

УДК 548.4: 552.11:550.34

## УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР (Камчатка)

В.А. Симонов<sup>1</sup>, А.В. Котляров<sup>1</sup>, А.А. Котов<sup>1</sup>, А.Б. Перепелов<sup>2</sup>, Н.С. Карманов<sup>1</sup>, А.А. Боровиков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

В результате исследования минералов, расплавных включений, а также природных стекол выяснено, что при формировании игнимбритов влк. Хангар участвовали два разных расплава. Первый, охарактеризованный информацией по расплавным включениям во вкрапленниках плагиоклаза и кварца, представляет состояние магмы в глубинном очаге. Другой тип расплава является ответственным за образование стекол и микрокристалликов полевых шпатов во фьямме. Экспериментальные и аналитические исследования расплавных включений показали, что кристаллизация большинства вкрапленников плагиоклаза и кварца из игнимбритов влк. Хангар происходила при температурах 840—960 °С и давлениях до 1.1 кбар из расплава с содержаниями воды до 3.23 мас. % в условиях магматического очага. Наличие сингенетичных первичных расплавных и флюидных включений во вкрапленниках плагиоклаза и кварца из игнимбритов влк. Хангар свидетельствует о фазовой сепарации («вскипании») расплава с массовым образованием микропузырьков CO<sub>2</sub> в магме. Другой тип расплава является вторичным по отношению к собственно магматическим системам влк. Хангар и образуется в результате спекания и плавления туфогенного вулканокластического материала. При участии этого расплава происходило формирование фьямме в рассмотренных игнимбритах. На основе исследования стекол и микрокристалликов полевых шпатов во фьямме установлено, что кристаллизация олигоклаза происходила при температурах 770—840 °С в расплаве между сферулами (с содержанием воды до 2.91 мас. %). Нарастание кристалликов санидина на сферулы шло при более низких температурах — 680—760 °С.

*Игнимбрит, фьямме, расплавные и флюидные включения, PT-параметры кристаллизации минералов, влк. Хангар, Камчатка*

## FORMATION CONDITIONS OF IGNIMBRITES OF THE KHANGAR VOLCANO (Kamchatka)

V.A. Simonov, A.V. Kotlyarov, A.A. Kotov, A.B. Perepelov, N.S. Karmanov, A.A. Borovikov

The study of minerals, melt inclusions, as well as natural glasses showed that two different melts contributed to the formation of ignimbrites of the Khangar Volcano. The first, providing the information on melt inclusions in plagioclase and quartz phenocrysts, represents the state of magma in a deep source. The other type of melt is responsible for the formation of glasses and microcrystals of feldspars in fiamme. Experimental and analytical studies of melt inclusions showed that crystallization of most plagioclase and quartz phenocrysts from ignimbrites of the Khangar Volcano occurred at temperatures of 840–960 °C and pressures up to 1.1 kbar, from the melt with water contents up to 3.23 wt.%, under the conditions of magma chamber. The presence of syngenetic primary melt and fluid inclusions in plagioclase and quartz phenocrysts from ignimbrites of the Khangar Volcano indicates phase separation (“boiling”) of the melt with mass formation of CO<sub>2</sub> microbubbles in magma. The other type of melt is secondary relative to the magmatic systems of the Khangar Volcano and is formed by sintering and melting of tuffogenic volcanoclastic material. This melt contributed to the formation of fiamme in the ignimbrites under consideration. Based on the study of glasses and microcrystals of feldspars in fiamme, it was found that crystallization of oligoclase occurred at temperatures of 770–840 °C in the melt between the spherules (with water content up to 2.91 wt.%). Sanidine crystals grew over spherules at lower temperatures, 680–760 °C.

*Igimbrite, fiamme, melt and fluid inclusions, PT-parameters for crystallization of minerals, Khangar Volcano, Kamchatka*

## ВВЕДЕНИЕ

Игнимбриты привлекают к себе внимание многих исследователей, так как являются индикаторами катастрофических вулканических процессов и представляют собой ключ к расшифровке причин и условий кальдерообразования. В то же время игнимбриты обладают наиболее сложной и до сих пор во многом спорной историей своего формирования по сравнению с большинством вулканогенных пород.

Это связано с тем, что они несут признаки как эндогенных магматических систем, так и следы катастрофических извержений.

В связи с этими характерными особенностями игнимбриты привлекают внимание многочисленных исследователей [Пийп, 1961; Иванов, 1969; Набоко, 1974; Шеймович, 1979; Гриб, Леонов, 1992; Dunbar, Kyle, 1993; Леонов, Гриб, 1998; Bachmann, Bergantz, 2008; Bindeman et al., 2010; Гребенников и др., 2012; Schwartz-Mesa, 2016; Ponomareva et al., 2018; Базанова и др., 2019; Шалаева и др., 2020; Giordano, Cas, 2021; и др.]. Также необходимо отметить, что, несмотря на многочисленные публикации, вопросы генезиса игнимбритов еще далеки от своего окончательного решения. Наиболее перспективным путем выяснения этих проблем, по нашему мнению, является использование данных по расплавленным включениям совместно с петролого-минералогическими методами. Именно такой методический подход был применен при выяснении условий формирования игнимбритов влк. Хангар на Камчатке. При этом необходимо было учитывать, что заметную часть рассмотренных игнимбритов занимает стекло и без изучения природных стекловатых фаз вряд ли возможно получить достаточно полную и достоверную информацию о процессах образования данных пород. В целом основное внимание в наших исследованиях игнимбритов было уделено изучению расплавленных и флюидных включений во вкрапленниках плагиоклаза и кварца из основной массы, а также анализу стекол и полевых шпатов из фьямме.

Необходимо отметить, что подобные исследования (с широким использованием данных по расплавленным включениям в минералах) проводились ранее авторами статьи при выяснении условий формирования вулканических комплексов Курило-Камчатской островной дуги [Добрецов и др., 2016, 2017, 2019; Симонов, Котляров, 2016; Смирнов и др., 2018; Smirnov et al., 2019; Котов и др., 2021; Симонов и др., 2021].

В исследованиях игнимбритов Камчатки активное участие принимал академик Николай Леонтьевич Добрецов, что позволило не только успешно провести научно-исследовательские работы, но и получить новые данные об условиях формирования этих важных объектов. К глубокому сожалению, завершающие этапы изучения игнимбритов мы вынуждены были проводить без Николая Леонтьевича. Несмотря на это, мы постарались выполнить все ранее намеченное и подготовить статью, которую посвящаем светлой памяти уважаемого Николая Леонтьевича Добрецова.

Основой статьи послужили результаты исследования игнимбритов влк. Хангар, располагающегося в южной части Срединного хребта Камчатки. Следует подчеркнуть, что целью наших исследований было определение составов расплавов, а также *PT*-параметров, при которых они принимали участие в образовании игнимбритов.

Для решения поставленных задач основное внимание было уделено исследованию вкрапленников и первичных расплавленных и флюидных включений в минералах, а также анализу стекол и полевых шпатов из фьямме игнимбритов влк. Хангар.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе изучения игнимбритов влк. Хангар были просмотрены шлифы и тонкие (0.2 мм) полированные с обеих сторон пластинки для выяснения петрографических особенностей, определения минерального состава пород и поиска расплавленных и флюидных включений в минералах.

Содержания порообразующих оксидов в эффузивных породах влк. Хангар определены на многоканальном X-Ray спектрометре СРМ-25 (ЗАО «Научприбор», Орел, Россия) в ИГХ СО РАН (г. Иркутск) [Перепелов, 2014].

Составы расплавов, принимавших участие в формировании игнимбритов влк. Хангар, оценивались на основе анализов гомогенных стекол во включениях из вкрапленников плагиоклаза и кварца, а также в результате изучения стекол во фьямме.

Экспериментальные исследования расплавленных включений в минералах из игнимбритов вулкана выполнены в лаборатории геодинамики и магматизма ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. Использовался метод гомогенизации, основанный на классических работах, посвященных расплавленным включениям [Бакуменко и др., 1967; Бакуменко, Добрецов, 1976; Соболев и др., 1976; Ермаков, Долгов, 1979; Бакуменко, 1986; и др.]. Эксперименты по гомогенизации расплавленных включений при высоких температурах проводились в микротермокамере с инертной средой [Соболев, Слуцкий, 1984] с применением опубликованных методик [Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994; и др.]. Учитывая то, что при высоких температурах некоторые включения фактически уничтожаются, опыты проводились с препаратами, содержащими в одном зерне минерала несколько (3—5 штук и более) включений. Особое внимание уделялось времени эксперимента. В частности, при проведении высокотемпературных опытов с расплавленными включениями во вкрапленниках из игнимбритов необходимо было принимать во внимание кислый состав этих пород (соответственно, ожидалась повышенная вязкость расплавов). В связи с этим были проведены специальные эксперименты с продолжительными выдержками (до 3.5 ч) при температурах (800—1050 °C), результаты которых детально описаны в разделе про расплавленные включения.

Экспериментальные исследования флюидных включений в минералах из игнимбритов влк. Хангар проводились методом криометрии [Ермаков, Долгов, 1979] в ИГМ СО РАН с использованием микротермокамеры THMSG-600 фирмы Linkam (Великобритания), управляемой компьютером, и микроскопа Olympus B51, снабженного набором длиннофокусных объективов и видеокамерой. Анализ методом криометрии флюидных включений, сингенетичных первичным расплавленным включениям во вкрапленниках плагиоклаза, позволил определить плотность  $\text{CO}_2$ .

Химические составы расплавленных включений во вкрапленниках, стекол во фьямме, а также минералов определены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН).

Вкрапленники полевого шпата из игнимбрита влк. Хангар анализировали электронно-зондовым методом с помощью микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe, а также изучали на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro. В качестве образцов сравнения использован набор надежно охарактеризованных однородных природных минералов (ортоклаз, альбит, ильменит, диопсид, гранаты и т. д.) и синтетических стекол [Королук и др., 2008; и др.].

Значительный объем информации по составам стекол во фьямме, стекол расплавленных включений во вкрапленниках и полевых шпатов получен на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа Aztec Energy XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и живом времени набора спектров 20—30 с. В качестве образцов сравнения использованы минералы и чистые элементы из блока MAC-55 (Microanalysis Consultant, Ltd.). При данных условиях анализа случайная погрешность определения основных компонентов ( $C \geq 10$  мас. %) не превышает 1 отн. %. Погрешность определения компонентов с концентрациями 1—10 мас. % лежит в диапазоне 2—6 отн. % и обычно не превышает 10 отн. %. При концентрациях вблизи предела обнаружения (0.2—0.3 мас. %) погрешность может достигать величины 20 отн. % [Лаврентьев и др., 2015]. Часть анализов (исполнитель А.А. Котов) выполнена с временем набора спектров 60 с, при этом нижняя граница определяемых содержаний снижалась примерно в два раза. Для исключения влияния на качество анализа микрорельефа образца, а также для снижения дрейфа интенсивности характеристического рентгеновского излучения под воздействием электронного пучка исследование осуществлялось в режиме малого растра с размером сканируемой площади не менее  $3 \times 3$  мкм.

Метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР-спектроскопии) использовался для изучения составов газовых пузырьков флюидных и расплавленных включений, а также стекол расплавленных включений и природных стекол фьямме. Работы проводились на Раман-спектрометре Horiba LabRam 800HR, оборудованном конфокальным микроскопом Olympus BX-41. Для возбуждения применяли лазер с длиной волны 532 нм и выходной мощностью 50 мВт. Анализ рассеянного излучения производился в геометрии обратного рассеивания с помощью объектива  $\times 100$  с высокой числовой апертурой. Калибровка спектрометра производилась по линии кремния  $520.7 \text{ см}^{-1}$ .

Содержание воды в стеклах фьямме и расплавленных включений определяли методом КР-спектроскопии в соответствии с опубликованной ранее методикой [Kotov et al., 2021]. Спектры стекол снимались в диапазонах 850—1200 и 2900—3800  $\text{см}^{-1}$ . Использовалось отношение суммарной площади пиков в области 2900—3800  $\text{см}^{-1}$  к суммарной площади пиков в области 850—1200  $\text{см}^{-1}$ . Применение такого подхода наилучшим образом подходит для включений в кварце и плагиоклазе [Kotov et al., 2021].

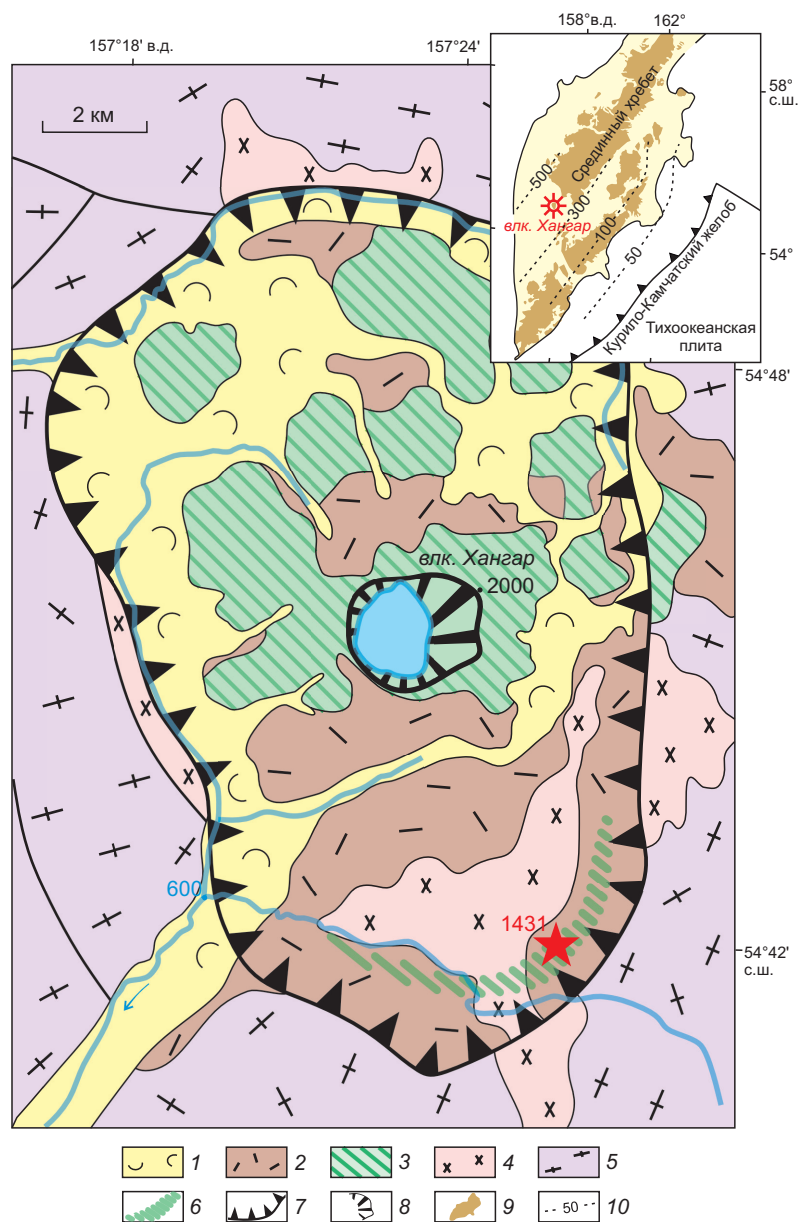
Для уточнения и верификации полученных с помощью этого метода данных применялось сочетание КР-спектроскопии и энергодисперсионного метода рентгеноспектрального микроанализа (РСМА), согласно методике, описанной в работе [Kotov et al., 2021]. Нами использованы только те содержания воды в стеклах, которые согласуются по данным КР-спектроскопии и РСМА.

Температуры образования вкрапленников плагиоклаза и кристалликов полевых шпатов во фьямме были рассчитаны на основе данных по составам плагиоклазов, расплавленных включений и стекол во фьямме по геотермометрам [Putirka, 2008]. Подобный методический подход для выяснения условий формирования магматических комплексов путем расчетного моделирования на основе составов расплавленных включений в минералах с помощью известных программ был применен нами ранее [Добрецов и др., 2019; Симонов и др., 2021, 2022].

Опираясь на результаты определения содержаний воды в стеклах расплавленных включений, а также на состав сингенетичных флюидных включений, нами было оценено давление насыщения расплава водой и  $\text{CO}_2$  на основе модели [Rapale et al., 2006]. Доли летучих компонентов получены путем измерения объемных соотношений газовой и жидкой фаз во флюидных включениях и их плотностей (0.076—0.078 г/см<sup>3</sup> для  $\text{CO}_2$  и 1.0 г/см<sup>3</sup> для воды).

## ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР

Вулкан Хангар ( $54.756^\circ$  с.ш.,  $157.37^\circ$  в.д.) расположен в южной части Срединного хребта Камчатки и относится к Срединному вулканическому поясу. В настоящее время он считается потенциально действующим вулканом, переживающим состояние относительного покоя. Современный конус вулкана



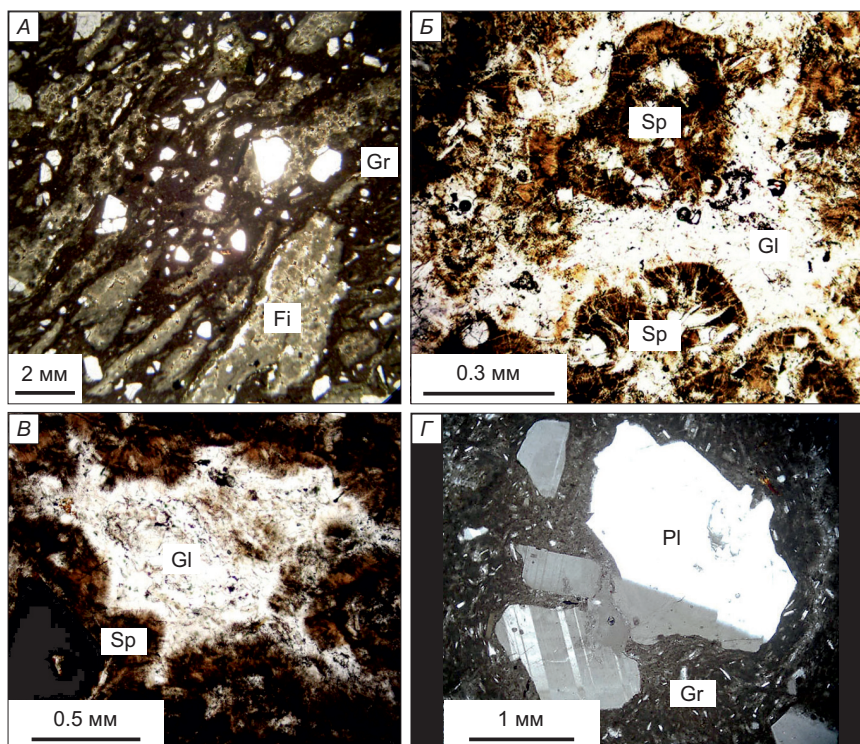
**Рис. 1. Строение влк. Хангар, по [Мелекесцев и др., 1996; Государственная..., 2010; Певзнер, 2015] с изменениями авторов.**

На врезке схема неоген-четвертичных вулканических поясов Камчатки. 1 — пирокластические потоки субкальдерного извержения с возрастом  $7872 \pm 50$  л. н. [Cook et al., 2018]; 2 — позднелайстоцен-голоценовые ( $Q_3$ — $Q_4$ ) базальты, андезиты, дациты, риолиты, туфы дацитов и андезитов, игнимбриды; 3 — среднелайстоцен-голоценовые ( $Q_2$ — $Q_3$ ) экструзии андезитов, дацитов, риолитов, дайки андезитов; 4 — миоценовые ( $N_1$ ) гранодиориты, диориты, диорит-порфиры; 5 — палеозой-мезозойские гранитно-метаморфические комплексы (гнейсограниты, амфиболовые плагиогнейсы, амфиболиты, кварциты); 6 — область развития игнимбридов; 7 — границы вулканотектонической депрессии Хангарского вулканического центра; 8 — уступ вершинной кальдеры; на врезке: 9 — неоген-четвертичные вулканические комплексы; 10 — глубина залегания сейсмолокальной плоскости (м). Звезда — место отбора изученного образца игнимбрита.

расположен в центре котловины диаметром до 8 км — на месте разрушенного древнего (среднелайстоценового) щитообразного вулкана. Вершину молодого конуса влк. Хангар (Молодой Хангар) венчает кратер, образовавшийся  $7872 \pm 50$  л. н. [Cook et al., 2018] в результате субкальдерного извержения, одного из самых мощных на Камчатке. В настоящее время он заполнен водой и образует озеро глубиной 150 м (рис. 1).

Покров, из которого отобран образец изученного игнимбрита (1431), располагается в юго-восточном секторе влк. Хангар в области развития игнимбридов (см. рис. 1) и перекрывается андезитами начальной стадии формирования Молодого Хангара.





**Рис. 2. Внутреннее строение игнимбрита влк. Хангар.**

*A* — общая структура игнимбрита, *Fi* — фьямме, *Gr* — основная туфогенная масса; *Б* — внутреннее строение фьямме, *Sp* — сферулы, *Gl* — светлое стекло между сферулами; *Б* — замкнутый объем, ограниченный сферулами и заполненный светлым стеклом; *Г* — вкрапленники плагиоклаза (*Pl*) в основной туфогенной массе (*Gr*) игнимбрита. Вид в проходящем свете.

*Петрографические особенности игнимбрита влк. Хангар.* Образец 1431 состоит из темной микророзернистой спекшейся основной туфогенной массы, содержащей вкрапленники минералов и фьямме.

На рисунке 2, *A* отчетливо видна ориентированная структура, образованная формой и расположением вытянутых фьямме. При этом основная туфогенная масса показывает однородное строение с равномерно хаотичным распределением вкрапленников плагиоклаза и кварца, что свидетельствует об ее формировании в основном путем простого спекания, в отличие от фьямме, удлиненные формы которых вытянуты в одном направлении, что может говорить о течении при высоких температурах вследствие переплавления пирокластического материала непосредственно в ходе его спекания.

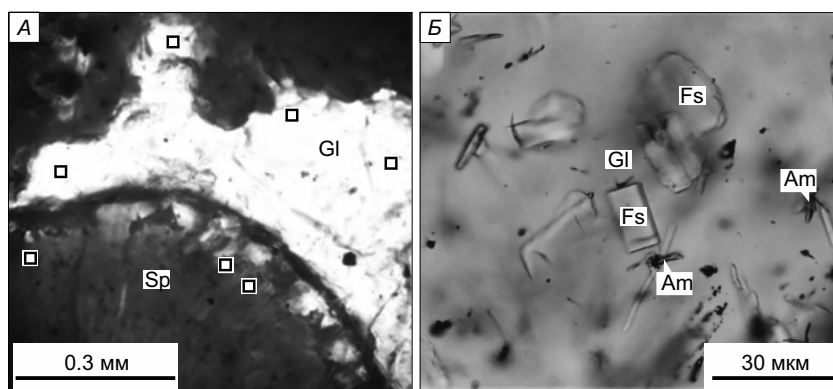
Фьямме игнимбрита вулкана имеют довольно сложное строение и их основной объем занимают сферулы (диаметром до 0.5 мм), между которыми располагается светлое неизмененное стекло (см. рис. 2, *Б*). Наблюдаются замкнутые объемы со стенками из сросшихся сферул, заполненные светлым стеклом (см. рис. 2, *Б*). На сферулы могут нарастать кристаллиты полевого шпата.

В основной массе игнимбрита кроме фьямме широко представлены вкрапленники плагиоклаза (см. рис. 2, *Г*) и в меньшей степени кварца.

Детальные исследования фьямме показали, что в большинстве случаев сферулы контактируют со светлым стеклом (*Gl*, см. рис. 2, *Б*; 3, *A*). Внутренние части сферул (*Sp*) сложены темной полупрозрачной стеклоподобной аморфной массой, в которой располагаются ограниченные микрокристаллики амфибола и биотита (рис. 4, *A*), по своим формам практически аналогичные кристаллитам в светлом стекле между сферулами (см. рис. 4, *Б*). Эти данные говорят о процессах свободной кристаллизации амфибола и биотита в пространстве внутри и между сферулами.

О стеклоподобном состоянии темной массы сферул, как будет показано далее, свидетельствуют и результаты КР-спектроскопии. Точки анализов этим методом внутри сферул и во вмещающем светлом стекле показаны на рис. 3, *A*. Вблизи границ сферул в них наблюдаются более светлые участки.

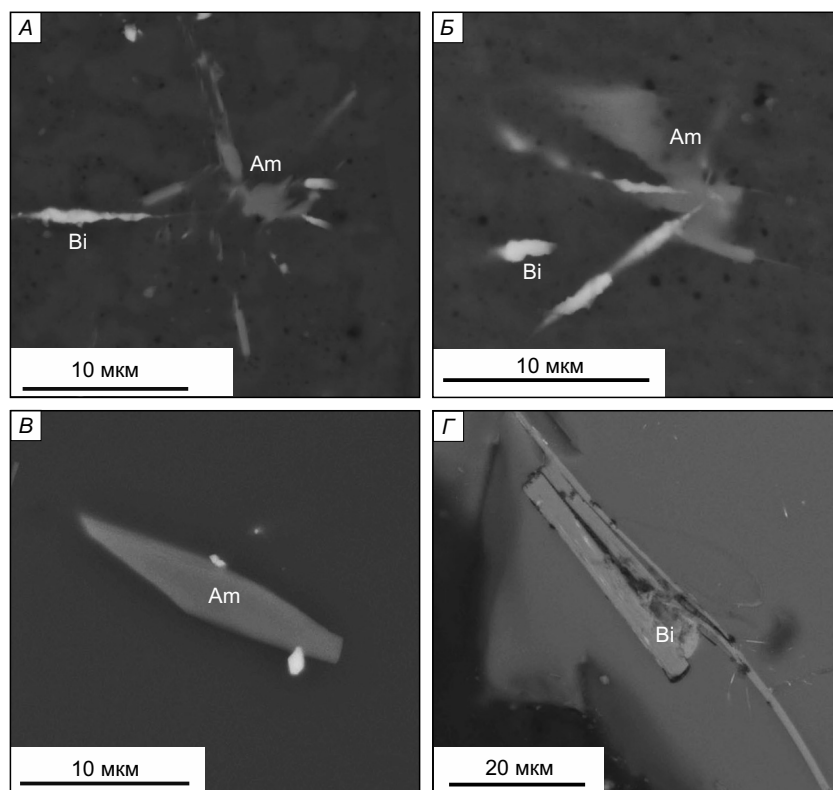
Светлое прозрачное стекло, занимающее пространство между сферулами, содержит (как отмечено выше) новообразованные кристаллические фазы (см. рис. 3, *Б*; 4, *Б—Г*). Судя по морфологии (а также, как будет показано далее, по своему химическому составу), большая часть прямоугольных кристалликов представляет собой полевые шпаты (см. рис. 3, *Б*). Здесь же присутствуют сrostки удлиненных кристаллитов (см. рис. 3, *Б*; 4, *Б*) и отдельные ограниченные кристаллики (см. рис. 4, *Б*, *Г*), близкие по своему составу и кристаллическим формам к амфиболам (*Б*) и реже имеющие сходство с биотитом (*Г*).



**Рис. 3. Сферулы и светлое стекло между ними во фьямме игнимбрита влк. Хангар.**

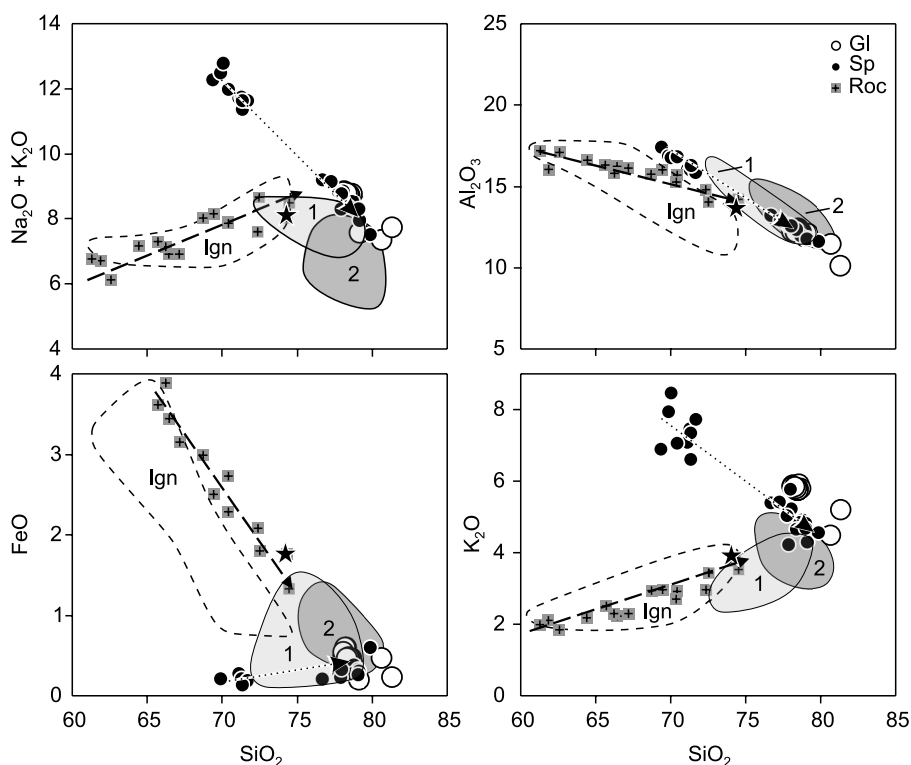
*A* — общий вид сферулы на контакте со светлым стеклом; *Б* — светлое стекло между сферулами (Gl), содержащее микрокристаллиты полевого шпата (Fs) и амфибола (Am), Sp — темная стеклоподобная аморфная масса внутри сферулы. Вид в проходящем свете. Квадратами показаны точки анализа с помощью КР-спектроскопии.

*Петрохимические особенности игнимбрита влк. Хангар.* Рассмотренные в ходе подготовки статьи эффузивы вулкана представляют ряд пород от андезитов до риолитов, попадающих на вариационных диаграммах в поля игнимбритов и образующих закономерные тренды накопления щелочей и падения содержаний таких компонентов, как алюминий и железо на фоне роста кремнезема (рис. 5). Изученные нами игнимбриты влк. Хангар характеризуются максимальными содержаниями  $\text{SiO}_2$  и соответствуют по этому показателю риолитам (см. дополнительные материалы, table 1, [https://sibran.ru/journals/Suppl\\_Simonov.pdf](https://sibran.ru/journals/Suppl_Simonov.pdf)).



**Рис. 4. Кристаллики амфибола и биотита во фьямме игнимбрита влк. Хангар.**

*A* — темная стеклоподобная аморфная масса внутри сферулы; *Б–Г* — светлое стекло между сферулами. Вид в отраженных электронах. Am, Bi — кристаллиты, имеющие сходство по химическому составу с амфиболом (Am) и биотитом (Bi).



**Рис. 5. Составы (мас. %) эффузивных пород и стекол из фьямме игнимбрита влк. Хангар.**

Gl — светлое прозрачное стекло между сферами во фьямме, Sp — стеклоподобная аморфная масса внутри сфер фьямме, Roc — эффузивы влк. Хангар, Ign — поле составов игнимбритов Карымской кольцевой структуры, Камчатка. Поля преобладающих составов природных стекол влк. Хангар из тефры и туфов (1), а также из природно-закаленных стекловатых расплавных включений и основной массы тефры (2). Звезда — рассмотренный нами игнимбрит влк. Хангар. Пунктирная стрелка — эволюция составов природных стекол фьямме, штриховая — эволюция составов эффузивов. Составы пород и стекол пересчитаны на 100 %. Рисунок создан на основе оригинальных данных. При построении полей использованы материалы из работ: Ign — [Иванов, 2008], 1 — [Portnyagin et al., 2020], 2 — [Толстых и др., 2021].

#### СОСТАВЫ СТЕКОЛ И СФЕРУЛ ИЗ ФЬЯММЕ В ИГНИМБРИТЕ ВУЛКАНА ХАНГАР

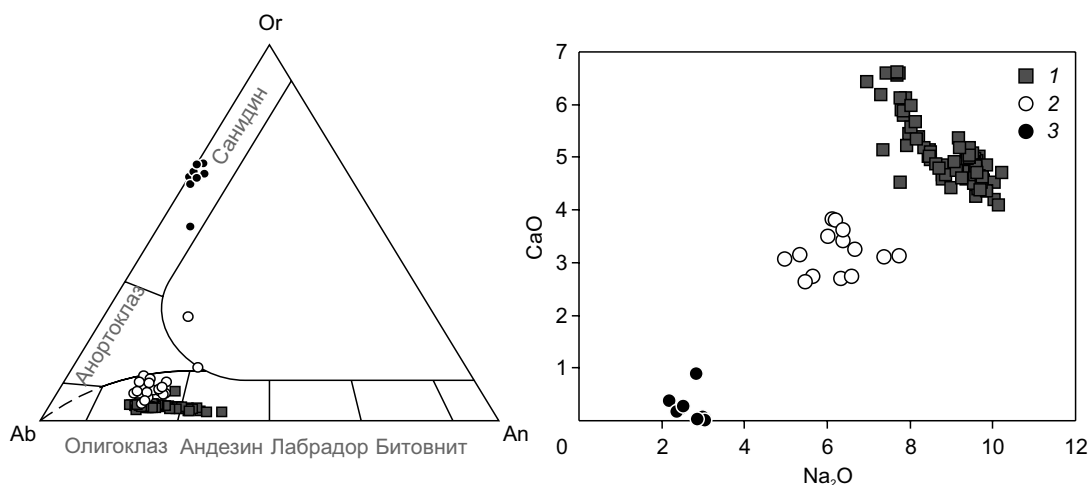
Исследования составов стекол и сферул позволили выявить особенности расплавов, принимавших участие в формировании фьямме из игнимбрита влк. Хангар. Были проанализированы светлые стекла между сферами, а также проведен анализ темной стеклоподобной аморфной массы внутри сферул (см. доп. материалы, table 2).

На вариационных диаграммах светлое стекло между сферами во фьямме образует совместно со значительной частью данных по сферам четкую компактную группу с максимальным содержанием  $\text{SiO}_2$ , располагающуюся фактически на окончании трендов эффузивов влк. Хангар рядом с составом изученного игнимбрита. Необходимо отметить, что эта группа стекол и сферул на всех диаграммах рис. 5 перекрывается данными по неизменным стеклам вулкана. В то же время часть данных по составу темного аморфного стеклоподобного субстрата сферул (с максимальным количеством щелочей) явно выбивается из общей картины и вполне возможно, что в этом случае определенную роль могли сыграть вторичные процессы преобразования.

#### СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ ИЗ ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР

Среди минералов, входящих в состав игнимбритов влк. Хангар, преобладают полевые шпаты и кварц. В сферах и светлом стекле во фьямме присутствуют микролиты амфибола и биотита (см. рис. 4). Были проведены анализы составов вкрапленников плагиоклаза из основной массы игнимбрита, а также микрокристалликов полевых шпатов, нарастающих на сферулы и располагающихся в светлом стекле между ними (см. доп. материалы, table 3). Для амфиболов и биотитов из-за преобладающих микроразмеров удалось получить единичные данные об их составе (см. доп. материалы, table 4).

Анализ кристаллических фаз показал, что вкрапленники плагиоклаза, располагающиеся самостоятельно в основной матрице изученного игнимбрита, содержат 18—39 % анортитового компонента и



**Рис. 6. Составы (мас. %) полевых шпатов в игнимбрите влк. Хангар.**

1 — вкрапленники плагиоклаза в основной массе игнимбрита; 2 — кристаллики полевого шпата в светлом стекле между сферулами; 3 — кристаллики полевого шпата, нарастающие на сферулы внутри фьямме. Ab, Or, An — мол. %.

соответствуют олигоклазу и андезину. Кристаллиты в светлом прозрачном стекле между сферулами во фьямме содержат 17—28 An и по этим характеристикам отвечают олигоклазу. Кристаллики, нарастающие на сферулы во фьямме, обогащены калием (до 10 мас. % K<sub>2</sub>O и до 68 % Or), содержат при этом несколько процентов натрия (до 3 мас. %) и соответствуют сандину (рис. 6).

На диаграммах Ab—Or—An, CaO—Na<sub>2</sub>O (см. рис. 6) видны отличия полевых шпатов во фьямме от вкрапленников в основной массе. Особенно резко отличаются от плагиоклазов-вкрапленников минералы, нарастающие на сферулы внутри фьямме (обладающие минимумом кальция, натрия и относительным максимумом калия), приуроченные на тройной диаграмме Ab—Or—An к калиево-натриевым полевым шпатам.

Составы кристалликов полевого шпата в светлом стекле между сферулами фьямме частично перекрываются по содержанию натрия и по значениям анортитового компонента с данными по плагиоклазовым вкрапленникам в основной массе. В то же время вкрапленники явно отличаются от полевых шпатов внутри фьямме повышенными количествами кальция и натрия (см. рис. 6).

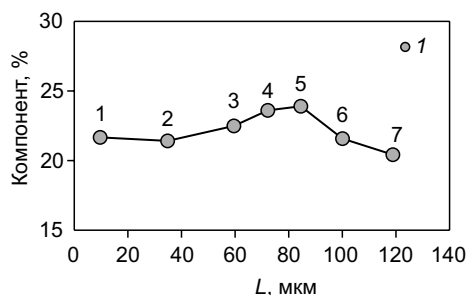
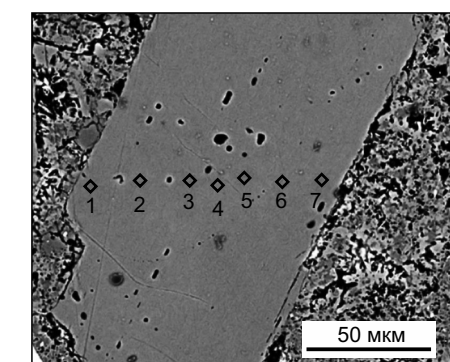
В целом полученные сведения по составам полевых шпатов свидетельствуют о том, что расплавы, из которых образовались минералы в основной массе игнимбрита и во фьямме, существенно различались.

Для вкрапленников плагиоклаза из основной массы игнимбрита была отмечена относительно слабовыраженная нормальная зональность, отражающаяся в последовательном уменьшении содержания анортитового компонента от центра к краям (рис. 7).

Несмотря на преобладающие микроразмеры кристалликов в сферулах и в светлом стекле между сферулами, удалось получить данные по составам, свидетельствующие об их принадлежности к амфиболам и биотитам (см. доп. материалы, table 4).

#### РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ ИЗ ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР

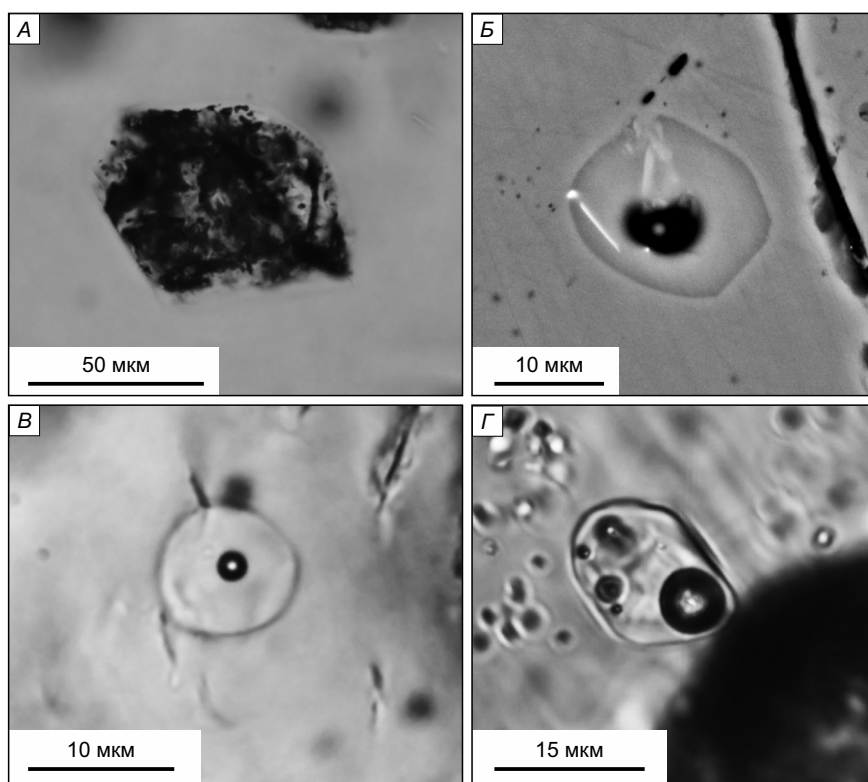
Расплавные включения были найдены во вкрапленниках плагиоклаза и кварца из основной массы игнимбрита влк. Хангар. Следует отметить, что детально изучены составы как не-



**Рис. 7. Зональность вкрапленника плагиоклаза из основной массы игнимбрита влк. Хангар.**

1 — содержание анортитового компонента. 1, 2, ..., 7 — номера анализов см. в доп. материалах, table 3.





**Рис. 8. Первичные расплавные включения во вкрапленниках плагиоклаза из игнимбрита влк. Хангар.**

*А, Б* — негретые включения. *В, Г* — прогретые и закаленные включения.

гретых, так и прогретых в микротермокамере включений. При этом особое внимание уделялось методическим аспектам высокотемпературных экспериментов с целью получения гомогенных закалочных стекол, наиболее достоверно отвечающих составу расплава, из которого рос минерал.

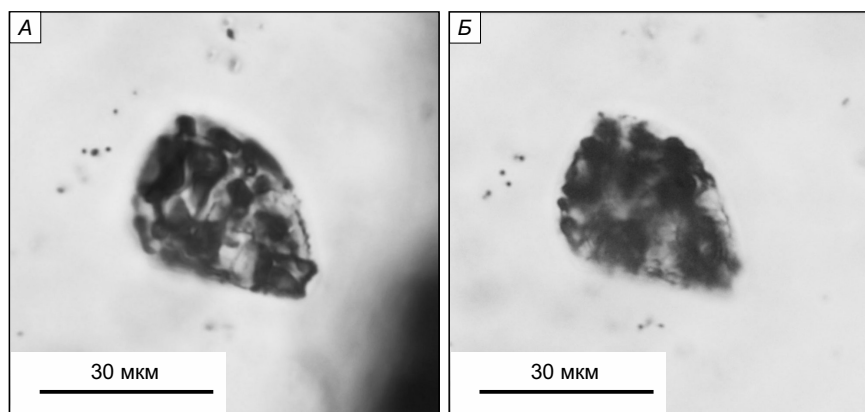
**Плагиоклаз.** Многофазные первичные расплавные включения (размерами 10—55 мкм) размещаются равномерно по кристаллу полевого шпата, иногда фиксируют зоны роста. Обычно имеют правильную прямоугольную форму с некоторым округлением. Включения содержат ряд светлых (кристаллических) и темных фаз. Часто видно несколько круглых газовых пузырьков. По границам включений иногда располагается кайма светлого стекла (рис. 8, *А*).

Значительно более редки во вкрапленниках плагиоклаза стекловатые включения, заполненные гомогенным стеклом, в котором находится газовый пузырек (см. рис. 8, *Б*).

Высокотемпературные эксперименты с многофазными включениями в плагиоклазе проводились по двум основным схемам. Было выяснено, что схема опытов с несколькими выдержками по 15 мин (общей продолжительностью около 40—50 мин) в большинстве случаев не позволяет получить полную гомогенизацию включений — сохраняются флюидные пузырьки в расплаве (см. рис. 8, *В, Г*). В связи с этим проведены эксперименты с более длительными выдержками (до 210 мин) при температурах, начинающаяся с 800 °С.

Наблюдения во время экспериментов с выдержкой 90 мин при температурах свыше 800 °С (800—830 °С) показали, что включения не разгерметизировались. Прозрачная оторочка из стекла, существовавшая по границе до экспериментов, сохранилась. Анализ этого стекла на сканирующем микроскопе показал практическое отсутствие (0.25 мас. %) кальция, в отличие от вмещающего плагиоклаза (6.59 мас. %), т. е. плавление минерала-хозяина не отмечается. Таким образом, даже длительные выдержки не привели к появлению во включении расплава при температурах до 830 °С.

В результате других опытов с выдержкой при температурах свыше 800 °С (800—1050 °С) около 210 мин было выяснено, что во включениях наблюдались некоторые преобразования фаз (рис. 9), которые после закалки и тщательного просмотра при большом увеличении можно диагностировать как плавление. В целом включения не разгерметизировались, стенки сохранились. Количество прозрачного стекла, существовавшего до экспериментов, значительно увеличилось (см. рис. 9, *Б*). Анализ этого стекла на

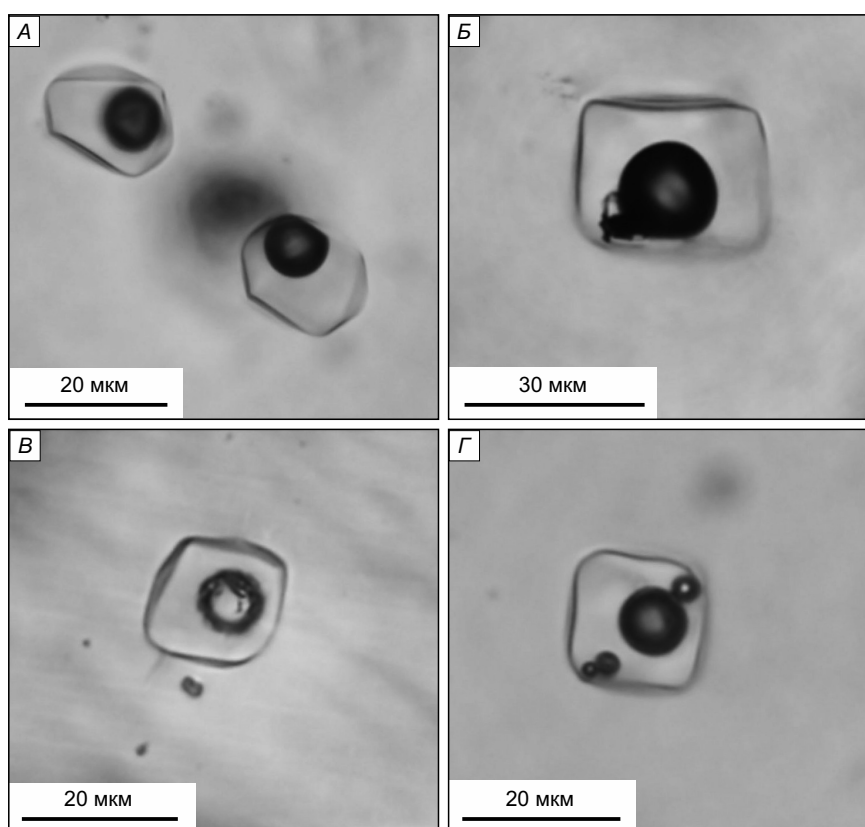


**Рис. 9. Многофазное расплавленное включение в плагиоклазе из игнимбрита влк. Хангар до 900 °С (А) и при температурах 900—1050 °С (Б).**

сканирующем микроскопе показал полное отсутствие кальция в отличие от вмещающего плагиоклаза (5.0—5.8 мас. %), т. е. плавления минерала-хозяина по границе включения не отмечается. В итоге было установлено, что во включениях шло плавление внутренних фаз при температурах, начиная с 900 °С.

**Кварц.** Первичные расплавленные включения (размерами 10—30 мкм) располагаются равномерно по кристаллу кварца и обладают правильными прямоугольными или гексагональными формами (согласно очертаниям вкрапленников) (рис. 10).

Включения содержат в подавляющем большинстве случаев две фазы: преобладает светлое гомогенное стекло, в котором находится флюидный пузырек сферической формы, занимающий до 30 % от всего объема включения (см. рис. 10, А). Очень редко включения дополнительно содержат единичные



**Рис. 10. Первичные расплавленные включения в кварце из игнимбрита влк. Хангар.**

А, Б — негретые включения. В, Г — прогретые и закаленные включения.

Таблица 1. Представительные анализы (мас. %) расплавных включений во вкрапленниках плагиоклаза и кварца из игнимбрита влк. Хангар

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	14	69.91	0.44	16.86	0.41	НП	0.42	1.42	6.26	3.81	99.53
2	15	72.42	НП	16.33	0.44	»	НП	1.07	5.98	3.76	100.00
3	23	73.46	»	15.79	0.39	»	»	1.24	5.27	3.74	99.89
4	31	72.84	»	15.98	0.37	»	»	1.18	6.42	3.21	100.00
5	37	76.27	»	13.41	0.47	»	»	1.06	6.27	2.52	100.00
6	7a	77.76	НП	11.93	0.31	НП	НП	НП	3.13	5.88	99.09
7	7c	70.54	»	14.34	0.55	»	»	1.08	4.49	5.78	96.77
8	8a1	73.47	»	14.69	0.65	»	»	0.28	5.44	5.34	99.87
9	8c	75.39	0.38	14.00	0.70	»	»	1.35	4.80	3.23	99.85
10	11	78.99	НП	11.74	0.52	НП	0.29	0.38	2.44	5.55	99.91
11	13	80.14	»	11.26	0.31	»	НП	0.32	2.22	5.66	99.91
12	14	79.59	»	11.72	0.27	»	»	НП	2.48	5.81	99.87
13	15	77.71	»	12.69	0.26	»	»	0.80	2.98	5.45	99.89
14	58	72.72	НП	14.32	0.59	НП	НП	0.76	4.23	5.04	97.66
15	60	72.63	0.27	14.53	0.60	»	»	0.67	4.50	5.07	98.27
16	65	73.98	НП	14.74	1.12	»	»	0.91	4.96	4.69	100.40
17	67	72.10	0.25	14.59	0.87	»	»	1.05	4.35	4.37	97.58
18	69	72.40	0.22	14.96	0.81	»	»	0.99	4.80	4.46	98.64
19	73	73.87	НП	14.36	0.57	»	»	0.74	3.81	5.44	98.79
20	74	74.30	»	14.42	0.64	»	»	0.69	3.88	5.36	99.29
21	78	73.53	0.20	14.76	0.69	»	»	0.83	4.30	5.13	99.44
22	79	72.37	НП	14.40	0.76	»	»	0.87	3.99	4.93	97.32
23	81	73.66	»	14.30	0.62	»	»	0.73	3.75	5.41	98.47
24	83	72.97	»	14.04	0.63	»	»	0.73	3.45	5.23	97.05
25	85	73.85	0.20	14.76	0.66	»	»	0.78	3.77	5.36	99.38
26	87	74.41	НП	14.44	0.67	»	»	0.76	3.67	5.32	99.27
27	89	73.12	»	14.45	0.71	»	»	0.73	4.08	5.14	98.23
28	90	74.58	»	14.70	0.63	»	»	0.66	4.27	5.14	99.98
29	9_1	72.96	0.22	14.37	0.68	»	»	0.69	3.99	5.06	97.97
30	11_1	71.83	0.20	14.45	0.83	»	0.12	1.03	4.28	4.44	97.28
31	3_1	73.62	НП	14.31	0.60	НП	НП	0.62	2.31	5.25	96.82
32	3_3	73.36	0.17	14.82	0.70	»	»	0.77	1.73	5.18	96.83
33	4_1	75.05	НП	15.76	0.33	»	»	0.76	2.55	4.81	99.37
34	17	76.04	»	14.78	0.62	»	»	0.64	2.38	5.43	99.89
35	18	75.63	0.17	15.29	0.72	»	»	0.80	1.79	5.34	99.84
36	19	75.86	0.12	15.98	0.25	»	»	0.77	1.65	5.24	99.87
37	20	74.32	НП	16.32	0.21	»	»	0.79	3.18	4.97	99.90
38	21	75.35	0.22	15.41	0.34	»	»	0.73	2.51	5.35	99.91
39	22	75.50	0.20	15.29	0.36	»	»	0.71	2.49	5.31	99.86
40	23	75.29	0.19	15.28	0.39	»	»	0.80	2.22	5.56	99.73
41	24	75.71	0.13	15.38	0.43	»	»	0.78	1.87	5.43	99.73
42	7	75.06	0.13	14.40	0.63	»	»	0.56	2.75	5.16	98.70
43	8	73.45	0.12	14.47	0.59	»	»	0.61	2.74	5.05	97.04
44	9	74.27	0.14	15.29	0.69	»	»	0.73	3.19	5.23	99.54
45	11	71.68	0.14	15.35	0.20	»	»	0.83	3.22	4.69	96.10
46	12	73.63	0.13	15.52	0.25	»	»	0.73	2.83	4.70	97.79
47	13	74.67	НП	15.85	0.29	»	»	0.80	2.51	4.79	99.04
48	15	75.42	»	15.67	0.36	»	»	0.72	2.58	4.82	99.68
49	16	74.88	0.13	15.67	0.40	»	»	0.73	2.96	4.86	99.63
50	17	74.99	0.13	16.07	0.33	»	»	0.83	3.19	4.92	100.45

Примечание. 1—5 — стекла прогретых включений в плагиоклазе; 6—9 — валовые составы многофазных включений в плагиоклазе, прогретых с длительными выдержками до 830—1050 °С; 10—13 — стекла негретых стекловатых включений в плагиоклазе; 14—50 — стекла прогретых (14—30) и негретых (31—50) стекловатых включений в кварце. Здесь и в табл. 2: НП — ниже предела обнаружения. Для компонентов с содержанием НП пределы обнаружения следующие: TiO<sub>2</sub> — 0.12 мас. %, MnO — 0.16 мас. %, MgO — 0.14 мас. %, CaO — 0.12 мас. %.

светлые (кристаллические) и темные микрофазы, находящиеся обычно рядом с газовым пузырьком (см. рис. 10, Б).

В ходе высокотемпературных экспериментов в микротермокамере гомогенизировать расплавные включения в кварце не удалось. После закалки прогретых включений в них наблюдаются флюидные пузырьки в светлом гомогенном стекле (см. рис. 10, В, Г).

### СОСТАВЫ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ ИЗ ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР

Как показали высокотемпературные эксперименты, метод гомогенизации первичных расплавных включений (позволяющий установить температурные характеристики) не принес в случае игнимбритов влк. Хангар однозначных результатов. В то же время нам удалось получить представительную информацию о составах гомогенных стекол прогретых и исходно стекловатых включений во вкрапленниках плагиоклаза и кварца. Совместное применение оригинальных данных о химических составах стекол во фьямме (рассмотренных выше, см. доп. материалы, table 2) и стекол, созданных экспериментально в ходе опытов с расплавными включениями (табл. 1), позволило выяснить особенности эволюции расплавов при формировании игнимбритов влк. Хангар.

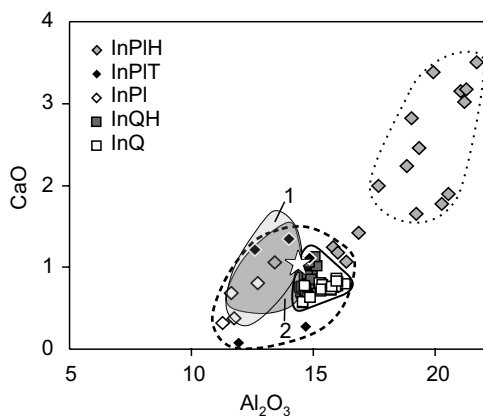
Учитывая результаты опытов, показавших возможность проплавления стенок включений в плагиоклазе при высоких (свыше 1100 °С) температурах, все анализы стекол прогретых включений в плагиоклазе были критически рассмотрены. В итоге выяснено, что значительная часть данных по экспериментально полученным стеклам свидетельствует о реальных процессах ассимиляции расплавом во включениях вещества плагиоклаза-хозяина. В частности, на диаграмме CaO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 11) отчетливо выделяется группа стекол прогретых включений, явно обогащенных кальцием и алюминием, широко представленными в составе плагиоклаза. Сведения по этим включениям, соответственно, убраны из табл. 1 и не используются на рис. 12.

В то же время на рис. 11 отчетливо видно, что остальные данные по расплавным включениям в плагиоклазе (а также в кварце) образуют совместную группу с умеренными содержаниями CaO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которая перекрывается полями составов природных стекол влк. Хангар из тефры и туфов (1), а также из природно-закаленных стекловатых расплавных включений и основной массы тефры (2). Эта информация свидетельствует о достоверности полученных нами результатов изучения расплавных включений и об их соответствии реальным параметрам магматических систем влк. Хангар.

В отличие от включений в плагиоклазе, стекла негретых и гретых стекловатых включений в кварце образуют на диаграмме (см. рис. 11) одну компактную группу, содержащую также состав рассмотренного игнимбрита и располагающуюся среди данных по расплавным включениям в плагиоклазе, для которых процессы взаимодействия с минералом-хозяином не отмечены.

На вариационных диаграммах зависимости химических компонентов от SiO<sub>2</sub> подтверждается устойчивое наличие компактной группы стекловатых включений в кварце, располагающейся внутри несколько более масштабного поля данных по гретым и негретым включениям в плагиоклазе без признаков ассимиляции вещества минерала-хозяина (см. рис. 12).

В целом по соотношениям рассмотренных компонентов (см. рис. 12) составы включений в плагиоклазе и кварце тесно ассоциируют (частично перекрываясь) с полями составов природных стекол

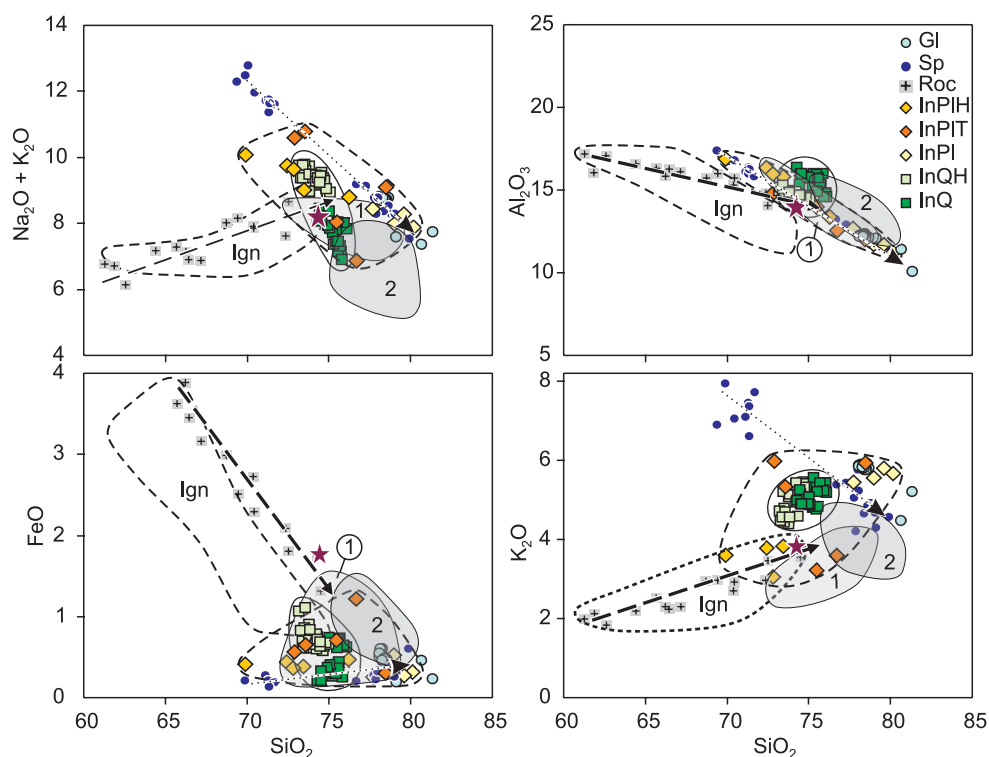


**Рис. 11. Диаграмма CaO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (мас. %) для расплавных включений в плагиоклазе и в кварце из игнимбрита влк. Хангар.**

Гомогенные стекла прогретых (практически двухфазных — стекло с газовым пузырьком) включений в плагиоклазе (InPIH) и в кварце (InQH). Гомогенные стекла негретых стекловатых включений в плагиоклазе (InPI) и в кварце (InQ). Валовой состав многофазных включений, прогретых с длительными выдержками до 830—1050 °С (InPIT). Поля: сплошная линия — включения в кварце, штриховая — включения в плагиоклазе, пунктирная — поле стекол прогретых расплавных включений в плагиоклазе, обогащенных кальцием и алюминием, поступившими (наиболее вероятно) из вмещающего плагиоклаза во время высокотемпературных (свыше 1100 °С) экспериментов в микротермокамере. Звезда — состав рассмотренного игнимбрита влк. Хангар. Поля преобладающих составов природных стекол влк. Хангар из тефры

и туфов (1), а также из природно-закаленных стекловатых расплавных включений и основной массы тефры (2). Составы стекол и включений пересчитаны на 100 %. Рисунок создан на основе оригинальных данных. При построении полей стекол использованы материалы из работ: 1 — [Portnyagin et al., 2020], 2 — [Толстых и др., 2021].





**Рис. 12. Составы (мас. %) расплавов, участвовавших в формировании игнимбритов влк. Хангар.**

GI — светлое прозрачное стекло между сферулами, Sp — стеклоподобная аморфная масса внутри сферулы, Roc — эффузивы влк. Хангар. Гомогенные стекла прогретых (практически двухфазных — стекло с газовым пузырьком) включений в плагиоклазе (InPIH) и в кварце (InQH). Гомогенные стекла негретых стекловатых включений в плагиоклазе (InPI) и в кварце (InQ). Валовой состав многофазных включений, прогретых с длительными выдержками до 830—1050 °C (InPIT). Ign — поле составов игнимбритов Карымской кольцевой структуры (Камчатка). Поля преобладающих составов природных стекол влк. Хангар из тефры и туфов (1), а также из природно-закаленных стекловатых включений и основной массы тефры (2) Звезда — рассмотренный игнимбрит влк. Хангар. Пунктирная стрелка — эволюция составов природных стекол фьямме. Штриховая — эволюция составов эффузивов. Поля: сплошная линия — включения в кварце, штриховая — включения в плагиоклазе. Составы пород, стекол и включений пересчитаны на 100 %. Рисунок создан на основе оригинальных данных. При построении полей использованы материалы из работ: Ign — [Иванов, 2008], 1 — [Portnyagin et al., 2020], 2 — [Толстых и др., 2021].

влк. Хангар из тефры и туфов (1), а также из природно-закаленных стекловатых расплавных включений и основной массы тефры (2).

Необходимо отметить, что выделенные группы данных по включениям располагаются на окончании тренда эффузивов влк. Хангар, в большинстве случаев отличающегося от трендов стекол во фьямме игнимбрита. В частности, эволюция составов эффузивов вулкана идет с накоплением щелочей и падением алюминия, железа и кальция на фоне роста  $\text{SiO}_2$ . В то же время для стекол между сферулами и стеклоподобной массы сферул во фьямме наблюдаются обратные процессы с падением щелочей и ростом железа (см. рис. 12). Таким образом, устанавливаются два основных типа расплавов, участвовавших в формировании игнимбритов влк. Хангар. Вкрапленники плагиоклаза и кварца кристаллизовались в ходе общей эволюции магматизма вулкана из кислых расплавов в глубинных камерах. При образовании фьямме в ходе постэруптивных процессов участвовали щелочные (с минимальными содержаниями алюминия, железа и с максимумом  $\text{SiO}_2$ ) расплавы.

#### ЛЕТУЧИЕ КОМПОНЕНТЫ В РАСПЛАВАХ, УЧАСТВОВАВШИХ В ФОРМИРОВАНИИ ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР

Исследовались составы летучих компонентов во включениях из вкрапленников в основной массе и в стеклах из фьямме. В результате мы имеем возможность рассмотреть роль флюидов в ходе процессов развития расплавов (и роста вкрапленников) в эндогенных системах до извержения и при образовании фьямме после извержения.

Детальные исследования вкрапленников минералов в основной массе игнимбрита влк. Хангар показали, что для фенокристаллов характерны не только расплавные, но и флюидные включения. На ри-

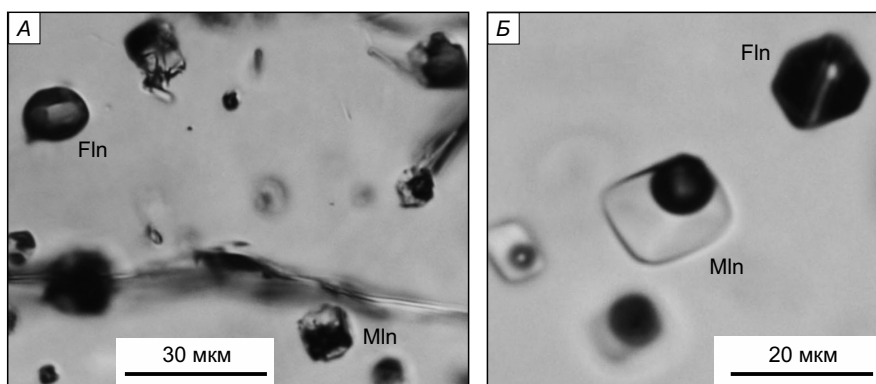


Рис. 13. Первичные негретые сингенетичные расплавные (MIn) и флюидные (FIn) включения во вкрапленниках плагиоклаза (А) и кварца (Б) из игнимбрита влк. Хангар.

сунке 13 хорошо видно, что во вкрапленниках плагиоклаза и кварца рядом с первичными расплавными включениями присутствуют сингенетичные им первичные флюидные включения.

С помощью КР-спектроскопии установлено наличие углекислоты во флюидных включениях в плагиоклазе (рис. 14, А).  $\text{CO}_2$  присутствует и в газовой фазе прогретых включений в плагиоклазе (см. рис. 14, Б) и негретых расплавных включений в кварце.

Флюидные включения в плагиоклазе исследовались также методом криометрии. Было установлено, что в замороженных включениях твердая  $\text{CO}_2$  плавится при температуре  $-56.7^\circ\text{C}$ , что соответствует температуре плавления практически чистой  $\text{CO}_2$ . Гомогенизация жидкой  $\text{CO}_2$  происходит в газовую фазу в интервале температур от  $-8$  до  $-7^\circ\text{C}$ . В результате плотность  $\text{CO}_2$  во флюидных включениях может быть оценена в величину  $0.078\text{--}0.076\text{ г/см}^3$ .

Анализ гомогенных стекол расплавных включений с помощью КР-спектроскопии и РСМА, по методике [Kotov et al., 2021], показал устойчиво повышенные содержания воды для негретых включений в кварце ( $2.78\text{--}3.23$  мас. %) по сравнению с данными по прогретым включениям в этом минерале —  $2.17\text{--}2.67$  мас. % (табл. 2). При этом для прогретых включений в плагиоклазе содержания воды значительно меньше ( $1.06\text{--}1.21$  мас. %) и объяснением может служить частичная разгерметизация в ходе проплавления стенок включений в этом минерале, а также диффузионные процессы, рассмотренные экспериментально [Johnson, Rossman, 2013]. В случае прогретых включений в кварце количество воды также меньше, но максимальные значения ( $2.67$  мас. %) близки к данным по стеклам негретых включений.

Светлое стекло между сферами во фьямме содержит устойчиво заметные количества воды ( $2.21\text{--}2.91$  мас. %), существенно более высокие, чем стеклоподобное аморфное вещество внутри сфер —  $0.77\text{--}1.35$  мас. % (см. табл. 2).

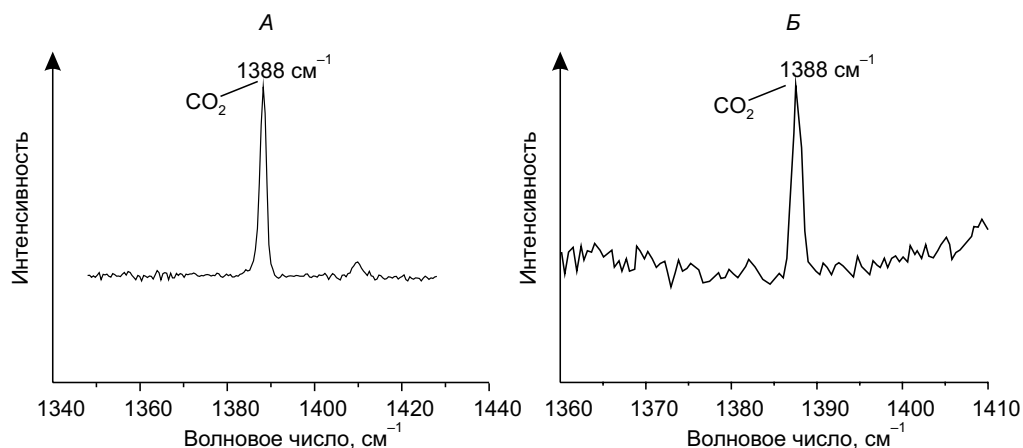


Рис. 14. КР-спектры полностью флюидного включения в плагиоклазе (А) и флюидной фазы в прогретом расплавном включении в плагиоклазе (Б).

Таблица 2. Составы стекол во фьямме и в расплавных включениях, а также содержания в этих стеклах воды, полученные с помощью РСМА и КР-спектроскопии, по методике [Kotov et al., 2021]

№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Σ	H <sub>2</sub> O РСМА	Σ +H <sub>2</sub> O РСМА	H <sub>2</sub> O КР (σ) ± 0.21 мас. %	Σ +H <sub>2</sub> O КР
<b>Светлое стекло между сферами фьямме</b>												
Н 1217	76.09	0.13	11.94	0.58	НП	2.78	5.69	97.21	2.66	99.87	2.91	100.12
Н 1218	76.09	0.13	11.94	0.58	»	2.78	5.69	97.21	2.66	99.87	2.75	99.96
Н 711	76.42	0.12	11.92	0.42	»	2.87	5.64	97.52	2.40	99.93	2.35	99.88
Н 712	76.76	0.12	12.01	0.48	»	2.84	5.63	97.84	2.21	100.05	2.55	100.39
Н 912	76.68	0.17	11.88	0.45	»	2.87	5.62	97.67	2.22	99.89	2.60	100.28
Н 913	76.68	0.17	11.88	0.45	»	2.87	5.62	97.67	2.22	99.89	2.82	100.50
Н 914	76.68	0.17	11.88	0.45	»	2.87	5.62	97.67	2.22	99.89	2.57	100.25
Н 1011	76.09	0.15	11.92	0.42	»	2.81	5.64	97.03	2.55	99.58	2.65	99.68
Н 1211	76.55	0.13	11.99	0.49	»	2.89	5.76	97.90	2.52	100.42	2.49	100.30
Н 1213	76.09	0.13	11.94	0.58	»	2.78	5.69	97.21	2.66	99.87	2.67	99.88
<b>Темная стеклоподобная аморфная масса внутри сферулы</b>												
Н 1214	70.28	НП	16.00	0.13	0.61	4.21	7.23	98.45	1.35	99.80	0.98	99.43
Н 1215	70.28	»	16.00	0.13	0.61	4.21	7.23	98.45	1.35	99.80	0.77	99.22
Н 1216	70.28	»	16.00	0.13	0.61	4.21	7.23	98.45	1.35	99.80	1.09	99.54
<b>Стекло негретых расплавных включений в кварце</b>												
Н-3-1-1	73.62	НП	14.31	0.60	0.62	2.31	5.25	96.83	2.78	99.61	3.12	99.84
Н 3-1-2	73.62	»	14.31	0.60	0.62	2.31	5.25	96.83	2.78	99.61	2.97	99.69
Н-3-3-1	73.36	0.17	14.82	0.70	0.77	1.73	5.18	96.74	3.08	99.92	3.19	100.03
Н-4-1-1	75.05	НП	15.76	0.33	0.76	2.55	4.81	99.35	—	—	3.23	102.53
<b>Стекло гретых расплавных включений в плагиоклазе</b>												
НТ 521	68.79	НП	17.40	0.32	1.96	6.32	3.57	98.36	1.06	99.54	1.21	99.69
<b>Стекло гретых расплавных включений в кварце</b>												
НТ 91	72.96	0.22	14.37	0.68	0.69	3.99	5.06	97.98	2.17	100.14	2.44	100.41
НТ 1111	71.83	0.20	14.45	0.83	1.03	4.28	4.44	97.14	2.66	99.92	2.67	99.93

Примечание. Для компонентов с содержанием НП пределы обнаружения следующие: TiO<sub>2</sub> — 0.12 мас. %, CaO — 0.12 мас. %.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЛАВОВ, ПРИНИМАВШИХ УЧАСТИЕ В ФОРМИРОВАНИИ ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР

Полученный представительный объем данных по полевым шпатам и по расплавным и флюидным включениям во вкрапленниках, а также по стеклам во фьямме позволил выяснить основные физико-химические характеристики (составы, температуры, давления, роль H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>) расплавов, принимавших участие в формировании игнимбритов влк. Хангар.

**Состав расплавов.** На основе исследования расплавных включений, а также стекол во фьямме было выяснено, что при формировании игнимбритов вулкана действовали два разных расплава. Первый в эндогенных условиях под вулканом участвовал в кристаллизации вкрапленников плагиоклаза и кварца. Другой тип расплава, по своей сути, является вторичным по отношению к глубинным магматическим системам вулкана и связан с процессами спекания и плавления изверженной вулканокластической массы.

**Температуры расплавов.** Эксперименты с расплавными включениями в микротермокамере, как показано выше, не позволили получить достоверную информацию о температурах расплавов. В связи с этим мы не используем результаты высокотемпературных опытов для определения температур кристаллизации. Сведения о температурах образования минералов из игнимбрита влк. Хангар получены в результате расчетов по геотермометрам в работе [Putirka, 2008] с использованием составов полевых шпатов, а также стекол во включениях и во фьямме.

Температуры первичных эндогенных магматических систем были оценены на основе данных по составам вкрапленников плагиоклаза из основной массы игнимбрита и стекол из прогретых включений

без признаков проплавления стенок и из негретых изначально стекловатых включений. С целью максимального исключения при расчетах возможных потерь в ходе экспериментов были взяты содержания  $\text{H}_2\text{O}$ , установленные для стекол негретых включений в кварце с максимальными содержаниями воды — 2.97—3.23 мас. %. В результате выяснено, что вкрапленники плагиоклаза кристаллизовались при температурах 840—960 °C.

Температуры вторичных расплавов, образовавшихся в процессах спекания и плавления изверженной вулканокластической массы, были определены на основе данных по составам микрокристалликов полевого шпата (нарастающих на сферулы во фьямме) и светлого стекла (включая воду, 2.35—2.91 мас. %), находящегося между сферулами. Учитывая состав кристалликов, отвечающих санидину, в программе [Putirka, 2008] была применена схема для щелочных полевых шпатов. В итоге определены гораздо более низкие температуры кристаллизации (680—760 °C), чем в случае вкрапленников плагиоклаза.

Температурный режим вторичных расплавов был также оценен с привлечением составов микрокристалликов полевого шпата в светлом стекле между сферулами во фьямме. Эти минералы в целом отвечают олигоклазу, но обладают относительно повышенными содержаниями калия, располагаясь на диаграммах между данными по плагиоклазам вкрапленников в основной массе и по санидинам, нарастающим на сферулы во фьямме. Учитывая это в определенной мере двойственное положение микрокристалликов, расчеты проводились по двум схемам в программе [Putirka, 2008] — для плагиоклазов и для щелочных полевых шпатов. В качестве расплава, из которого шла кристаллизация, были использованы соответственно данные по светлому стеклу между сферулами во фьямме, включая содержания воды: 2.35—2.91 мас. %. В итоге установлен достаточно широкий диапазон температур (770—840 °C), занимающий среднее положение между результатами по вкрапленникам основной массы и кристалликам, нарастающим на сферулы во фьямме.

**Давления в расплавах, содержащих  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ .** Следуя модели [Papale et al., 2006], для исследуемых стекол были получены оценки содержания  $\text{CO}_2$ , а также значения давлений, отвечающих пределу насыщения соответствующих расплавов. Для выяснения параметров насыщения использовались полученные данные о составе стекол и содержании воды, установленные методом КР-спектроскопии. Также необходимым для оценки параметров насыщения расплава является состав сосуществующего флюида. Установленные объемные соотношения газ/жидкость во флюидных включениях составляют 7:1, плотность  $\text{CO}_2$  в газовой фазе флюидного включения оценена в 0.076—0.078 г/см<sup>3</sup>. Приняв, что плотность  $\text{H}_2\text{O}$  в жидкой фазе флюидного включения близка к 1.0 г/см<sup>3</sup>, мы оцениваем мольную долю воды во флюиде ( $\text{XH}_2\text{O}$ ) около 0.84. Температура, используемая для моделирования, была взята равной 900 °C, что соответствует среднему значению установленных нами температур кристаллизации вкрапленников плагиоклаза — 840—960 °C.

Для стекол негретых расплавных включений в кварце растворимость  $\text{CO}_2$  была оценена в 139—196 г/т при содержании  $\text{H}_2\text{O}$  2.97—3.23 мас. %. Давление насыщения — 895—1105 бар.

Следует обратить внимание на стекла прогретых и закаленных расплавных включений в кварце и в плагиоклазе (см. табл. 2). Методами КР-спектроскопии и РСМА для подобных стекол редко удается определить близкие концентрации воды. Установленные содержания в сумме с микрозондовым анализом также редко попадают в диапазон 99.5—100.5 %. Однако в тех случаях, когда для прогретых расплавных включений удастся достоверно установить количество воды, эти концентрации находятся ниже содержания воды в подобных негретых включениях.

Учитывая сингенетичность расплавных и флюидных включений, можно утверждать, что часть полученных значений давления и  $\text{CO}_2$  близки к тем, при которых происходила дегазация расплава, и позволяют достоверно оценить РТХ-параметры для насыщенных флюидом расплавов.

**Фазовая сепарация расплавов.** Как было отмечено выше (см. рис. 13), во вкрапленниках плагиоклаза и кварца из основной массы игнимбрита влк. Хангар рядом с первичными расплавными включениями наблюдаются сингенетичные им первичные флюидные включения. Подобные ассоциации расплавных и флюидных включений, прямо свидетельствующие о фазовой сепарации («вскипании») расплавов при кристаллизации фенокристаллов, присутствуют в магматических вкрапленниках из эффузивов других вулканических комплексов [Бакуменко и др., 1999; Smirnov et al., 2019; Kotov et al., 2023; и др.] и установлены нами ранее для вкрапленников из эффузивов влк. Горелый (Камчатка), а также в случае плагиоклазов из риолитов современной постройки влк. Хангар, Камчатка [Симонов и др., 2021].

Криометрические исследования и КР-спектроскопия говорят о преобладании  $\text{CO}_2$  во флюидных включениях, сингенетичных первичным расплавным включениям. Таким образом, можно сделать обоснованный вывод о кристаллизации части вкрапленников плагиоклаза основной массы игнимбрита из гетерофазного (насыщенного микропузырьками  $\text{CO}_2$ ) расплава.



## ГЕНЕЗИС ИГНИМБРИТОВ ВУЛКАНА ХАНГАР

Проведенные исследования показали, что игнимбриты влк. Хангар обладают сложной историей своего формирования, начинающейся с развития эндогенных магматических систем в глубинных условиях и заканчивающейся спеканием и плавлением изверженной пирокластической массы на склонах вулкана.

Существенным диагностическим признаком игнимбритовых пирокластических отложений является наличие стекловатых линз, так называемых фьямме. Именно изучение фьямме проливает свет на механизм образования игнимбритов [Набоко, 1974].

По принципиально возможным особенностям формирования фьямме существует большое количество моделей образования игнимбритов, которые можно разделить на две основные группы.

В одних моделях считается, что фьямме являются застывшими порциями глубинного расплава, выброшенного при извержении из магматической камеры [Гребенников и др., 2012; и др.]. Другие модели подразумевают формирование фьямме после извержения в результате реоморфного преобразования пеплового материала [Набоко, 1974].

В целом проведенные ранее исследования игнимбритов свидетельствуют о сложном происхождении фьямме, связанном главным образом с преобразованием изверженного пирокластического материала. В частности, в игнимбритах Камчатки выделяется несколько типов фьямме подобного генезиса [Набоко, 1974]. *Фьямме первого типа*, образованные за счет смятия и преобразования пемзовых обломков и лапиллей «первичной лавы», являются наиболее распространенными. Очень хорошо видно преобразование изометричных обломков пористых лав в лепешки стекла в обнажениях Кроноцкого залива. *Фьямме второго типа* отмечаются в покровах, слагающих обрывы Кроноцкого залива, представляют собой продукт термической переработки всей пеплово-пемзовой массы, т. е. являются участками гомогенизации в игнимбритах. Они встречаются в игнимбритовых покровах с четко проявившимися зонами сильного спекания. *Фьямме третьего типа* являются линзовидными включениями, образованными за счет переработки ксенолитов [Набоко, 1974].

Результаты наших исследований игнимбритов влк. Хангар согласуются наиболее вероятно с данными по фьямме второго типа в игнимбритах Камчатки, что подтверждает происхождение изученных фьямме в результате преобразования в ходе интенсивного спекания изверженного пирокластического материала.

В общем в ходе изучения минералов, находящихся в них включений, а также стекол из фьямме было выяснено, что при формировании игнимбритов влк. Хангар действовали два разных расплава. Один, характеризующийся информацией по расплавленным включениям во вкрапленниках плагиоклаза и кварца, представляет собой развитие системы в магматической камере под вулканом. Другой тип расплава непосредственно связан с вторичными по отношению к глубинным магматическим системам вулкана процессами спекания и плавления уже изверженной туфогенной массы.

В целом проведенные исследования позволили установить характеристики трех событий, ответственных за формирование игнимбритов влк. Хангар.

I. На основе данных по минералам из основной массы и находящимся в них расплавленным включениям было выяснено, что кристаллизация большинства вкрапленников плагиоклаза и кварца из игнимбритов влк. Хангар происходила при температурах 840—960 °C и давлениях до 1.1 кбар при содержаниях воды в расплаве до 3.23 мас. % наиболее вероятно в условиях магматической камеры на глубине около 4 км.

Эти результаты согласуются с данными по игнимбритам других исследователей. В частности, для игнимбритов Канарских островов установлены *PT*-параметры расплавов в магматических камерах до извержения: 2 кбар и 774—846 °C [Schwartz-Mesa, 2016]. Исследования расплавленных включений в минералах из игнимбритов Новой Зеландии показали содержания воды в расплаве в среднем 3.6—3.7 мас. % [Dunbar, Kyle, 1993].

II. Изученные нами сингенетичные первичные расплавные и флюидные включения во вкрапленниках плагиоклаза и кварца из игнимбритов влк. Хангар свидетельствуют о фазовой сепарации («вскипании») глубинного расплава с массовым образованием микропузырьков CO<sub>2</sub>.

Важная роль фазовой сепарации расплавов при формировании игнимбритов подтверждается и другими исследователями. Отмечается, что для игнимбритформирующих извержений типично обогащение магмы кремнеземом и флюидом. Оба компонента способствуют эксплозивному характеру магмы. В частности, при декомпрессии выделение летучих веществ приводит к образованию пузырьков низкой плотности, которые могут катастрофически расширяться, а значительное содержание кремнезема обеспечивает высокую вязкость расплава, что повышает эксплозивность извержений [Bachmann, Bergantz, 2008; Schwartz-Mesa, 2016].

III. Исследования стекол и микрокристалликов полевых шпатов во фьямме позволили установить характеристики расплавов, принимавших участие в формировании игнимбритов влк. Хангар после соб-

ственно извержения, приведшего к развитию пирокластических потоков, внутри которых в результате переплавления туфогенной массы образовывались фьямме. Выяснено, что в расплаве между сферами фьямме (зафиксированном светлым прозрачным стеклом с содержанием воды до 2.91 мас. %) образование микрокристалликов олигоклаза происходило при температурах 770—840 °С. При этом нарастание кристалликов санидина на сферы шло, скорее всего, из этого же расплава при более низких температурах 680—760 °С.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате исследования минералов, расплавных включений, а также стекол во фьямме было выяснено, что при формировании игнимбритов влк. Хангар участвовали два разных по происхождению расплава. Первый, характеризующийся информацией по расплавным включениям во вкрапленниках плагиоклаза и кварца, представляет развитие магмы в глубинной камере. Другой тип расплава, ответственный за образование стекол и микрокристалликов полевых шпатов во фьямме, непосредственно связан с процессами спекания и плавления изверженной вулканокластической массы.

2. Экспериментальные и аналитические исследования расплавных включений показали, что кристаллизация большинства вкрапленников плагиоклаза и кварца из игнимбритов влк. Хангар происходила при температурах 840—960 °С и давлениях до 1.1 кбар из расплавов с содержаниями воды до 3.23 мас. % в условиях магматической камеры на глубине около 4 км.

3. Наличие сингенетичных первичных расплавных и флюидных включений во вкрапленниках плагиоклаза и кварца из игнимбритов влк. Хангар свидетельствует о фазовой сепарации («вскипании») расплава в магматической камере с массовым образованием микропузырьков CO<sub>2</sub>.

4. На основе исследования стекол и микрокристалликов полевых шпатов установлено, что кристаллизация олигоклаза происходила при температурах 770—840 °С в расплаве между сферами фьямме (с содержанием воды до 2.91 мас. %). Нарастание кристалликов санидина на сферы шло при более низких температурах — 680—760 °С.

Авторы выражают свою благодарность д. г.-м. н. С.З. Смирнову за ценные советы и критические замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Работа выполнена по государственным заданиям ИГМ СО РАН (№ 122041400057-2) и ИГХ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

**Дополнительные материалы:** [https://sibran.ru/journals/Suppl\\_Simonov.pdf](https://sibran.ru/journals/Suppl_Simonov.pdf).

## ЛИТЕРАТУРА

**Базанова Л.И., Пономарева В.В., Портнягин М.В., Перепелов А.Б.** Возраст и масштаб сильнейших эксплозивных извержений в районе кальдеры Пальцевской (Восточная Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 28—29 марта 2019 года. Петропавловск-Камчатский, ИВиС ДВО РАН, 2019, с. 32—35.

**Бакуменко И.Т.** Процессы магматического петрогенезиса по данным изучения включений минералообразующих сред // Геология и геофизика, 1986 (7), с. 125—133.

**Бакуменко И.Т., Добрецов Н.Л.** Магматическое происхождение офиолитовых габбро // Докл. АН СССР, 1976, т. 230, № 6, с. 1425—1428.

**Бакуменко И.Т., Коляго С.С., Соболев В.С.** Проблема интерпретации термометрических исследований стекловатых включений в минералах и первые результаты проверки на искусственных включениях // Докл. АН СССР, 1967, т. 175, № 5, с. 1127—1130.

**Бакуменко И.Т., Томиленко А.А., Базарова Т.Ю., Ярмолюк В.В.** Об условиях формирования вулканитов Западно-Забайкальской позднемезозойско-кайнозойской вулканической области (по данным изучения расплавных и флюидных включений в минералах) // Геохимия, 1999, т. 12, с. 1352—1356.

**Государственная** геологическая карта Российской Федерации, м-б 1 : 200 000. Серия Хангарская. Лист N-57-VIII (г. Тупая). Объяснительная записка / В.И. Сидоренко, М.Т. Силиванов, В.А. Лисович. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010, 234 с.

**Гребенников А.В., Щека С.А., Карабцов А.А.** Силикатно-металлические сферы и проблема механизма игнимбритовых извержений (на примере Якутинской вулканотектонической структуры) // Вулканология и сейсмология, 2012, № 4, с. 3—22.

**Гриб Е.Н., Леонов В.Л.** Игнимбриты кальдеры Большой Семячик (Камчатка): состав, строение, условия образования // Вулканология и сейсмология, 1992, № 5—6, с. 34—50.

**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, doi: 10.15372/GiG20160701.

**Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В.** Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (5), с. 701—722, doi: 10.15372/GiG20170503.

**Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С.** Физико-химические параметры магматизма в районах вулканов Уксичан и Ичинский (Срединный хребет Камчатки) // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (10), с. 1353—1383, doi: 10.15372/GiG2019100.

**Ермаков Н.П., Долгов Ю.А.** Термобарогеохимия. М., Недра, 1979, 271 с.

**Иванов Б.В.** Игнимбриты района вулканов Карымской группы // Вулканические фации Камчатки. М., Наука, 1969, с. 105—109.

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

**Королук В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н.** О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (3), с. 221—225.

**Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В.** Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (8), с. 1473—1482, doi: 10.15372/GiG20150806.

**Леонов В.Л., Гриб Е.Н.** Кальдеры и игнимбриты Узонско-Семячикского района, Камчатка: новые данные по результатам изучения разрезов плато Широкое // Вулканология и сейсмология, 1998, № 3, с. 41—59.

**Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Базанова Л.И., Понамарева В.В., Сулержицкий Л.Д.** Особый тип катастрофических эксплозивных извержений — голоценовые субкальдерные извержения Хангар, Ходуткинский «маар», Бараний амфитеатр (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 1996, № 2, с. 3—24.

**Набоко С.И.** Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. Москва, Недра, 1974, 178 с.

**Певзнер М.М.** Голоценовый вулканизм Срединного хребта Камчатки. М., ГЕОС, 2015, 252 с.

**Перепелов А.Б.** Кайнозойский вулканизм Камчатки на этапах смены геодинамических обстановок: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Иркутск, ИГХ СО РАН, 2014, 41 с.

**Пийп Б.П.** Кронцкие игнимбриты на Камчатке // Труды лаборатории вулканологии АН СССР, 1961, вып. 20, с. 90—91.

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

**Симонов В.А., Котляров А.В.** Условия кристаллизации магм в промежуточных камерах под вулканами Толбачинский и Ичинский (Камчатка): данные по расплавленным включениям // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии. Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2016, с. 143—146.

**Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Котляров А.В., Карманов Н.С., Боровиков А.А.** Особенности кристаллизации минералов на разных стадиях развития магматизма вулкана Горелый (Камчатка): данные по расплавленным и флюидным включениям // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (1), с. 103—133, doi: 10.15372/GiG2020164.

**Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Котляров А.В., Николенко Е.И., Алиферова Т.А., Шарыгин В.В., Аулбах С.** Физико-химические параметры ультраосновных магматических систем северо-востока Сибирской платформы (данные по расплавленным включениям в хромшпинелиде) // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (12), с. 1630—1652, <https://doi.org/10.2113/RGG20204313>.

**Смирнов С.З., Максимович И.А., Котов А.А., Тимина Т.Ю., Бульбак Т.А., Томиленко А.А., Кузьмин Д.В., Шевко А.Я., Рыбин А.В.** Флюидный режим очагов крупных кальдерообразующих извержений на примере плейстоцен-голоценовых кальдер острова Итуруп (Курильские острова) // Геосистемы переходных зон, 2018, т. 2, № 4, с. 365—376, doi: 10.30730/2541-8912.2018.2.4.365-376.

**Соболев А.В., Слуцкий А.Б.** Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология и геофизика, 1984 (12), с. 97—110.

**Соболев В.С., Бакуменко И.Т., Костюк В.П.** О возможности использования расплавленных включений для петрологических реконструкций // Геология и геофизика, 1976 (5), с. 146—149.

**Толстых М.Л., Наумов В.Б., Певзнер М.М., Бабанский А.Д., Кононкова Н.Н.** Геохимические особенности магм крупнейшего голоценового извержения вулкана Хангар (Срединный хребет Камчатки) по данным изучения расплавленных включений // Геохимия, 2021, т. 66, № 2, с. 127—144, doi: 10.31857/S0016752521020084.

**Шалаева Е.А., Соколов С.А., Хисамутдинова А.И.** Ленинанканский игнимбрит как продукт извержений вулкана Арагац, Армения // Вулканология и сейсмология, 2020, № 2, с. 32—42, doi: 10.31857/S0203030620020054.

**Шеймович В.С.** Игнимбриды Камчатки. М., Недра, 1979, 179 с.

**Bachmann O., Bergantz G.** The magma reservoirs that feed supereruptions // *Elements*, 2008, v. 4, p. 17—21, doi: 10.2113/GSELEMENTS.4.1.17.

**Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., Chen C.H.** Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2010, v. 189 (1—2), p. 57—80, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.10.009.

**Cook E., Portnyagin M., Ponomareva V., Bazanova L., Svensson A., Garbe-Schönberg D.** First identification of cryptotephra from the Kamchatka Peninsula in a Greenland ice core: Implications of a widespread marker deposit that links Greenland to the Pacific northwest // *Quat. Sci. Rev.*, 2018, v. 181, p. 200—206, doi: 10.1016/j.quascirev.2017.11.036.

**Dunbar N.W., Kyle P.R.** Lack of volatile gradient in the Taupo plinian-ignimbrite transition: Evidence from melt inclusion analysis // *Am. Mineral.*, 1993, v. 78 (5—6), p. 612—618.

**Giordano G., Cas R.A.F.** Classification of ignimbrites and their eruptions // *Earth Sci. Rev.*, 2021, v. 220, 103697, doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103697.

**Johnson E.A., Rossman G.R.** The diffusion behavior of hydrogen in plagioclase feldspar at 800–1000 °C: Implications for re-equilibration of hydroxyl in volcanic phenocrysts // *Am. Mineral.*, 2013, v. 98 (10), p. 1779—1787, doi: 10.2138/am.2013.4521.

**Kotov A.A., Smirnov S.Z., Plechov P.Yu., Persikov E.S., Chertkova N.V., Maksimovich I.A., Karmanov N.S., Buhtiyarov P.G.** Method for determining water content in natural rhyolitic melts by Raman spectroscopy and electron microprobe analysis // *Petrology*, 2021, v. 29 (4), p. 386—403, doi: 10.1134/S0869591121040044.

**Kotov A., Smirnov S., Nizametdinov I., Uno M., Tsuchiya N., Maksimovich I.** Partial melting under shallow-crustal conditions: a study of the Pleistocene caldera eruption of Mendelev volcano, southern Kuril Island Arc // *J. Petrol.*, 2023, v. 64 (6), egad033, doi: 10.1093/petrology/egad033.

**Papale P., Moretti R., Barbato D.** The compositional dependence of the saturation surface of H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub> fluids in silicate melts // *Chem. Geol.*, 2006, v. 229, p. 78—95, doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.01.013.

**Ponomareva V., Bubenshchikova N., Portnyagin M., Zelenin E., Derkachev A., Gorbarenko S., Garbe-Schönberg D., Bindeman I.** Large-magnitude Pauzhetka caldera-forming eruption in Kamchatka: Astrochronologic age, composition and tephra dispersal // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2018, v. 366, p. 1—12, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2018.10.006.

**Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A., Bazanova L.I., Pevzner M.M., Plechova A.A., Rogozin A.N., Garbe-Schönberg D.** TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, v. 12, p. 469—486, doi: 10.5194/essd-12-469-2020.

**Putirka K.D.** Thermometers and barometers for volcanic systems // *Rev. Mineral. Geochem.*, 2008, v. 69 (1), p. 61—120, doi: 10.2138/rmg.2008.69.3.

**Schwartz-Mesa A.C.** Petrogenesis and physical volcanology of a compositionally zoned ignimbrite on Tenerife, Canary Islands, Spain (Doctoral Dissertation). Univ. Leicester, 2016, 291 p.

**Smirnov S.Z., Rybin A.V., Kruk N.N., Timina T.Yu., Sokolova E.N., Kuzmin D.V., Maksimovich I.A., Kotov A.A., Shevko A.Ya., Nizametdinov I.R., Abersteiner A.** Parental melts and magma storage of a large-volume dacite eruption at Vetrovoy isthmus (Iturup Island, Southern Kuril Islands): insights into the genesis of subduction-zone dacites // *J. Petrol.*, 2019, v. 60 (7), p. 1349—1370, doi: 10.1093/petrology/egz032.

**Sobolev A.V., Danyushevsky L.V.** Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas // *J. Petrol.*, 1994, v. 35, p. 1183—1211.