис. 11). Похожая ситуация определена и для другого восстановленного газа — метана, роль которого (с максимумами до 2.3 об. % в базальтах и до 7 об. % в кристаллах-лапиллах) заметно выше, чем в океанических и островодужных расплавах (см. рис. 11). Для обоих восстановленных летучих компонентов устанавливается прямая корреляция их количества от величины отношения H₂O/CO₂ (рис. 12). При сравнении содержания CO и CH₄ в эффузивах различного возраста видно, что их роль среди летучих компонентов существенно растет во времени (см. рис. 11, 12).

Взаимосвязь летучих компонентов с химическим составом стекловатых базальтов влк. Толбачик хорошо видна на вариационных диаграммах зависимостей содержания флюида от железистости (FeO/MgO) пород и от количества в них калия (рис. 13, 14). На обоих рисунках отчетливо проявлена закономерная эволюция летучих компонентов во времени с падением содержания CO₂ и с увеличением роли

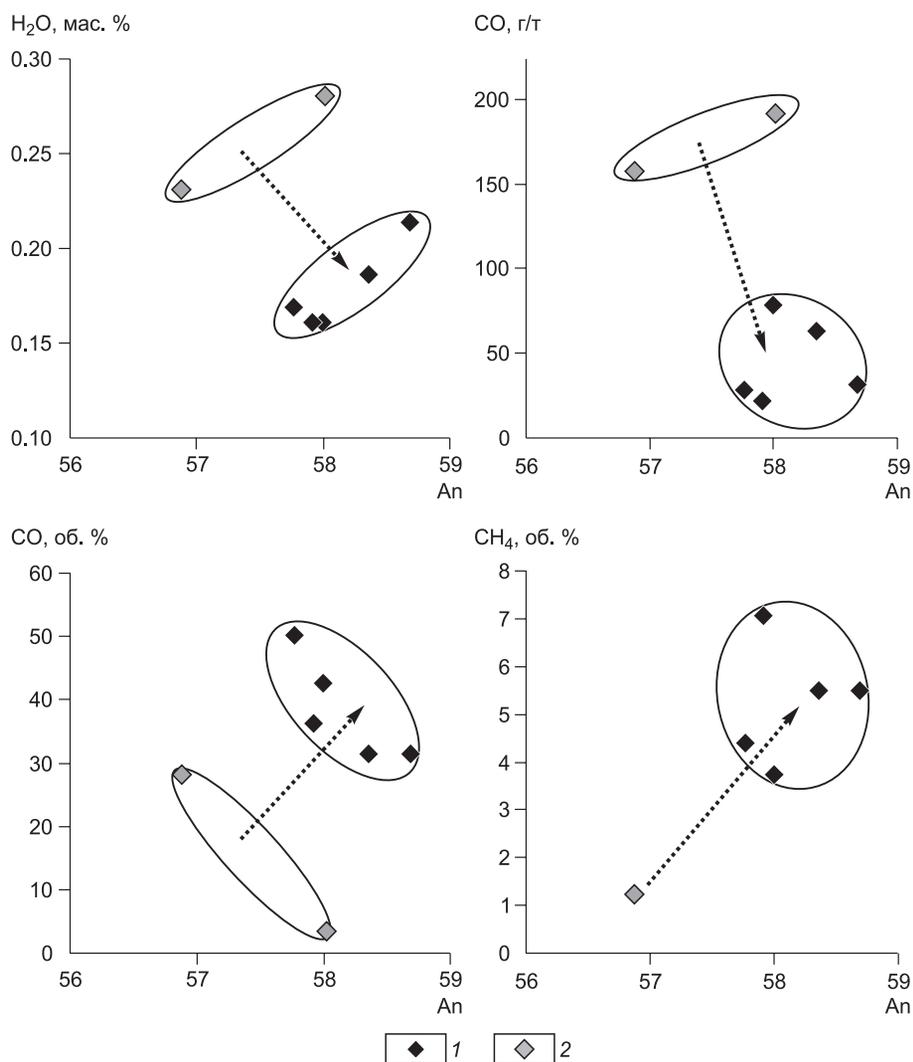


Рис. 15. Вариации содержаний летучих компонентов в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик в зависимости от значений анортитового компонента.

1, 2 — кристаллы-лапилли извержений 2012—2013 гг. (1) и 1975—1976 гг. (2). Тренды эволюции во времени флюидных компонентов в кристаллах-лапиллях показаны пунктирными линиями.

восстановленных газов (CO, CH₄) при переходе от древних базальтов к современным (2012—2013 гг.) на фоне роста значений железистости и калия. При этом необходимо отметить, что увеличение FeO/MgO связано главным образом с резким падением содержаний магния, а не с накоплением железа, количества которого в значительной мере перекрываются (см. рис. 6).

Взаимосвязь летучих компонентов с составом кристаллов-лапиллей влк. Толбачик показана на рис. 15. Видно определенное сходство с выясненными ранее особенностями для стекловатых базальтов. В частности, устанавливается эволюция во времени с падением CO₂ и увеличением роли восстановленных газов (CO, CH₄), которая сопровождается ростом значений анортитового компонента.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Опубликованные ранее данные по летучим компонентам в магмах вулканов Камчатки, основанные главным образом на результатах исследования расплавных включений в минералах, свидетельствуют в целом о значительных содержаниях воды: 2.9—7.1 мас. % [Plank et al., 2013]. Для Ключевского вулкана анализ расплавных включений показал значения H₂O в магмах до 4 мас. % [Portnyagin et al., 2007; Auer et al., 2009; Миронов, Портнягин, 2011]. По данным изучения расплавных включений, в плагиоклазе концентрация воды в базальтовых расплавах Карымского вулкана составила 1.6 мас. % [Нау-

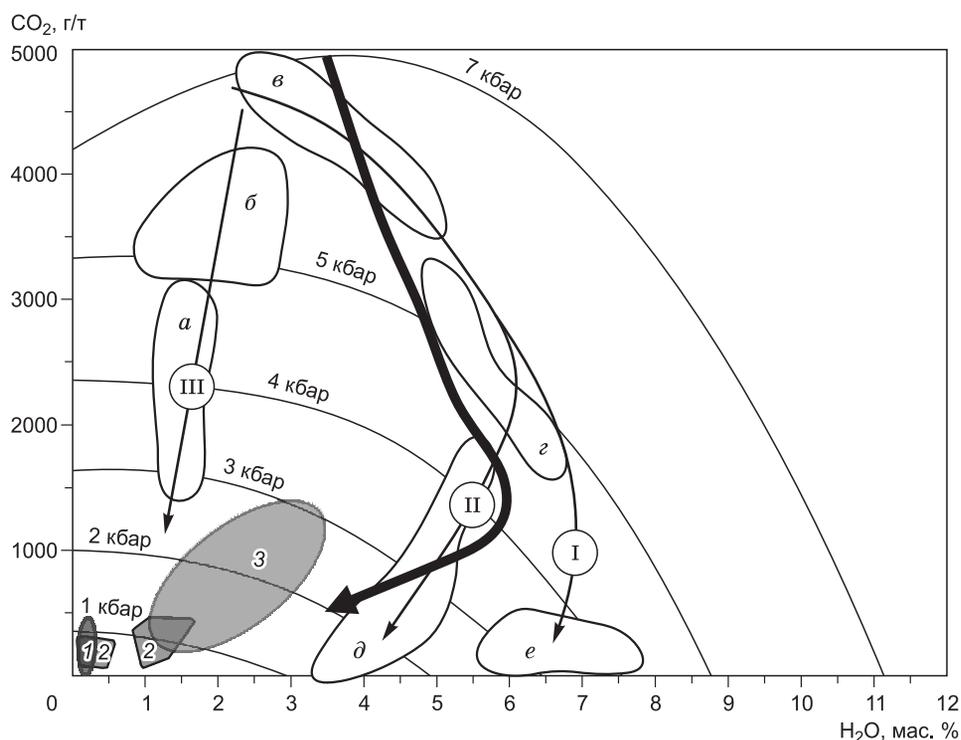


Рис. 16. Соотношение CO_2 — H_2O в магмах вулканов Камчатки.

1—3 — поля данных по содержанию CO_2 и H_2O : базальты и кристаллы-лапиллы плагиоклаза влк. Толбачик (1), данные по расплавленным включениям в оливине извержения 2013 г. влк. Толбачик (2) [Plecho et al., 2015], стекла островных дуг Курильской и Тонга (3). Остальные данные из [Almeev et al., 2013]: содержания воды и углекислоты в магмах различного состава: а, в — двупироксеновые андезиты, б — андезибазальты, г — ортопироксеновые андезиты, д — амфиболовые андезиты, е — дациты; тренды эволюции (I, II, III) летучих компонентов в магмах Безымянного вулкана; жирная стрелка — тренд Ключевского вулкана.

мов и др., 2008]. Особый интерес представляют результаты исследования флюидных компонентов в расплавленных включениях в оливине из базальтов, свидетельствующие о том, что магмы извержения 2012—2013 гг. влк. Толбачик необычайно обеднены водой по сравнению с другими островодужными базальтами, для которых более типичны содержания H_2O от 2 до 6 мас. % [Plecho et al., 2015]. В этой статье показано, что в стеклах расплавленных включений преобладают следующие содержания летучих: 0.1—1.6 мас. % H_2O и 88—445 г/т CO_2 . Причем по соотношениям этих компонентов отчетливо выделяются две группы (0.1—0.5 мас. % H_2O — 88—284 г/т CO_2 и 0.9—1.6 мас. % H_2O — 96—445 г/т CO_2), отмеченные на рис. 10, 16. Учитывая то, что в этом случае изучались стекла в расплавленных включениях в оливине из тефры [Plecho et al., 2015], захваченных минералом преимущественно в эндогенных условиях, опубликованные анализы представляют данные о содержании воды в основном на глубине (вторая группа с H_2O — 0.9—1.6 мас. %) и в меньшей степени на более высоких уровнях (первая группа с H_2O — 0.1—0.5 мас. %). В нашем случае были проанализированы стекловатые базальты, застывшие фактически на поверхности и содержащие остаточные, сохранившиеся по пути к верхним горизонтам летучие компоненты. Соответственно, анализы располагаются в поле с минимальными значениями летучих (см. рис. 10, 16). Таким образом, наши данные о незначительных количествах воды в стекловатых базальтах влк. Толбачик (0.17—0.27 мас. %) по сравнению с островодужными магмами (H_2O — 1.5—3.7 мас. %) (см. рис. 10) хорошо согласуются с информацией, опубликованной в работе [Plecho et al., 2015]. Необходимо отметить, что установленное нами количество углекислоты (95—441 г/т) практически совпадает с преобладающими содержаниями CO_2 в статье [Plecho et al., 2015]. Учитывая то, что CO_2 играет основную роль среди всех газов (кроме H_2O), занимая до 97 об. % (см. табл. 3), совпадающие с нашими данными значения этого компонента, полученные предыдущими исследователями с помощью других методов, подтверждают реальность относительно невысоких содержаний летучих в изученных нами стекловатых базальтах влк. Толбачик (см. рис. 10). Эти сравнительно небольшие содержания газов не противоречат высокой пористости базальтов, так как мы анализировали собственно массивный стекловатый базис, из которого до момента окончательного застывания значительная часть летучих уже выделилась с формированием многочисленных пор и пузырей.

Отмеченное выше сходство наших данных по H_2O и CO_2 в стекловатых базальтах влк. Толбачик с результатами исследования другими методами расплавных включений в оливинах этого же вулкана [Plechov et al., 2015] является независимым свидетельством достоверности полученной нами с помощью высокотемпературной газовой хроматографии информации.

Согласованность и непротиворечивость результатов анализа с помощью высокотемпературной газовой хроматографии магматических стекол с данными других исследователей, использовавших иные методы, отмечалась нами ранее [Симонов, 1993; Simonov et al., 1996; Симонов и др., 1999]. В частности, наши результаты хроматографического анализа по содержанию воды и углекислоты в магматических стеклах зоны разлома $15^{\circ}20'$ (Срединно-Атлантический хребет) [Симонов и др., 1999] тесно ассоциируют с данными по базальтовым стеклам срединно-океанических хребтов [Johnson et al., 1994]. Современные работы, обобщающие громадный объем информации о содержании H_2O и CO_2 в расплавных включениях и в магматических стеклах из базальтов срединно-океанических хребтов [Наумов и др., 2014], также свидетельствуют о сходстве наших результатов изучения стекол методом высокотемпературной газовой хроматографии с имеющимися в мире данными, полученными с помощью разнообразных современных методик.

В случае островодужных структур наши исследования (с использованием хроматографии) показали средние количества воды около 2.65 мас. % в магматических стеклах островных дуг Курильская и Тонга. Эти результаты соответствуют данным других исследователей [Соболев, Данюшевский, 1986; Данюшевский, Соболев, 1987] по содержанию H_2O в расплавах дуги Тонга: 2.3—4.2 мас. %.

Несмотря на отмеченные выше факты, все-таки возникают некоторые вопросы к методу высокотемпературной газовой хроматографии, требующие своего уточнения. Данные вопросы связаны в основном с разными процессами, которые, как предполагается, могут изменить состав летучих компонентов. Прежде всего, это предполагаемые реакции в ампуле при высоких температурах (около 950 — 1000 °C) в ходе анализа на газовом хроматографе. Хотя в последнем используется чистый гелий и масштабные реакции окисления с участием воздушного кислорода невозможны, но взаимодействие между собой выделяющихся из пробы летучих компонентов не исключено. Учитывая, что хроматографический анализ проходит при стандартных условиях, то и влияние его на предполагаемые процессы взаимодействия в ампуле выделяющихся из пробы газов должно сказываться стандартно, одинаково для всех и не может создать какие-либо (и тем более закономерные) вариации составов летучих компонентов, которые отмечались ранее [Симонов, 1993; Симонов и др., 1999] и показаны в данной статье.

Другим фактором, который, как предполагается, может оказать влияние на состав летучих компонентов в базальтовых системах, определяемый с помощью газовой хроматографии, может служить воздействие окружающей среды. Наши эксперименты, показавшие, что при контакте с воздухом достаточно продолжительное время (в пределах суток) базальты сорбируют в себя определенное количество летучих, как бы подтверждают высказанное предположение. Но, как показали последующие эксперименты, эти наложенные вторичные газы удаляются из проб базальтов в ходе хроматографического анализа при нагреве до 400 °C, и в дальнейших построениях мы их не учитываем. Таким образом, воздействие окружающей природной воздушной среды при атмосферном давлении не оказывает влияния на результаты хроматографического анализа. Нет влияния природной среды даже если она обладает экстремальными параметрами. Об этом свидетельствуют результаты изучения магматических стекол, образовавшихся в ходе закалки базальтовых расплавов при давлениях до 400 атм. на дне Атлантического океана. Исследования этих стекол с помощью газовой хроматографии показали, что в одних случаях (обр. 32Д-3, глубина отбора 3550 — 3800 м), несмотря на большое давление воды (360 — 380 атм), система сухая — 0.1 мас. % H_2O . В случае другого образца (обр. 49Д-72, 2800 — 3200 м), отобранного на том же участке, внешнее давление воды значительно меньше (280 — 320 атм), а содержание H_2O в стекле в несколько раз больше — 0.8 мас. % [Симонов и др., 1999]. Приведенные факты, на наш взгляд, убедительно свидетельствуют, что воздействие флюидных компонентов природной среды на изливающийся базальтовый расплав, даже при экстремальных параметрах в подводных условиях, не влияет на результаты хроматографического определения летучих в базальтах. Это связано, прежде всего, с тем, что при контакте расплава с внешней (воздушной или водной) природной средой мгновенно образуется корка закалочного стекла, которая бронирует магматический поток и предохраняет его от дальнейшего воздействия.

Базальтовые потоки при извержении влк. Толбачик взаимодействовали кроме воздуха еще с окружающей растительностью и со снегом. Что касается растительности, то на фотографиях отчетливо видно, как магматический поток надвигается на деревья, которые сохраняют свою зеленую листву и даже не дымятся [Belousov et al., 2015]. Если даже дерево предположительно сгорит, упав на поток, то совершенно непонятно, как дым может проникнуть сквозь закалочную корку стекла во внутреннюю часть потока с температурами более 1000 °C и полностью изменить состав летучих компонентов в магматической системе.

Вопросы взаимодействия магматических потоков влк. Толбачик со снегом рассматриваются в нескольких публикациях [Belousov et al., 2015; Edwards et al., 2015]. В статье [Edwards et al., 2015] приводится фотография, на которой отчетливо видно, как чистый белый нетронутый снег непосредственно контактирует с красной раскаленной магмой. В целом же было выяснено [Belousov et al., 2015], что характер взаимодействия лавы со снегом зависит от способа внедрения магматического потока. Часть потоков идет поверх снега, другие проникают под снегом или внутри снежного покрова. Во всех случаях образуется небольшое количество талой воды и не наблюдается заметных грязевых растворов. Связанные со снегом вторичные фреатомагматические эксплозии на магматических потоках очень слабы и редки [Belousov et al., 2015]. Таким образом, взаимодействие со снегом локально и не сопровождается какими-либо масштабными процессами и, соответственно, не может кардинально изменить состав летучих компонентов внутри базальтовых потоков.

Третьим фактором, влияющим на состав летучих компонентов, предположительно могут послужить реакции внутри потока (очага) магмы, связанные с окислением железа. Это предположение на первый взгляд подтверждается данными на рис. 13, где наблюдается рост количества восстановленных летучих компонентов с повышением железистости. Но увеличение FeO/MgO здесь связано главным образом с резким падением содержаний магния (от 8 до 4 мас. %), а не с накоплением железа, количества которого в значительной мере перекрываются (см. рис. 6). Данный вопрос был рассмотрен на примере фактически эталонных базальтовых стекол Срединно-Атлантического хребта, для которых у нас имеется представительный материал, полученный с помощью газовой хроматографии [Симонов и др., 1999]. На диаграммах $\text{CO}-\text{FeO}$, CH_4-FeO (рис. 17) отчетливо видно, что в рассмотренных стеклах нет прямой зависимости количества восстановленных газов от содержания железа. Таким образом, влияние FeO на состав летучих компонентов не подтверждается. То же самое можно сказать в целом и про стекловатые базальты влк. Толбачик, для которых также отсутствует положительная корреляция CO , CH_4 с FeO (см. рис. 17). Если же ввести фактор времени (разделив базальты по датам извержения влк. Толбачик), то по средним показателям для базальтов извержения 2012—2013 гг. можно отметить в принципе большие количества CO , CH_4 и FeO , чем для пород более древних извержений. При этом необходимо подчеркнуть, что молодые базальты содержат также больше SiO_2 , TiO_2 , Na_2O , K_2O и меньше MgO , CaO , H_2O , CO_2 , чем древние эффузивы. Таким образом, выделяются разные по химическим характеристикам магматические системы, действовавшие в различное время, и железо является только одним из целого ряда критериев отличия расплава. Об этом также свидетельствуют данные по разновозрастным кристаллам-лапиллам плагноклаза, показавшие те же самые изменения составов летучих компонентов при переходе от ранних извержений к событиям 2012—2013 гг.: рост CO , CH_4 и падение H_2O , CO_2 . При этом в плагноклазах железа очень мало (менее 1 мас. %) и содержания его одинаковы в разновозрастных минералах.

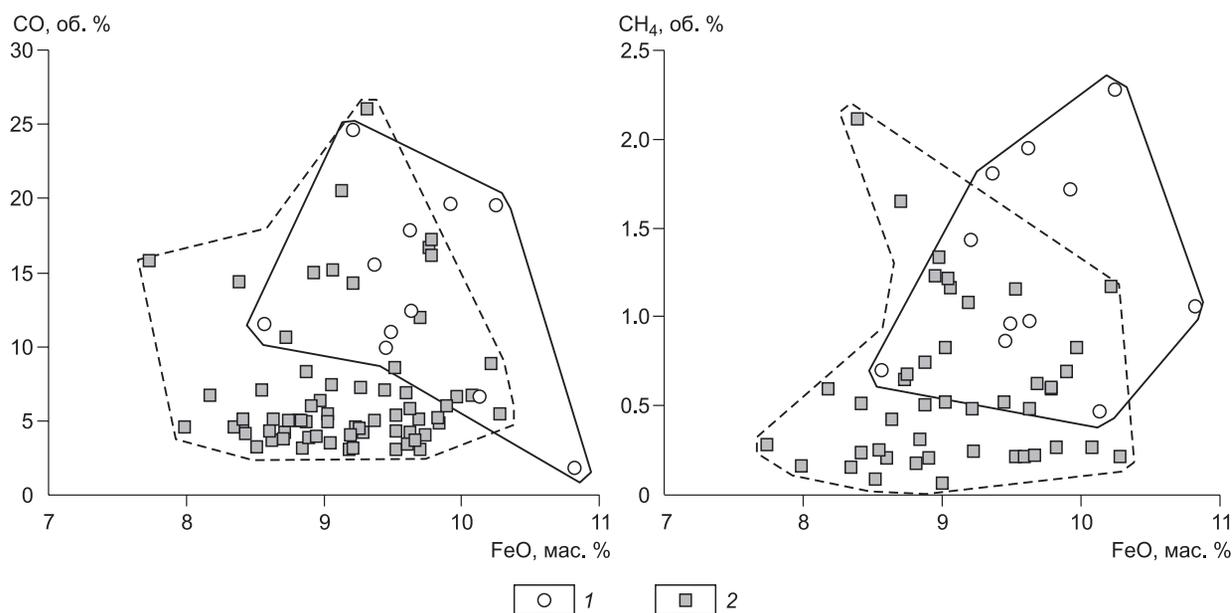


Рис. 17. Соотношения $\text{CO}-\text{FeO}$, CH_4-FeO в стекловатых базальтах влк. Толбачик и в базальтовых стеклах Срединно-Атлантического хребта.

1 — стекловатые базальты влк. Толбачик; 2 — базальтовые стекла района трансформного разлома $15^\circ 20'$, Срединно-Атлантический хребет [Симонов и др., 1999].

В целом, подводя итоги рассмотрения факторов, которые, возможно, могли бы повлиять на результаты высокотемпературной хроматографии, необходимо отметить, что с ее помощью вряд ли можно решить все проблемы, связанные с летучими компонентами в магматических системах, но в результате использования данного анализа мы можем получить вполне достоверную и сопоставимую с другими методами информацию об основных характеристиках летучих компонентов в базальтовых расплавах.

Учитывая «пузыристость» изученных стекловатых базальтов влк. Толбачик, очевидно, что часть летучих компонентов удалялась из еще неостывшей магмы. Это подтверждают прямые наблюдения за потоками лав во время извержения, свидетельствующие об интенсивном выделении вулканических газов в районе выходов лавы из закрытых лавоводов или вблизи окон над лавоводами с образованием фумарольных площадок [Савельев, 2013].

О составе выделяющихся из лавовых потоков газов можно судить по характеру новообразованных минералов (вулканических возгонов), среди которых наиболее распространены хлориды и сульфаты натрия, железа, калия и меди, в меньшей степени присутствуют гидрохлориды меди [Савельев, 2013]. Таким образом, в составе газов, выделяющихся из жидкой магмы в близповерхностных условиях, заметную роль играли хлористые и сернистые соединения.

Хлористые и сернистые соединения отсутствуют в результатах наших хроматографических анализов базальтов и кристаллов-лапилллей влк. Толбачик. Хлор не определяется методом газовой хроматографии. В связи с этим вопрос о его роли остается открытым. Анализ сернистых газов показал их отсутствие (см. табл. 3, 4) в стекловатых базальтах и в кристаллах-лапилллях плагиклаза. В то же время, судя по данным анализа расплавных включений [Plechov et al., 2015], базальтовые расплавы влк. Толбачик на глубине содержали заметные (сотни г/т) количества серы. Такие и даже в сотни раз меньшие количества серы с помощью газовой хроматографии обязательно были бы установлены в стекловатых базальтах, выполняющих потоки на склонах вулкана.

Анализ высокотемпературных (920—1050 °С) газов, непосредственно выделявшихся из лавовых потоков во время извержений влк. Толбачик (см. табл. 5), показал заметное количество сернистых соединений (SO_2 и H_2S).

В целом мы видим присутствие серы в расплавах на глубине и в составе газов, выделяющихся из лавовых потоков. В стекловатой матрице потоков, где и происходила интенсивная дегазация (о чем свидетельствует их пузыристая структура, см. рис. 2), сера фактически отсутствует. Таким образом, дегазирующие пузыристые потоки служили как бы пограничной средой, в которой происходило удаление легкоподвижных компонентов из двигающейся вниз по склонам вулкана застывающей магмы.

В составе газов, выделяющихся при дегазации в приповерхностных условиях жидкой магмы, вполне возможно участие водорода, который отсутствует в результатах хроматографических анализов стекловатых базальтов Толбачика. О полном удалении легкоподвижного водорода из изливающихся потоков по склонам надводных островодужных построек и о сохранении этого летучего компонента в находящихся при повышенном давлении водной толще островодужных расплавах прямо свидетельствуют результаты наших исследований магматических стекол островных дуг Курильской и Тонга [Симонов, 1993]. Хроматографический анализ показал, что в стеклах о. Шикотан (образовавшихся в приповерхностных условиях) нет водорода. В то же время стекла, отобранные в желобе Тонга (под существенным давлением воды), содержат значительное количество водорода (до 50 % от объема всех газов, кроме H_2O).

Особенности анализа водорода в закалочных стеклах с помощью высокотемпературной газовой хроматографии рассмотрены на примере искусственного стекла, выступающего фактически в качестве эталона с практически однокомпонентным составом летучих компонентов. Это стекло было получено при закалке алюмосиликатного расплава, находившегося под давлением чистого водорода. Анализ этого эталонного стекла с помощью высокотемпературной газовой хроматографии показал 96 об. % водорода [Симонов, 1993], т. е. в пределах погрешности метода. Таким образом, если расплавы, содержащие водород, закаливались под давлением, то стекла должны зафиксировать присутствие H_2 , а хроматографический анализ этих стекол, очевидно, покажет реальное количество водорода. Подобную ситуацию мы видим в случае анализа подводных стекол дуги Тонга и Срединно-Атлантического хребта, образовавшихся при закалке расплавов под значительным давлением воды [Симонов, 1993; Симонов и др., 1999]. В то время как в случае изученных базальтов влк. Толбачик внешнее давление фактически отсутствовало и, соответственно, весь легкоподвижный водород мог выделиться из приповерхностных расплавов.

В отличие от водорода, вода, как показали экспериментальные работы со стеклами [Симонов, 1993], хорошо сохраняется в стеклах независимо от давления, существовавшего при закалке расплава. Это подтверждается на примере островодужных стекол (см. рис. 10, 11).

Таким образом, исходя из отмеченного выше, в составе вулканических газов, выделяющихся из магмы и образующих пузыри в изученных нами стекловатых базальтах, могут присутствовать хлористые и сернистые соединения, а также водород.

Эти выводы полностью подтверждаются результатами непосредственных анализов вулканических газов, выделяющихся из базальтовых потоков в ходе извержения влк. Толбачик. Водород занимает до 37.4 % от объема всех высокотемпературных газов (кроме воды), выделяющихся при 920—1050 °С из базальтовых потоков влк. Толбачик (см. табл. 5). Значительную роль также играют хлористые (HCl до 12.6 об. %) и сернистые (H₂S до 2.7 об. %) вулканические газы.

Следует отметить, что приведенные выше данные касаются базальтового типа вулканов, к которым относятся также Ключевской, Камень, Тауншиц и др. Андезитовые вулканы (Безымянный, Зиминая, Шивелуч, Кизимен, Авача и др.), преобладающие на Камчатке, характеризуются иным флюидным режимом.

Первичная магма, рождающаяся в зонах субдукции на глубине 100—120 км при плавлении эклогитизированной океанической коры и метаосадков, должна быть андезитовой, предельно насыщенной водой (т. е. с амфиболом на ликвидусе, так называемые адакиты) [Kogiso et al., 2009; Добрецов и др., 2012, 2015; Almeev et al., 2013]. Об этом же свидетельствуют и геохимические данные (например Ta—Nb минимум, гранатовый тренд редкоземельных элементов).

Базальтовые магмы в глубинных зонах субдукции появляться, скорее всего, не могут. Это большой дискуссионный вопрос. Наиболее вероятнее происхождение субдукционных базальтов [Арискин и др., 1995; Добрецов и др., 2012, 2015] из «гибридной» магмы, образующейся в горячей зоне надсубдукционной мантии на глубинах 50—70 км при взаимодействии поднимающихся андезитовых расплавов (L_{анд.}) ± флюида (F1) с горячими породами мантии S₁ (Ol+Crx+Orx+Sp) [Иванов, 2008; Martin et al., 2005; Добрецов и др., 2012]. Это может быть процесс типа проточного реактора, но главную роль должны играть не флюиды, а андезитовый расплав, определяющий рождение «андезитовой» коры в зонах субдукции. Реакцию в проточном реакторе можно записать в следующем виде: $\rightarrow L_{анд.} \pm F1 + S_1 \rightarrow L_{баз.} + S_2 \rightarrow L_{баз.} \rightarrow L_{анд.}$ и S₃ (Crx, Mt), где S₁, S₂ и S₃ — твердые фазы с образованием в конце базальтового расплава (L_{баз.}), который дифференцируется в промежуточных камерах до андезитового расплава и кумулатов S₃, обогащенных пироксеном (Crx) и магнетитом (Mt) [Иванов, 2008; Добрецов и др., 2015].

Таким образом, есть андезиты I типа (рожденные в зоне субдукции на глубине 100 км, включая адакиты с дацит-риолитовыми дифференциатами) и II типа (продукт дифференциации базальтовых расплавов, как андезитовые бомбы на Толбачике).

Необходима специальная программа исследований флюидов, связанных с андезитовыми расплавами первого типа, особенно андезит-дацитовыми пирокластами и игнибритами, образующими гигантские кальдеры типа Карымской и Узон-Семячинской [Добрецов и др., 2012]. Такая работа уже начата на Курильских островах и ее надо продолжить на примере игнибритов из вулканов Безымянный, Карымский или Уксичанский.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования стекловатых базальтов и кристаллов-лапиллей с помощью высокотемпературной газовой хроматографии свидетельствуют о необычных для надсубдукционных магматических систем особенностях флюидного режима влк. Толбачик. Устанавливается явное истощение преобладающими в островодужных и океанических расплавах летучими компонентами, что подтверждает аномальность флюидных систем Толбачинского вулкана, отмеченную в предыдущих публикациях [Савельев, 2013; Plechov et al., 2015; Добрецов и др., 2016].

2. Стекловатые базальты влк. Толбачик содержат незначительное количество воды (до 0.27 мас. %) и углекислоты (до 440 г/т). Эти результаты хорошо согласуются с данными по летучим компонентам (H₂O и CO₂) в расплавных включениях в оливинах из эффузивов Толбачинского вулкана [Plechov et al., 2015], что является независимым подтверждением достоверности наших результатов.

3. Новые данные по летучим компонентам, содержащимся в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачик, свидетельствуют о минимальных значениях CO₂, а также суммы всех газов (кроме H₂O) и об относительном обогащении восстановленными флюидами (CO, CH₄) по сравнению с базальтами.

4. В целом данные по составам летучих компонентов, содержащихся в стекловатых базальтах и в кристаллах-лапиллях плагиоклаза, показывают изменение составов летучих во времени с увеличением роли восстановленных флюидов (CO, CH₄) и падением количества CO₂ и суммы всех газов (кроме воды) от древних к современным извержениям влк. Толбачик.

5. Установлена закономерная связь характеристик летучих компонентов и химических составов стекловатых базальтов и кристаллов-лапиллей плагиоклаза влк. Толбачик — падение содержания углекислого газа и рост количества восстановленных флюидов (CO и CH₄) при увеличении значений FeO/MgO, K₂O в породах и анортитового компонента в плагиоклазах.

6. Полученные выводы относятся преимущественно к базальтовым вулканам в зонах субдукции. Необходимо в дальнейшем сконцентрировать внимание на изучении флюидного режима андезитовых вулканов, особенно связанных с крупными кальдерными извержениями.

Авторы выражают свою благодарность сотруднику ИВиС ДВО РАН С.А. Чиркову за предоставленные для исследования образцы кристаллов-лапиллей плагиоклаза влк. Толбачик, а также Е.В. Склярору (ИЗК СО РАН) и С.З. Смирнову (ИГМ СО РАН) за многочисленные конструктивные замечания, которые помогли улучшить качество статьи.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 14-17-00430, Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках государственного задания ИГМ СО РАН № 0330-2016-0014.

ЛИТЕРАТУРА

Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсон Р.Л. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // *Петрология*, 1995, т. 3, № 5, с. 42—67.

Большое трещинное Толбачинское извержение 1975—1976 гг. на Камчатке / Ред. С.А. Федотов. М., Наука, 1984, 637 с.

Волынец А.О., Мельников Д.В., Якушев А.И. Первые данные о составе вулканических пород трещинного Толбачинского извержения 2012—2013 г., ИВС-50 // *ДАН*, 2013, т. 452, № 1, с. 953—957.

Данюшевский Л.В., Соболев А.В. Новые данные по петрологии бонинитов Тонга // *Геология и геофизика*, 1987 (12), с. 100—103.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // *Геология и геофизика*, 2012, т. 53 (12), с. 1633—1661.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов К.Д., Кукарина Е.В. Значение геологии, экспериментальной петрологии и сейсмотомографии для комплексной оценки субдукционных процессов // *Геология и геофизика*, 2015, т. 56 (1-2), с. 21—55.

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Кулаков Р.И., Карманов Н.С. Физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах (на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка) // *Геология и геофизика*, 2016, т. 57 (7), с. 1265—1291.

Золотухин В.В., Симонов В.А., Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Васильев Ю.Р. Сравнительный анализ составов континентальных и океанических платобазальтов (данные по Сибирской платформе и плато Онтонг Джава) // *Геология и геофизика*, 2003, т. 44 (12), с. 1339—1348.

Иванов Б.В. Андезиты Камчатки. М., Наука, 2008, 364 с.

Мионов Н.Л., Портнягин М.В. Содержание H_2O и CO_2 в исходных магмах Ключевского вулкана по данным изучения расплавных и флюидных включений в оливине // *Геология и геофизика*, 2011, т. 52 (11), с. 1718—1735.

Наумов В.Б., Толстых М.Л., Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Кононкова Н.Н. Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов Карымского вулканического центра (Камчатка) и вулкана Головнина (о. Кунашир) по данным изучения включений в минералах // *Петрология*, 2008, т. 16, № 1, с. 3—20.

Наумов В.Б., Дорфеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В. Сравнение содержаний петрогенных, летучих и редких элементов в расплавах океанических хребтов по данным изучения включений в минералах и закалочных стекол // *Геохимия*, 2014, № 5, с. 387—405.

Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах (методика, аппаратура, метрология). Новосибирск, 1990, 32 с. (Препринт / ИГиГ СО АН СССР; № 11).

Савельев Д.П. О продолжении трещинного Толбачинского извержения в феврале-марте 2013 г. // *Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. Современные геологические процессы*, 2013, № 1, вып. 21, с. 7—8.

Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.

Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А. Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999, 224 с.

Симонов В.А., Котляров А.В., Ступаков С.И. Условия формирования палеоокеанических базальтовых комплексов Кузнецкого Алатау // *Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения*. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2016, с. 176—178.

Соболев А.В., Данюшевский Л.В. Доказательство магматической природы H_2O и определение ее содержания в остаточном бонинитовом расплаве // *Докл. АН СССР*, 1986, т. 288, № 4, с. 962—965.

Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонгарева Л.Н. Магматическая система Ключевской группы вулканов // *Вулканология и сейсмология*, 2010, № 2, с. 3—35.

Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И. Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменения по данным о расходе магм // *Вулканология и сейсмология*, 2011, № 6, с. 3—20.

Флеров Г.Б., Андреев В.Н., Будников В.А., Цюрупа А.И. Петрология продуктов извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975—1976 гг. М., Наука, 1984, с. 223—284

Almeev R.R., Kimura J. I., Ariskin A.A., Ozerov A.Y. Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2013, v. 263, p. 141—171.

Auer S., Bindeman I., Wallace P.J., Ponomareva V., Portnyagin M. The origin of hydrous, high- $\delta^{18}\text{O}$ voluminous volcanism: diverse oxygen isotope values and high magmatic water contents within the volcanic record of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia // *Contr. Miner. Petrol.*, 2009, v. 157, p. 209—230.

Belousov A., Belousova M., Edvards B., Volynets A., Melnikov D. Overview of the precursors and dynamics of the 2012-2013 basaltic fissure eruption of Tolbachic volcano, Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2015, v. 307, p. 22-37.

Churikov T.G., Gordeychik B.N., Ivanov B.V., Wörner G. Relationship between Kamen Volcano and the Klyuchevskaya group of volcanoes (Kamchatka) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2013, v. 263, p. 3—21.

Edwards B.R., Belousov A., Belousova M., Melnikov D. Observations on lava, snowpack and their interactions during the 2012–13 Tolbachik eruption, Klyuchevskoy Group, Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2015, v. 307, p. 107—119.

Halmer M.M., Schmincke H.U., Graf H.F. The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: a global data set for the past 100 years // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2002, v. 115, p. 511—528.

Johnson M.C., Anderson A.T.Jr., Rutherford M.J. Pre-eruptive volatile contents of magmas // *Volatiles in magmas. Reviews in mineralogy / Eds. M.R. Carrol, J.R. Holloway. Mineral. Soc. Amer. Washington*, 1994, v. 30, p. 281—330.

Kogiso T., Omori S., Maruyama S. Magma genesis beneath Northeast Japan arc: a new perspective on subduction zone magmatism // *Gondwana Res.*, 2009, v. 16, p. 446—457.

Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D. An overview of adakite, tonalite — trondhjemite — granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // *Lithos*, 2005, v. 79, № 1, p. 1—24.

Plank T., Kelley K.A., Zimmer M.M., Hauri E.H., Wallace P.J. Why do mafic arc magmas contain ~4 wt% water on average ? // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013, v. 364, p. 168—179.

Plechov P., Blundy J., Nekrylov N., Melekhova E., Shcherbakov V., Tikhonova M. Petrology and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012-13 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2015, v. 307, p. 182—199.

Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P., Mironov N., Khubunaya S. Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H_2O , S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, v. 255, p. 53—69.

Simonov V.A., Peyve A.A., Kolobov V.Yu., Milosnov A.A., Kovyazin S.V. Magmatic and hydrothermal processes in the Bouvet Triple Junction Region (South Atlantic) // *Terra Nova*, 1996, v. 8, p. 415—424.

*Рекомендована к печати 1 сентября 2016 г.
А.Э. Изохом*

*Поступила в редакцию
25 июля 2016 г.*