

## ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ МАГМАТИЗМА ВУЛКАНА ГОРЕЛЫЙ (Камчатка): ДАННЫЕ ПО РАСПЛАВНЫМ И ФЛЮИДНЫМ ВКЛЮЧЕНИЯМ

В.А. Симонов<sup>1,3,4</sup>, Н.Л. Добрецов<sup>2,3</sup>, А.В. Котляров<sup>1,4</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 нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>4</sup>Казанский федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия

Исследования расплавных и флюидных включений, минералов, а также расчетное моделирование (на основе данных по составам расплавных включений, клинопироксенов и амфиболов) позволили выявить особенности физико-химических параметров магматических систем в ходе развития докальдерного влк. Пра-Горелый и при формировании последующих современных комплексов влк. Молодой Горелый. Получены температурные характеристики кристаллизации вкрапленников оливина, клинопироксена и плагиоклаза (1115—1260 °С), а также амфибола (740—890 °С), хорошо согласующиеся с ранее опубликованными данными по магматизму влк. Горелый. Расчетное моделирование на основе составов и температур гомогенизации расплавных включений показало, что установленный нами интервал давлений (7.0—0.5 кбар) и соответственно глубин кристаллизации минералов (21.0—1.5 км) можно разбить на два уровня. Эти магматические камеры на глубинах 21—15 км и 9—1.5 км характерны для обоих вулканов — Пра-Горелый и Молодой Горелый. Определены разные температурные режимы с более высокими характеристиками для влк. Пра-Горелый (1240—1190 °С), чем для влк. Молодой Горелый (1190—1125 °С). В первом случае установлено присутствие в плагиоклазе первичных флюидных включений с CO<sub>2</sub> низкой плотности и сингенетичных им первичных расплавных включений, что свидетельствует о кристаллизации минерала из гетерофазного расплава. При этом центральные части вкрапленников плагиоклаза формировались из гомогенного расплава. Резкое падение давления приводило к фазовой сепарации магмы по всей магматической колонне (верхняя и нижняя камеры) и к росту в кристаллах плагиоклаза из двухфазового расплава зон, насыщенных флюидными включениями CO<sub>2</sub>. При закрытии системы и исчезновении самостоятельной фазы CO<sub>2</sub> рост плагиоклаза происходил из гомогенного расплава.

*Расплавные и флюидные (CO<sub>2</sub>) включения, минералы-вкрапленники в эффузивах, промежуточные магматические камеры, P-T-параметры магматизма, влк. Горелый, Камчатка*

## FEATURES OF MINERAL CRYSTALLIZATION AT DIFFERENT STAGES OF THE MAGMATISM EVOLUTION OF THE GORELY VOLCANO (Kamchatka): DATA ON MELT AND FLUID INCLUSIONS

V.A. Simonov, N.L. Dobretsov, A.V. Kotlyarov, N.S. Karmanov, A.A. Borovikov

Studies of melt and fluid inclusions and minerals as well as computational modeling (based on the data on the composition of melt inclusions, clinopyroxenes, and amphiboles) gave an insight into the physicochemical parameters of magmatic systems during the evolution of the precaldera Pra-Gorely Volcano and during the subsequent formation of rock complexes of the Young Gorely Volcano. The estimated temperatures of crystallization of olivine, clinopyroxene, and plagioclase phenocrysts (1115–1260 °C) and amphibole (740–890 °C) are in agreement with the earlier published data on the magmatism of the Gorely Volcano. Computational modeling based on the compositions and homogenization temperatures of melt inclusions showed that the established depth interval of mineral crystallization (21.0–1.5 km) with pressures of 7.0–0.5 kbar can be divided into two ranges, 21–15 km and 9.0–1.5 km. Both the Pra-Gorely and the Young Gorely volcanoes have magma chambers in these depth ranges. The Pra-Gorely Volcano is characterized by higher temperatures of mineral crystallization (1240–1190 °C) as compared with the Young Gorely Volcano (1190–1125 °C). The presence of primary fluid inclusions with low-density CO<sub>2</sub> and of syngenetic primary melt inclusions in plagioclase of the Pra-Gorely Volcano indicates that the mineral crystallized from a heterophase melt. At the same time, the cores of plagioclase phenocrysts formed from a homogeneous melt. A drastic drop in pressure led to the phase separation of magma throughout the magma column (upper and lower chambers) and to the growth of zones saturated with CO<sub>2</sub> fluid inclusions in the plagioclase crystals formed from a two-phase melt. The subsequent closure of the system and the disappearance of CO<sub>2</sub> phase resulted in the growth of plagioclase from a homogeneous melt.

*Melt and fluid (CO<sub>2</sub>) inclusions, mineral phenocrysts in effusive rocks, intermediate magma chambers, P–T conditions of magmatism, Gorely Volcano, Kamchatka*

## ВВЕДЕНИЕ

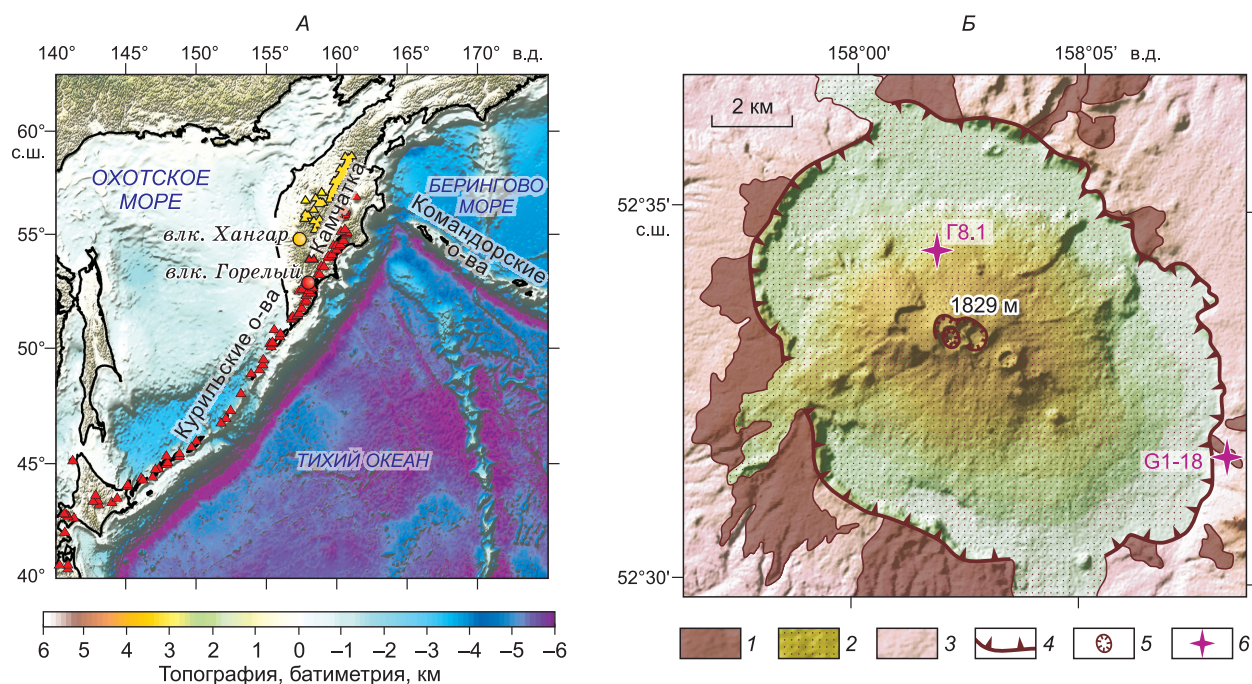
Исследования современных вулканов с кальдерами представляют не только научный интерес, но имеют и большое практическое значение из-за возможных последствий катастрофических извержений. В связи с этим, влк. Горелый (рис. 1), представляющий собой крупный долгоживущий вулканический центр Камчатки и сохраняющий эруптивную деятельность в настоящее время, привлекает к себе внимание многих исследователей. Он является одним из активных вулканов на Южной Камчатке, наряду с Мутновским, Авачинским, Ключевским, Безымянным. В целом с 1945 по 2000 г. на Камчатке произошло около 120 больших и средних извержений длительностью до десятков лет.

В истории развития влк. Горелый наблюдался мощный этап кальдерообразования, во время которого на поверхность было выброшено около 120 км<sup>3</sup> вулканогенного материала и в результате образовалась кальдера размерами около 13×9 км [Bindeman et al., 2010].

Для влк. Горелый характерна еще одна важная особенность — присутствие редких для Камчатки оливин-порфировых высокомагнезиальных базальтов (MgO ~ 11 мас. %) [Гавриленко, Озеров, 2009]. Благодаря своему составу эти породы несут прямую информацию об условиях образования родоначальных магм [Назарова и др., 2017].

В результате всего отмеченного выше, учитывая также доступность, влк. Горелый фактически стал образцовым объектом для изучения эволюции магматических систем, приводящей к катастрофическим извержениям с образованием крупных кальдер и проведения сравнительного анализа полученных разными методами результатов.

В целом исследования влк. Горелый имеют длительную историю, уходящую в начало XX в. [Новограбленов, 1932]. Последующие публикации были посвящены в основном геологическому строению и особенностям процессов извержения магм вулкана [Влодавец, 1957; Кирсанов, 1981, 1985; Кирсанов, Озеров, 1983; Будников, 1988; и др.]. В работах начала XXI века [Duggen et al., 2007; Гавриленко, Озеров, 2009; Чашин, Мартынов, 2011; Gavrilenko et al., 2016] рассматриваются петролого-геохимические характеристики пород влк. Горелый, которые позволили выяснить с помощью ЭВМ-моделирования физико-химические условия формирования и эволюции магм [Чашин и др., 2011]. Большой интерес представляют данные по летучим компонентам вулкана [Aizpra et al., 2012; Чаплыгин и др., 2015]. Получены важные сведения по расплавленным включениям в минералах из эффузивов Горелого [Хетчиков и др., 2000, 2001; Толстых и др., 2012; Назарова и др., 2017], позволившие оценить составы магм и параметры генерации первичных расплавов.



**Рис. 1. Расположение вулкана Горелый (А) и его геологическое строение (Б).**

1 — эффузивные комплексы влк. Пра-Горелый (докальдерная стадия); 2 — эффузивные комплексы влк. Молодой Горелый (современный вулканизм); 3 — эффузивы, сформировавшиеся во время кальдерообразования; 4 — борта кальдеры; 5 — Центральный конус; 6 — места отбора базовых образцов для исследования расплавленных включений. Рисунок построен с использованием материалов из работ [Толстых и др., 2012; Толбачинское..., 2017].

Анализ отмеченных публикаций показал, что геологические, петрологические, геохимические и минералогические свойства эффузивных пород влк. Горелый хорошо охарактеризованы и повторно их изучать не имеет смысла. Проведено ЭВМ-моделирование на основе составов пород. Рассмотрены также свойства расплавных включений в минералах. В частности, в последнее время опубликованы результаты исследования расплавных включений в оливинах [Толстых и др., 2012; Назарова и др., 2017] и в плагиоклазах [Толстых и др., 2012] с информацией по содержанию основных компонентов, редких, редкоземельных элементов и воды в магмах этого вулкана. Соответственно, получить принципиально новые данные, ограничившись только изучением расплавных включений, вряд ли возможно. В то же время обзор имеющейся литературы по влк. Горелый показал, что есть два вопроса, связанных с исследованием включений в минералах из эффузивов вулкана, которые практически не рассмотрены. Во-первых, при расчетном моделировании условий магматических систем не были использованы данные по расплавным включениям, содержащим прямую информацию о минералообразующих средах. Во-вторых, отсутствуют данные по первичным флюидным включениям, содержащим  $\text{CO}_2$  и позволяющим оценить роль углекислого газа в магмах при кристаллизации вкрапленников из эффузивов влк. Горелый. Последнее имеет особую важность в связи с тем, что для этого вулкана устанавливается относительное обеднение  $\text{H}_2\text{O}$  с одновременным обогащением  $\text{CO}_2$  по сравнению с высокотемпературными газами других вулканов Курило-Камчатской дуги [Aizura et al., 2012].

Учитывая все отмеченное выше, целью настоящей статьи было определение физико-химических условий кристаллизации минералов и выяснение роли  $\text{CO}_2$  на докальдерной и посткальдерной стадиях развития магматизма влк. Горелый (Камчатка) с помощью расчетного моделирования на основе составов гомогенизированных расплавных включений и в результате анализа флюидных включений с  $\text{CO}_2$ .

Для решения поставленных задач основное внимание было уделено изучению первичных расплавных включений в минералах из представительных базальтоидных образцов, характеризующих докальдерный (влк. Пра-Горелый) и современный (Молодой Горелый) этапы развития вулканического центра Горелый. С целью сравнительного анализа были исследованы эффузивы влк. Хангар (Южная Камчатка). При этом кроме проб авторов были использованы образцы Р.И. Кулакова (современные породы влк. Горелый) и А.Б. Перепелова (влк. Хангар). В общем необходимо подчеркнуть, что именно составы стекол прогретых гомогенизированных включений послужили основой для расчетного моделирования магматических систем, а первичные флюидные включения с  $\text{CO}_2$  позволили выяснить особенности поведения летучих компонентов в расплавах влк. Горелый.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следует отметить особенности методического подхода, использованного при исследовании магматизма влк. Горелый. Прежде всего известно, что не каждый образец содержит расплавные включения, по которым можно получить достоверную информацию. Поэтому, учитывая значительную трудоемкость экспериментальных исследований включений, мы вынуждены проводить предварительный отбор наиболее перспективных на расплавные включения образцов, содержащих вкрапленники минералов. В итоге мы получаем результаты по включениям для проб, которые с точки зрения геологии и геохимии могут и не являться идеальными представителями магматизма вулкана. Вторая особенность изучения включений связана с представительностью полученных по ним данных. Здесь необходимо подчеркнуть, что минералы-вкрапленники эффузивов выступают как пробоотборники, захватывая расплав, из которого они кристаллизуются, начиная с глубинных камер и заканчивая приповерхностными условиями. Таким образом, изучая включения во вкрапленниках даже одного образца, мы можем получить представительные данные об эволюции магматических систем.

Особое значение имеют исследования сосуществующих первичных расплавных и флюидных включений с  $\text{CO}_2$ , позволяющие рассмотреть процессы фазовой сепарации магм при кристаллизации минералов из эффузивов влк. Горелый.

Детально исследованные образцы базальтов и андезибазальтов вулканов Пра-Горелый и Молодой Горелый содержат свежие вкрапленники минералов, что является необходимым условием при отборе проб для изучения расплавных включений.

При исследовании составов оливинов, клинопироксенов, ортопироксенов, амфиболов и плагиоклазов из эффузивов влк. Горелый исключительное внимание уделялось вкрапленникам, в которых были изучены расплавные включения.

В целом использованный подход включает изучение не только расплавных и флюидных включений, но также анализ таких индикаторных минералов, как пироксены и амфиболы, что позволяет накапливать достаточно представительную и разностороннюю информацию о физико-химических параметрах магматических систем влк. Горелый, которую получить другими методами практически невозможно.

В ходе изучения собранных на влк. Горелый образцов были просмотрены шлифы и тонкие (толщиной около 0.2 мм) полированные с обеих сторон пластинки для выяснения петрографических особен-

ностей, определения минерального состава пород и поиска расплавных включений в минералах. Химические составы пород и минералов (были изучены исключительно вкрапленники), а также включений установлены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) и в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Петрохимические составы пород определены с помощью силикатного рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation. Для получения более представительных выводов использована петрохимическая информация, находящаяся в базе данных GEOROC (GEOROC <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>) и в работе [Толстых и др., 2012].

Исследования расплавных включений в минералах из эффузивов влк. Горелый выполнены в лаборатории геодинамики и магматизма ИГМ СО РАН. Использовался метод гомогенизации, основанный на классических работах, посвященных расплавным включениям [Магматогенная кристаллизация ..., 1975; Соболев и др., 1976; Соболев, Соболев, 1985; Бакуменко, 1986; и др.]. Эксперименты по гомогенизации расплавных включений при высоких температурах проводились в микротермокамере с инертной средой [Соболев, Слущкий, 1984] с применением имеющихся методик [Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994; и др.]. Учитывая, что при высоких температурах некоторые включения фактически уничтожаются (разгерметизируются, проплавляются и т.п.), обычно опыты проводятся с препаратами, содержащими в одном зерне минерала несколько (3—5 штук и более) включений. При этом особое внимание уделялось времени эксперимента — для базальтовых систем выдержка при температуре выше 1000 °С не должна превышать 10 мин для исключения проплавления стенок включений и соответственно завышения температур гомогенизации [Симонов, 1993]. Низкая вязкость и высокая подвижность базальтовых расплавов, развивающихся в результате плавления основной микрозернистой массы (содержащей вкрапленник с включениями), приводят к необходимости завершать опыт сразу же после гомогенизации включений, что фактически сокращает время выдержки при высоких температурах до 5 мин и соответственно предотвращает перегрев системы и завышение температуры гомогенизации. Необходимо отметить, что при завершении эксперимента (мгновенное отключение электрической энергии) в ходе закалки полностью расплавленного содержимого включений практически всегда в гомогенном расплаве появляется газовый пузырек, и в итоге включения содержат гомогенное стекло и округлую газовую фазу. При исследовании на сканирующем микроскопе анализировались гомогенные закалочные стекла, заполняющие весь (кроме газового пузырька) объем прогретых гомогенизированных и закаленных первичных расплавных включений. Следует подчеркнуть, что в статье используются исключительно данные по гомогенным стеклам прогретых гомогенизированных и экспериментально закаленных первичных расплавных включений, отвечающих по химическому составу расплаву, из которого рос минерал.

Составы стекол прогретых в ходе экспериментов расплавных включений и минералов-вкрапленников (оливины, клинопироксены, ортопироксены, плагиоклазы, а также амфиболы) определены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU [(Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd)] при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и живом времени набора спектров 20 с. При данных условиях анализа погрешность определения основных компонентов ( $C \geq 10$ —15 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].

Изучение флюидных включений в минералах из эффузивов влк. Горелый проводилось в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. Включения в оливине и в плагиоклазе исследовались методами криометрии с использованием микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam» (Англия), управляемой компьютером, и микроскопа «Olympus B51», снабженного набором длиннофокусных объективов и видеокамерой. Анализ состава флюидной фазы включений проводился методом КР-спектроскопии при помощи спектрометра Jobin Yvon LabRAM HR800. Для определения присутствия паров воды в составе включений методом КР-спектроскопии препараты нагревались до температуры 140 °С при помощи микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam».

В целом, для выяснения физико-химических параметров расплавов при кристаллизации вкрапленников эффузивов влк. Горелый использовалась последовательная система обработки полученных данных по расплавным включениям и минералам. Прежде всего, в результате высокотемпературных экспериментов в микрокамере определялись температуры гомогенизации включений, отвечающие температурам их захвата минералом и, соответственно, температурам его кристаллизации. В последующем анализировались химические составы стекол прогретых гомогенизированных включений, полученных при их закалке в микротермокамере. В результате мы имеем прямые экспериментальные и фактические данные о составе расплава и температуре кристаллизации минерала из этого расплава, на основе которых можно рассчитать давление. Расчеты проводились с помощью программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], позволяющей установить давление ликвидусной кристаллизации мине-

ралов на основе информации о составе расплава и о его температуре. Практически при выполнении расчетов в программу PETROLOG вводятся составы стекол гомогенизированных расплавных включений и определяются давления, при которых температуры расчетной ликвидусной кристаллизации наиболее близки к экспериментальным температурам гомогенизации расплавных включений. Таким образом, на основе экспериментальных данных по расплавным включениям устанавливаются физико-химические параметры (температуры, давления и составы расплавов) магматических систем, и они характеризуют в основном начало кристаллизации вкрапленников.

Дополнительно к отмеченной выше методике для определения *PT*-условий кристаллизации вкрапленников пироксена использована современная (2018 г.) программа WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) [Yavuz, Yildirim, 2018]. Состав расплава был оценен на основе анализа стекол прогретых гомогенизированных включений в изучаемых клинопироксенах из эффузивов влк. Горелый. При этом был применен целый ряд известных термобарометров, приведенных в работах [Putirka, 2008; Masotta et al., 2013; и др.]. Необходимо подчеркнуть, что результаты расчетов с использованием составов пироксенов в обязательном порядке были протестированы в сравнении с *PT*-параметрами, полученными исключительно на основе данных по расплавным включениям.

В дальнейшем, на основе данных по расплавным включениям проводилось моделирование условий кристаллизации минералов с помощью программы COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004].

Для расчета давлений и температур магматических процессов также были применены амфиболовые барометры [Johnson, Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; и др.] и термобарометры [Ridolfi et al., 2010]. Значительная часть этих термобарометров успешно апробирована нами ранее при исследовании вулканизма Камчатки [Добрецов и др., 2016, 2017, 2019].

Глубины кристаллизации минералов в магматических камерах были оценены на основе давлений, установленных с помощью отмеченных выше программ. При этом использовались разные плотностные характеристики. В случае влк. Пра-Горелый наиболее детально нами изучались оливиновые базальты и при расчетах глубин учитывалась плотность пород базальтового состава, которая, согласно справочным данным из Интернета, имеет следующие значения: базальт (твердая фаза) — около 2.97 г/см<sup>3</sup>, диабаз-базальт — 2.7—3.3 г/см<sup>3</sup>, невыветренное габбро — 2.8—3.2 г/см<sup>3</sup>. Нами использовалось среднее из всех этих данных — около 3 г/см<sup>3</sup>. В то же время для влк. Молодой Горелый основное внимание было уделено исследованиям включений в минералах из андезибазальтов, и для оценки глубин кристаллизации использовались значения плотности именно этих пород, установленные для влк. Безымянный на Камчатке [Ладыгин и др., 2012] — в среднем около 2.85 г/см<sup>3</sup>. В целом, учитывая плотностные характеристики базальтовых (около 3 г/см<sup>3</sup>) и андезибазальтовых (около 2.85 г/см<sup>3</sup>) пород, при сравнении с данными по обычной стандартной воде (давление в 1 кбар соответствует столбу H<sub>2</sub>O высотой 10.2 км) было выяснено, что 1 кбар достигается на глубине 3.4 км при базальтовой системе и 3.6 км при андезибазальтовой. Эти данные составляют основу оценки глубин кристаллизации минералов влк. Горелый.

Глубины кристаллизации клинопироксенов дополнительно были оценены напрямую по программе [Yavuz, Yildirim, 2018] с применением плотностно-глубинных моделей для островодужной коры. В частности, применены данные по островным дугам, одна из которых (Jurassic Talkeetna arc, Alaska) располагается на северо-восточном продолжении Алеутской дуги и имеет в общем базальтовый (а также, возможно, андезибазальтовый) состав коры [DeBari, Greene, 2011]. Учитывая эту информацию (относительная близость объектов и совпадающий состав коры), мы имеем вполне достаточно оснований использовать полученные с помощью программы [Yavuz, Yildirim, 2018] данные по глубинам кристаллизации клинопироксенов влк. Горелый.

В общем рассчитанные разными методами результаты сравнивались между собой и тестировались сейсмическими данными как по влк. Горелый [Kuznetsov et al., 2017; Selyangin, 2019; и др.], так и по другим вулканам Камчатки [Добрецов и др., 2016, 2017, 2019]. При этом необходимо отметить, что полученные нами данные по глубинам кристаллизации минералов не претендуют на высокую точность, показывая в то же время основные закономерности эволюции магматических систем, позволяющие выявить характерные черты отдельных (на разных уровнях) магматических камер.

В целом следует подчеркнуть, что при выборе методов изучения условий кристаллизации минералов из эффузивов влк. Горелый с помощью включений необходимо было учитывать данные, полученные ранее другими исследователями. В частности, содержания редких и редкоземельных элементов, а также воды в расплавных включениях приведены в работе [Толстых и др., 2012]. Кроме того, детально изучены расплавные включения в оливинах из высокомагнезиальных базальтов [Назарова и др., 2017]. При этом составы стекол данных включений были скорректированы до равновесия с оливином-хозяином в программе Petrolog 3.0 и рассчитано содержание H<sub>2</sub>O [Назарова и др., 2017].

В связи с этим мы старались проводить исследования, чтобы полученные результаты, с одной стороны, были необходимы и достаточны для выполнения поставленных локальных задач, а с другой, — не повторяли уже опубликованную информацию. Учитывая, что данные по содержанию основных петрохимических компонентов в стеклах прогретых гомогенизированных включений позволяют проводить расчеты *PT*-параметров кристаллизации минералов с помощью программ *PETROLOG* и *SOMAGMAT*, а данные по редким и редкоземельным элементам в расплавных включениях в минералах из эффузивов влк. Горелый уже опубликованы [Толстых и др., 2012], повторение подобных геохимических исследований не имело оснований.

Учитывая также, что изученный в работе [Назарова и др., 2017] образец отобран из базальтов практически того же комплекса, что и наша проба оливинового базальта, полностью повторять исследования включений в оливинах с расчетами их составов вряд ли было целесообразно. В то же время, принимая во внимание важную роль железа, были проведены пересчеты установленных нами составов включений в оливинах влк. Горелый с помощью программы *PETROLOG* с учетом информации из статьи [Назарова и др., 2017].

### ГЕОЛОГО-ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭФФУЗИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВЛК. ГОРЕЛЫЙ

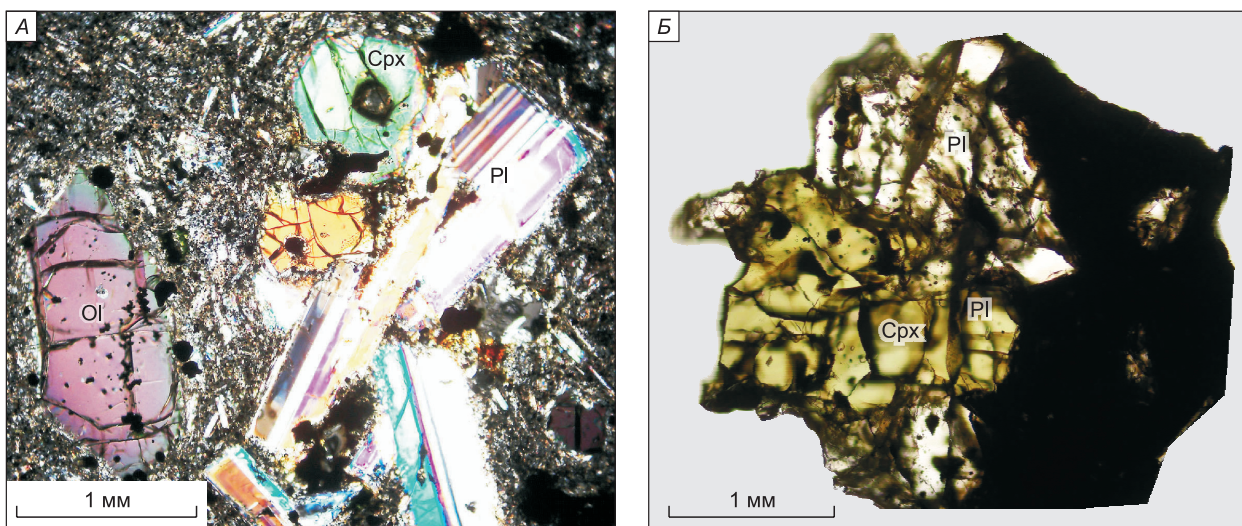
Вулкан Горелый расположен в тыловой части вулканического фронта Южной Камчатки [Селянгин, Пономарева, 1999]. Он представляет собой крупный долгоживущий щитовой вулканический центр, сохраняющий эруптивную активность в настоящее время (извержения происходили в 1980—1981 и в 1984—1986 гг.) и имеет сложное строение. Выделяются несколько комплексов, но в целом в строении влк. Горелый участвуют две основные постройки — древняя и современная (см. рис. 1). Древняя структура (Пра-Горелый) имеет щитообразную форму. В центре ее расположена кальдера диаметром более 10 км. Современная постройка (Молодой Горелый), занимающая центральную часть кальдеры, представлена тремя слившимися конусами. Абсолютная высота центрального конуса 1829 м. На вершине имеется 11 кратеров, наложенных друг на друга, а на склонах — около 40 побочных прорывов с лавовыми потоками различной протяженности [Селянгин, Пономарева, 1999; Гавриленко, Озеров, 2009; Толстых и др., 2012; и др.].

Магматические серии вулканов Пра-Горелый и Молодой Горелый формировались в разное время практически на одном месте. Между ними наблюдался мощный этап кальдерообразования, во время которого на поверхность было выброшено около 100—120 км<sup>3</sup> вулканогенного материала и образовалась кальдера диаметром более 12 км, что привело к масштабной перестройке всей системы [Гавриленко, Озеров, 2009; Bindeman et al., 2010].

**Вулкан Пра-Горелый** сложен эффузивными комплексами позднего миоцена—раннего плейстоцена (базальты, андезиты, дациты, риолиты), в составе которых присутствуют оливин-порфиновые высокомагнезиальные базальты ( $MgO \sim 11$  мас. %) [Гавриленко, Озеров, 2009]. Благодаря высокому содержанию магния, эти породы считаются «примитивными», так как могут нести информацию об условиях образования первичных (ранних) магм влк. Горелый и поэтому привлекают внимание многих исследователей [Duggen et al., 2007; Гавриленко, Озеров, 2009; Толстых и др., 2012; Назарова и др., 2017].

Этим (важным с точки зрения выяснения параметров магматических систем) высокомагнезиальным базальтам было уделено самое пристальное внимание. Детально изученный образец оливинового базальта (G1-18) отобран нами в 2018 г. во время экскурсии, проведенной под руководством д.г.-м.н. Ю.А. Озерова (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН). Был опробован раннеплейстоценовый лавовый поток, относящийся к влк. Пра-Горелый и располагающийся на северо-западном склоне сопки Двугорбая. При этом точка опробования ( $52.531^{\circ}$ с.ш.;  $158.136^{\circ}$ в.д.) находится в 350 м на ЮВ от места отбора образцов оливин-порфировых базальтов между горами Двугорбая и Скалистая ( $52.531^{\circ}$ с.ш.;  $158.134^{\circ}$ в.д.), изученных ранее [Назарова и др., 2017]. Судя по схеме на рис. 1 [Толстых и др., 2012], здесь же отобраны магнезиальные базальты докальдерной стадии, в оливине из которых были исследованы расплавные включения [Толстых и др., 2012].

Изученные оливиновые базальты содержат вкрапленники с расплавными включениями, причем фенокристы клинопироксена и плагиоклаза тесно ассоциируют друг с другом, а вкрапленники оливина находятся в стороне от сростков первых двух минералов (рис. 2, А). По своим размерам (до 3 мм) большинство фенокристаллов оливина заметно превосходят кристаллы клинопироксена (до 1.5—2.0 мм) и плагиоклаза (до 1.5 мм). В целом, судя по размерам, взаимоотношениям и степени идиоморфизма различных вкрапленников, оливин кристаллизовался первым, а уже потом шло фактически совместное образование клинопироксена и плагиоклаза. Редкие микровкрапленники (около 0.5 мм) амфибола коричневатого цвета располагаются в основной микрозернистой массе независимо от других фенокристов. Как показали детальные исследования с помощью сканирующего микроскопа, рассмотренные амфиболы находятся в тесном сростании исключительно с плагиоклазом (рис. 3), имеющим, как будет



**Рис. 2. Особенности минерального состава базовых образцов для исследования включений минералообразующих сред в эффузивах влк. Горелый.**

*А* — соотношение фенокристаллов в оливиновом базальте влк. Пра-Горелый (обр. G1-18). Ol — оливин, Cpx — клинопироксен, Pl — плагиоклаз. *Б* — одновременная кристаллизация вкрапленников клинопироксена (Cpx) и плагиоклаза (Pl) в андезибазальте влк. Молодой Горелый (Г8-1).

показано далее, несколько иной состав по сравнению с преобладающими вкрапленниками, содержащими расплавные включения.

**Вулкан Молодой Горелый**, сложенный современными эффузивными комплексами (базальты, андезибазальты, андезиты, дациты), занимает центральную часть кальдеры и состоит из нескольких слившихся конусов высотой до 1829 м [Гавриленко, Озеров, 2009; Толстых и др., 2012].

Детально изученный нами образец (Г8-1) андезибазальта был отобран (52.574°с.ш.; 158.030°в.д.) в 2 км к северу от вершины центрального конуса влк. Горелый (сопка Горелая, 1829 м) из лавовых потоков современного этапа вулканизма. Порода содержит вкрапленники клинопироксена и плагиоклаза (размерами до 2 мм) с расплавными включениями. Судя по взаимоотношениям (см. рис. 2, *Б*), эти сосуществующие минералы кристаллизовались одновременно. Отдельные, достаточно редкие вкрапленники (до 1 мм) оливина ортопироксена находятся в основной массе андезибазальтов влк. Молодой Горелый, не образуя сростки с другими фенокристами.

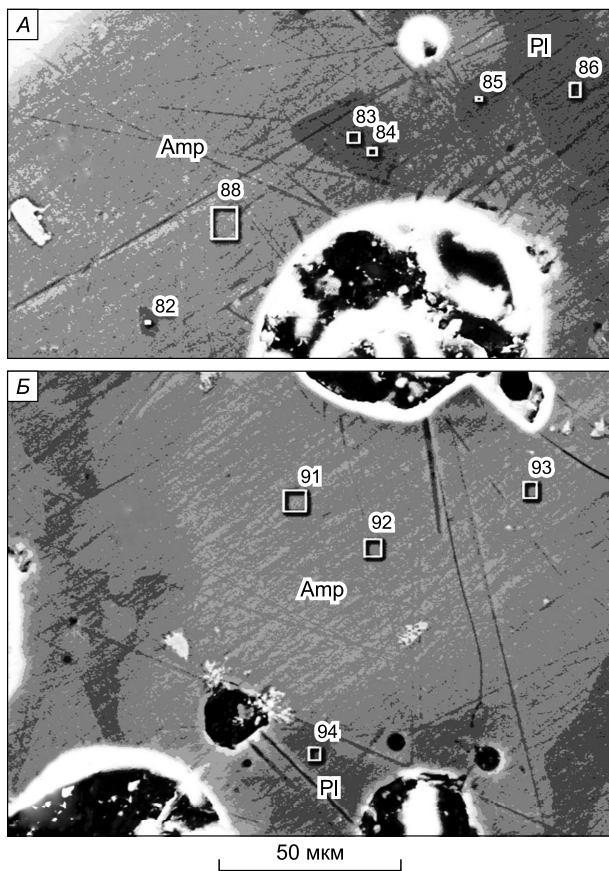
**Петрохимические особенности эффузивов.** На основе опубликованных [Гавриленко, Озеров, 2009; Толстых и др., 2012; GEOROC <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>] и оригинальных данных (табл. 1) были рассмотрены особенности составов эффузивных пород влк. Горелый. Прежде всего, уточнено, что по своему петрохимическому составу детально изученные нами образцы относятся к базальту (G1-18) и андезибазальту (Г8-1).

Как показали предыдущие работы, по химическому составу эффузивы влк. Горелый представляют ассоциацию пород от базальтов до риолитов [Кирсанов, Мелекесцев, 1991; Мартынов и др., 1995; Селянгин, Пономарева, 1999; Чашин, 1999; Гавриленко, Озеров, 2009]. Исследования позволили выделить две эволюционные серии пород. Вулкан Пра-Горелый представлен базальт-андезит-дацит-риолитовой ассоциацией, в пределах которой обнаружены высокомагнезиальные базальты. Постройка влк. Молодой Горелый сложена серией базальтовых, андезитовых и дацитовых эффузивов. Реконструкция показывает, что обе серии влк. Горелый представляют собой родственные ряды пород, которые прошли

Таблица 1. Оригинальные анализы (мас. %) эффузивных пород влк. Горелый

№ п/п	№ образца	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	Сумма
1	G1-18	49.15	1.02	15.61	11.03	0.18	10.45	8.97	2.68	0.85	0.25	-0.61	99.58
2	Г8-1	53.11	1.16	16.6	9.76	0.17	5.37	7.97	3.34	1.43	0.41	0.18	99.5

Примечание. 1 — оливиновый базальт влк. Пра-Горелый; 2 — андезибазальт влк. Молодой Горелый.



**Рис. 3. Сложное строение вкрапленников, содержащих амфиболы в сростании с плагиоклазом в оливинном базальте влк. Пра-Горелый (обр. G1-18).**

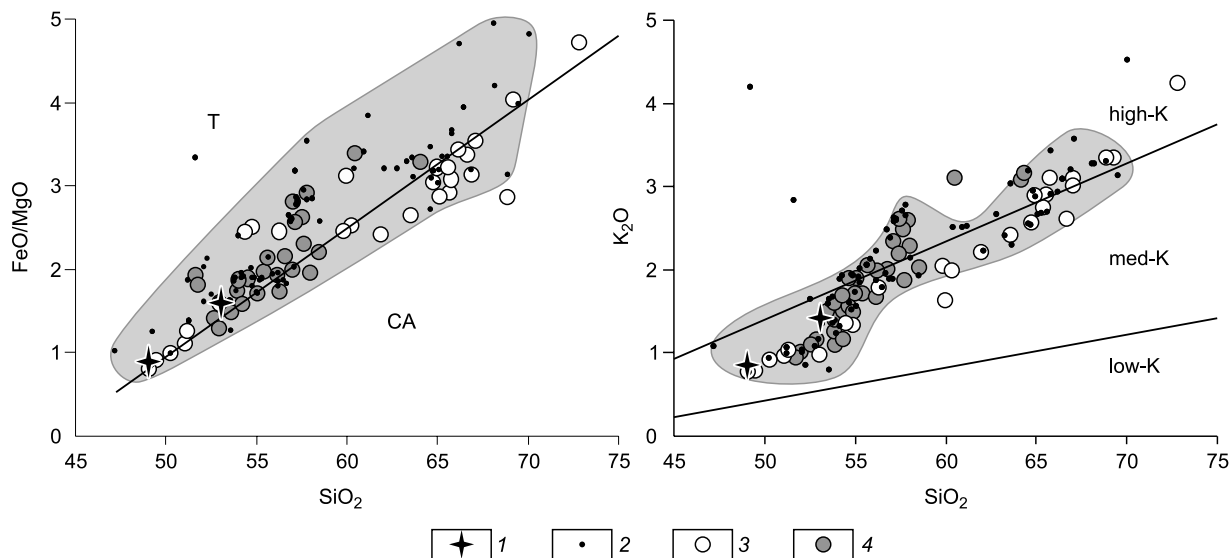
Amp — амфибол, Pl — плагиоклаз. Цифрами показаны точки анализа составов минералов: № 88, 91, 92, 93 — амфибол, № 82, 83, 84, 85, 86 — плагиоклаз (см. табл. 2). Вид в сканирующем микроскопе.

сходные этапы фракционирования [Гавриленко, Озеров, 2009].

Проведенный нами петрохимический анализ подтверждает в целом сходство отмеченных выше серий эффузивов, показывая закономерные изменения их составов с повышением железистости и содержания калия на фоне роста  $\text{SiO}_2$ . При этом тренды эволюции приурочены к пограничным областям между толеитами и известково-щелочными сериями, а также между высококалиевыми и умеренно калиевыми породами. В то же время отчетливо видны существенно более широкие вариации составов эффузивов влк. Пра-Горелый с трендами более медленного накопления (в частности  $\text{K}_2\text{O}$ ) по сравнению с данными по современному влк. Молодой Горелый (рис. 4).

Петрохимические исследования показали, что магматизм изученных вулканов Пра-Горелый и Молодой Горелый обладает как общими чертами

ми, отражающимися в закономерной эволюции составов пород (в частности, увеличения железистости и содержания калия на фоне роста кремнезема), так и отличиями по масштабам вариации, прежде всего  $\text{SiO}_2$  и скорости накопления  $\text{K}_2\text{O}$  и FeO.



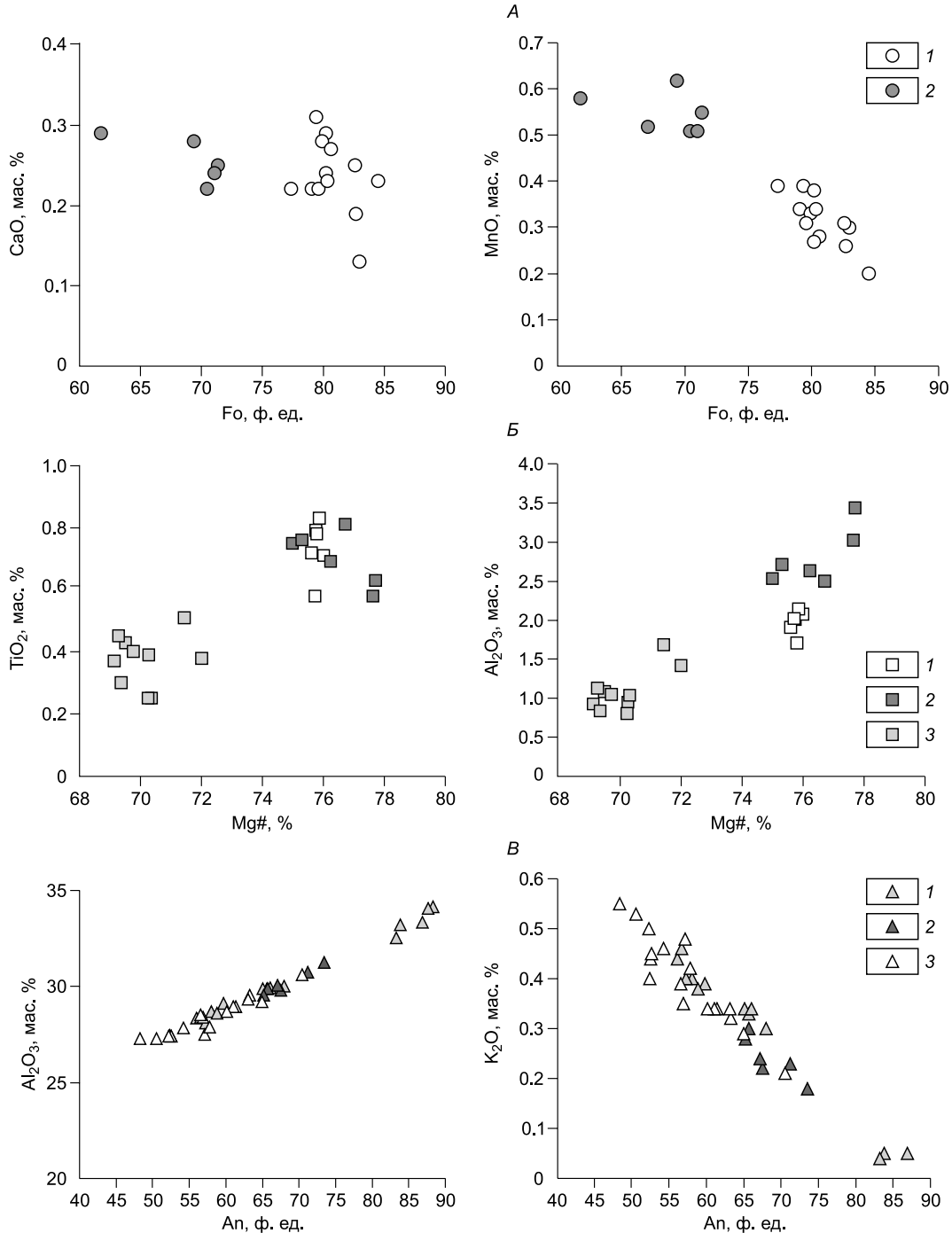
**Рис. 4. Составы (мас. %) эффузивов влк. Горелый.**

1 — образцы, в которых исследованы расплавные включения; 2 — составы эффузивов влк. Горелый в целом, взятые из опубликованных материалов; 3 — эффузивы вулкана Пра-Горелый; 4 — эффузивы влк. Молодой Горелый. Серии толеитовых (Т) и известково-щелочных (СА) пород. Высококалиевые (high-K), умеренно калиевые (med-K) и низкокалиевые (low-K) эффузивы. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ [Miyshiro, 1970; Le Maitre et al., 1989; Гавриленко, Озеров, 2009; Петрографический кодекс..., 2009; Толстых и др., 2012; GEOROC <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc>].



## СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ ИЗ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД

В данном разделе содержится информация о составах вкрапленников оливина, клинопироксена, ортопироксена и плагиоклаза из эффузивов влк. Горелый, в которых были изучены расплавные включения. Приводятся также данные о составах микровкрапленников амфибола, находящихся в тесном сростании с плагиоклазом. Оригинальные анализы вкрапленников минералов приведены в табл. 2 и использованы при построении рис. 5.



**Рис. 5. Составы вкрапленников из эффузивов влк. Горелый.**

*А* — 1 — оливины из оливинового базальта, влк. Пра-Горелый; 2 — оливины из андезибазальта, влк. Молодой Горелый. *Б* — 1 — клинопироксены из оливинового базальта, влк. Пра-Горелый; 2, 3 — клинопироксены (2) и ортопироксены (3) из андезибазальта, влк. Молодой Горелый. *В* — 1, 2 — плагиоклазы из оливинового базальта, влк. Пра-Горелый (1 — вкрапленники с расплавными включениями, 2 — плагиоклазы в сростании с амфиболом); 3 — плагиоклазы из андезибазальта, влк. Молодой Горелый. Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работы [Толстых и др., 2012].

Таблица 2. Представительные оригинальные анализы (мас. %) вкрапленников минералов из эффузивов влк. Горелый

Оливины									
№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Сумма	Fo
1	1	38.73	18.81	0.34	41.67	0.22	0.24	100.01	79.06
2	2	38.91	18.57	0.39	41.82	0.31	0.00	100.00	79.38
3	3	38.58	20.40	0.39	40.41	0.22	0.00	100.00	77.36
4	204	38.99	17.68	0.38	42.41	0.29	0.26	100.01	80.18
5	205	38.98	17.93	0.33	42.21	0.28	0.27	100.00	79.93
6	206	38.99	18.27	0.31	41.91	0.22	0.31	100.01	79.58
7	15	39.58	15.40	0.30	44.25	0.13	0.35	100.01	82.95
8	16	39.23	15.72	0.26	44.28	0.19	0.32	100.00	82.68
9	17	39.18	16.00	0.31	44.26	0.25	0.00	100.00	82.58
10	29	39.22	17.62	0.28	42.60	0.27	0.00	99.99	80.62
11	30	39.04	17.84	0.27	42.35	0.24	0.26	100.00	80.17
12	31	39.05	17.66	0.34	42.48	0.23	0.25	100.01	80.33
13	173	37.53	26.52	0.52	32.62	1.15	н.о.	98.34	67.08
14	174	37.58	25.93	0.51	35.75	0.22	»	99.99	70.44
15	175	37.48	25.23	0.55	36.49	0.25	»	100.00	71.35
16	176	37.19	26.70	0.62	35.21	0.28	»	100.00	69.38

Примечание. 1—12 — оливины из оливинового базальта влк. Пра-Горелый; 13—16 — оливины из андезибазальта влк. Молодой Горелый. н.о. — содержание компонента не определялось. Fo — значения форстеритового компонента (%).

Пироксены											
№ 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	Сумма	Mg#
1	102	51.57	0.79	2.01	8.96	0.41	15.72	20.09	0.46	100.01	75.77
2	103	51.50	0.71	2.07	9.01	0.45	16.04	19.83	0.40	100.01	76.03
3	104	51.72	0.78	1.71	8.94	0.41	15.72	20.25	0.48	100.01	75.81
4	105	51.63	0.72	1.90	9.16	0.40	15.95	19.81	0.43	100.00	75.63
5	106	51.56	0.83	2.14	8.97	0.51	15.84	19.79	0.37	100.01	75.89
6	186	51.26	0.81	2.50	8.32	0.22	15.40	21.20	0.29	100.00	76.74
7	187	51.17	0.69	2.63	8.53	0.25	15.37	21.12	0.25	100.01	76.25
8	188	50.88	0.75	2.53	9.23	0.28	15.55	20.49	0.29	100.00	75.01
9	195	50.67	0.63	3.43	8.17	0.22	16.00	20.04	0.41	99.57	77.73
10	196	51.24	0.58	3.02	8.23	0.00	16.05	20.21	0.38	99.71	77.65
11	197	50.88	0.76	2.71	9.27	0.26	15.88	19.75	0.30	99.81	75.32
12	118	53.07	0.37	0.92	19.03	0.52	23.96	2.12	н.о.	99.99	69.17
13	155	53.37	0.39	0.95	18.39	0.50	24.42	1.98	»	100.00	70.29
14	157	52.89	0.51	1.68	17.49	0.44	24.59	2.40	»	100.00	71.47
15	158	53.51	0.25	1.04	18.30	0.60	24.39	1.90	»	99.99	70.37
16	159	53.46	0.25	0.80	18.49	0.57	24.52	1.92	»	100.01	70.27
17	160	53.06	0.30	0.84	19.00	0.55	24.16	2.09	»	100.00	69.38
18	164	53.56	0.38	1.42	16.99	0.63	24.56	2.22	»	99.76	72.04
19	167	52.87	0.43	1.08	18.87	0.59	24.16	1.99	»	99.99	69.53
20	168	53.45	0.40	1.05	18.58	0.52	24.07	1.93	»	100.00	69.78

Примечание. 1—11 — клинопироксены; 12—20 — ортопироксены; 1—5 — пироксены из оливинового базальта влк. Пра-Горелый; 6—20 — пироксены из андезибазальта влк. Молодой Горелый. Mg# = Mg·100/(Mg + Fe) (ф. ед.).

Амфиболы												
№ 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	Al <sup>IV</sup>
1	88	50.64	1.96	12.70	10.43	н.о.	7.13	10.81	2.82	0.94	97.43	0.39
2	91	50.29	1.43	9.21	10.56	0.27	9.96	13.73	1.70	0.57	97.72	0.41
3	92	50.95	1.17	10.78	9.96	0.00	9.02	13.30	2.06	0.76	98.00	0.33
4	93	50.92	1.30	9.43	10.79	0.21	9.60	13.15	1.93	0.66	97.99	0.35

Примечание. 1—4 — амфиболы из оливинового базальта влк. Пра-Горелый в тесном сростании с плагиоклазом. Al<sup>IV</sup> — алюминий в четверной координации (ф. ед.).

Плагиоклазы									
№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Ап
1	35	53.50	28.71	0.73	12.10	4.57	0.40	100.01	58.04
2	46	53.71	28.41	0.78	11.89	4.74	0.46	99.99	56.58
3	47	52.51	29.14	0.84	12.65	4.46	0.39	99.99	59.71
4	52	50.97	30.01	0.84	14.34	3.54	0.30	100.00	67.95
5	53	51.31	29.89	0.78	13.90	3.80	0.33	100.01	65.66
6	62	45.40	34.06	0.68	18.42	1.43	0.00	99.99	87.68
7	70	51.73	29.87	0.78	13.49	3.79	0.34	100.00	65.00
8	71	51.38	29.91	0.77	13.87	3.72	0.34	99.99	66.03
9	80	53.85	28.11	0.84	12.07	4.72	0.40	99.99	57.24
10	81	53.39	28.60	0.91	12.23	4.49	0.38	100.00	58.78
11	161	45.98	33.35	0.52	17.58	1.43	0.05	98.91	86.91
12	161	46.59	33.19	0.49	17.06	1.79	0.05	99.17	83.80
13	82	50.76	29.81	1.40	14.18	3.63	0.22	100.00	67.49
14	83	49.92	30.73	1.17	14.78	3.16	0.23	99.99	71.15
15	84	51.28	29.89	1.07	13.70	3.76	0.30	100.00	65.67
16	85	50.91	30.06	1.22	13.94	3.62	0.24	99.99	67.10
17	86	49.14	31.26	1.06	15.40	2.96	0.18	100.00	73.44
18	94	51.67	29.55	1.08	13.58	3.83	0.28	99.99	65.15
19	119	55.12	27.44	0.88	10.92	5.23	0.40	99.99	52.35
20	120	55.15	27.43	0.95	10.88	5.15	0.44	100.00	52.50
21	121	55.22	27.43	0.76	10.97	5.18	0.45	100.01	52.54
22	127	52.14	29.53	0.84	13.16	4.02	0.32	100.01	63.22
23	128	52.68	28.94	0.87	12.90	4.27	0.34	100.00	61.34
24	129	52.02	29.22	0.83	13.73	3.91	0.29	100.00	64.92
25	139	55.32	27.43	0.80	10.82	5.14	0.50	100.01	52.23
26	140	50.56	30.62	0.81	14.57	3.24	0.21	100.01	70.44
27	141	55.49	27.28	0.85	10.51	5.34	0.53	100.00	50.52
28	142	52.53	29.33	0.75	13.04	4.00	0.34	99.99	63.05
29	149	53.91	28.40	0.98	11.70	4.67	0.35	100.01	56.89
30	150	52.80	28.97	0.78	12.81	4.30	0.34	100.00	61.01
31	151	53.24	28.70	0.87	12.49	4.35	0.34	99.99	60.15
32	154	53.94	27.49	1.72	11.79	4.58	0.48	100.00	57.10
33	163	53.72	27.90	1.45	11.96	4.56	0.42	100.01	57.75

Примечание. 1—18 — плагиоклазы из оливинового базальта влк. Пра-Горелый (1—12 — вкрапленники с расплавленными включениями, 13—18 — плагиоклазы в сростках с амфиболами); 19—33 — плагиоклазы из андезибазальта влк. Молодой Горелый. Ап — содержание анортитового компонента (%).

**Оливины** из базальтов влк. Пра-Горелый существенно отличаются от оливинов андезибазальтов влк. Молодой Горелый повышенными значениями форстеритового компонента (соответственно  $Fo = 77—85$  по сравнению с  $Fo = 62—71$ , ф. ед.) и пониженным содержанием марганца (соответственно  $MnO 0.2—0.39$  и  $0.51—0.62$  мас. %). Относительно высокие значения  $Fo$ , установленные нами в оливинах из магнезиальных базальтов, согласуются с данными других исследователей оливиновых вкрапленников в подобных породах влк. Горелый ( $Fo = 71—85$  ф.ед. [Толстых и др., 2012];  $Fo = 84—85$  ф. ед., [Назарова и др., 2017]) (см. рис. 5, А).

**Ортопироксены** из андезибазальтов влк. Молодой Горелый по соотношению миналов ( $En—Wo—Fs$ ) относятся к гиперстену. Для них намечается некоторый рост содержания  $Al_2O_3$  с повышением магнезиальности (см. рис. 5, Б).

**Клинопироксены** из базальтов и андезибазальтов влк. Горелый по соотношению миналов ( $En—Wo—Fs$ ) относятся в большинстве случаев к авгиту. Клинопироксены из базальта Пра-Горелого менее магнезиальны и содержат меньше алюминия по сравнению с пироксенами из андезибазальта влк. Молодой Горелый. В целом для клинопироксенов влк. Горелый намечается накопление  $Al_2O_3$  на фоне повышения магнезиальности (см. рис. 5, Б).

**Плагиоклазы** из базальтов влк. Горелый наиболее детально изучались в ходе исследования расплавных включений. В таблице 2 представлены составы полевых шпатов, проанализированных преимущественно рядом с расплавными включениями. По содержанию (ф. ед.) анортитового компонента ( $57—87 An$ ) плагиоклаз из магнезиального базальта влк. Пра-Горелый соответствует лабрадору и битовниту. При этом плагиоклазы, находящиеся в тесном сростании с амфиболами, характеризуются минимальными ( $0.18—0.3$  мас. %) содержаниями калия и повышенными значениями алюминия ( $30—31$  мас. %) и анортитового компонента ( $65—74 An$ ), а также максимальным количеством железа по сравнению с основной группой вкрапленников плагиоклаза.

Плагиоклазы из андезибазальта влк. Молодой Горелый обладают в общем меньшими значениями анортитового компонента ( $48—70 An$ ) и отвечают в основном лабрадору, но представляют также и андезин (с  $An$  до 50). В целом составы плагиоклазов этих двух вулканов в значительной мере перекрываются (см. рис. 5, В).

**Амфиболы** были изучены только в магнезиальных оливиновых базальтах влк. Пра-Горелый. Редкие микровкрапленники (около 0.5 мм) коричневатого цвета находятся в тесном сростании с плагиоклазом (см. рис. 3). По своему составу (см. табл. 2) они наиболее близки, по классификации [Leake et al., 1997], к эденитам. Согласно более современной классификации [Hawthorne et al., 2012], большинство изученных амфиболов принадлежат к кальциевой группе и соответствуют паргаситам.

## РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ

Были изучены расплавные включения в оливине, клинопироксене и в плагиоклазе из оливин-порфировых магнезиальных базальтов влк. Пра-Горелый (рис. 6, 7), а также в оливине, ортопироксене, клинопироксене и в плагиоклазе из андезибазальтов влк. Молодой Горелый (рис. 8).

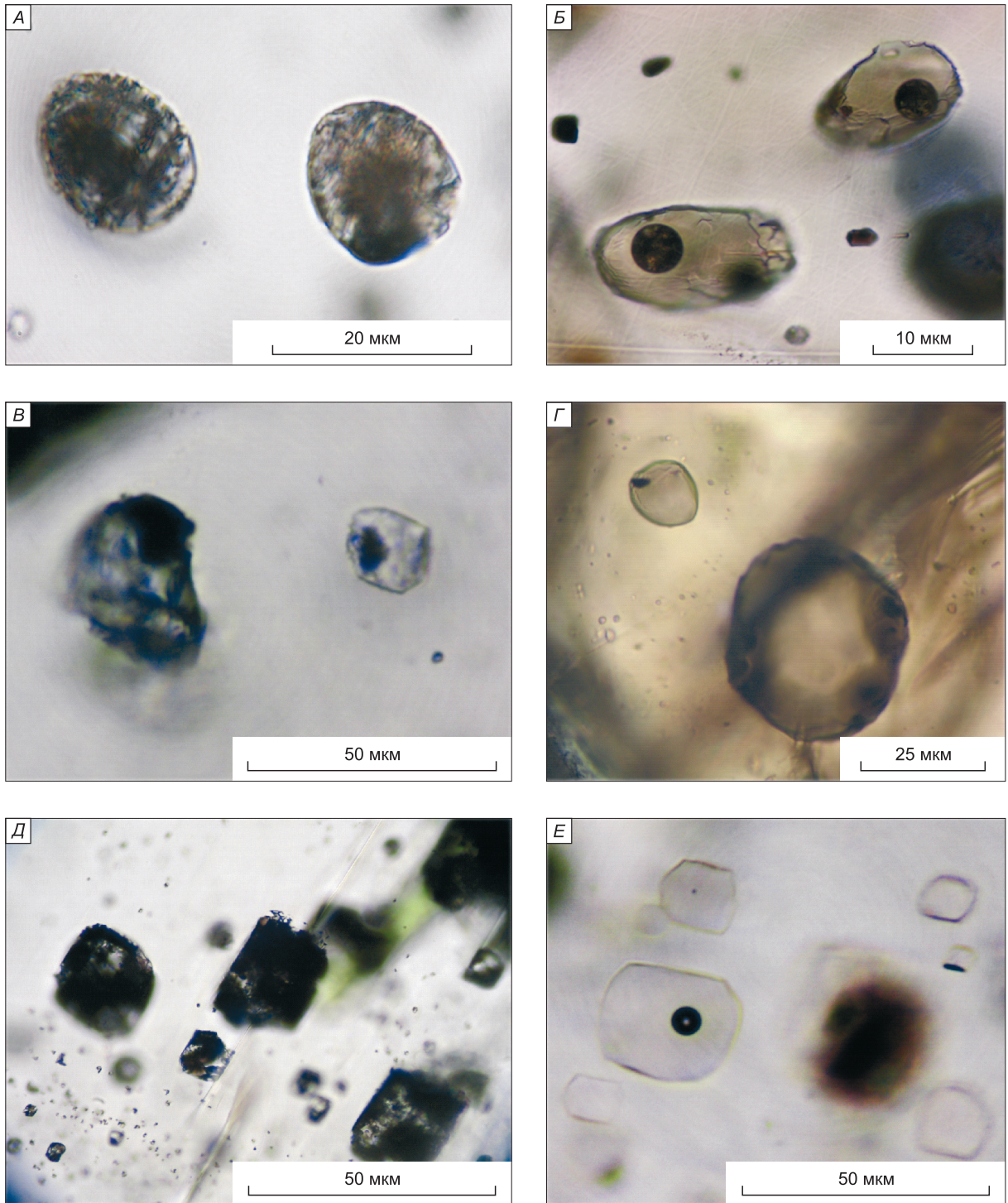
**Вулкан Пра-Горелый.** Первичные расплавные включения (размеры  $10—75$  мкм) в *оливине* (см. рис. 6, А) располагаются равномерно по всему вкрапленнику и часто приурочены к его центральным зонам. Объемные округло-ограниченные включения содержат фазы, среди которых можно различить светлые анизотропные кристаллики, светлое стекло, флюидный пузырек и темные рудные фазы. Встречаются включения, содержащие несколько флюидных пузырьков, что свидетельствует о насыщенности расплавов летучими компонентами. Эксперименты в микротермокамере с инертной средой (на открытом воздухе оливин темнеет) показали, что гомогенным содержимое большинства включений в оливине становится в диапазоне температур  $1195—1245$  °С. Часть мелких включений гомогенизируется при температуре около  $1170$  °С. После прогрева и закалки включения содержат гомогенное светло-коричневое стекло и флюидный пузырек (см. рис. 6, Б).

Необходимо отметить, что среди первичных расплавных включений в оливине встречаются разности с аномально большими флюидными фазами, анализ которых с помощью криометрии и КР-спектроскопии свидетельствует о преобладании в них углекислоты (см. рис. 7, А, Б).

В *клинопироксене* первичные расплавные включения ( $10—40$  мкм) располагаются равномерно по вкрапленнику. Включения содержат несколько светлых (анизотропные кристаллики плагиоклаза и пироксена, стекло) и темных (рудные) фаз, а также флюидный пузырек (см. рис. 6, В). Экспериментальные исследования свидетельствуют об относительно невысоких температурах гомогенизации включений —  $1150—1205$  °С. После прогрева и закалки включения содержат преимущественно гомогенное светлое стекло (см. рис. 6, Г).

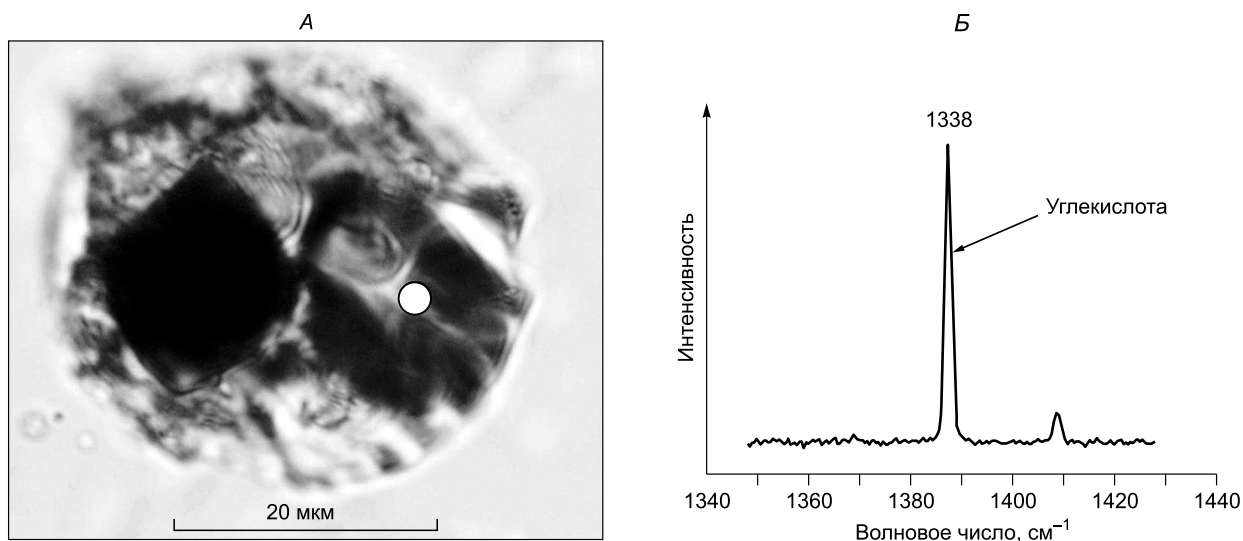
Первичные расплавные включения (до  $5—80$  мкм) в *плагиоклазе* располагаются равномерно, реже приурочены к зонам роста вкрапленника. Включения часто обладают правильными прямоугольными формами и содержат многочисленные, в основном темные, фазы (см. рис. 6, Д). После прогрева и за-

калки включения в плагиоклазе заполнены светлым гомогенным стеклом, содержащим часто флюидные пузырьки (см. рис. 6, *Е*). Эксперименты в микротермокамере свидетельствуют о более высоких (чем для клинопироксена) и близких к данным по оливинам температурах гомогенизации включений: 1180—1240 °С. Редко были установлены более низкие температуры – 1150 °С. Выделяются две группы включений (с температурами гомогенизации выше 1210 °С и ниже 1200 °С), для каждой из которых



**Рис. 6. Первичные расплавные включения в минералах из оливиновых базальтов влк. Пра-Горелый.**

Расплавные включения в оливине (*А, Б* — температуры гомогенизации: 1195—1245 °С), в клинопироксене (*В, Г* — 1150—1205 °С), в плагиоклазе (*Д, Е* — 1180—1240 °С). *А, В, Д* — включения до опытов; *Б, Г, Е* — включения после гомогенизации и закалки.



**Рис. 7.** Первичное расплавленное включение с флюидной фазой в оливиновом вкрапленнике из базальта влк. Пра-Горелый.

*А* — светлым кружком показано место анализа флюидной фазы. *Б* — КР-спектр флюидной фазы в первичном расплавленном включении в оливине.

устанавливается отчетливая зависимость от состава вмещающего плагиоклаза — падение температур с уменьшением содержания калия в минерале-хозяине. Соответственно, можно сделать некоторую оценку температур кристаллизации плагиоклазов, не содержащих расплавленных включений и находящихся в тесном сростании с амфиболами. Учитывая, что эти минералы имеют относительно минимальные количества калия, температуры их формирования должны быть менее 1150 °С (минимальные температуры гомогенизации в других вкрапленниках).

**Вулкан Молодой Горелый.** Во вкрапленниках *оливина* первичные расплавленные включения (10—60 мкм) содержат множество фаз. Иногда можно различить светлые кристаллики. После гомогенизации (около 1180 °С и редко 1120 °С, что ниже, чем в оливине из Пра-Горелого) включения содержат стекло и флюидный пузырек (см. рис. 8, *А*).

В *ортопироксене* первичные включения (20—60 мкм) округлой формы заполнены микрозернистой массой либо содержат светлые кристаллики и отчетливые флюидные пузырьки. Температуры гомогенизации варьируют в диапазоне 1165—1190 °С. После опытов и закалки включения содержат главным образом гомогенное стекло (см. рис. 8, *Б*).

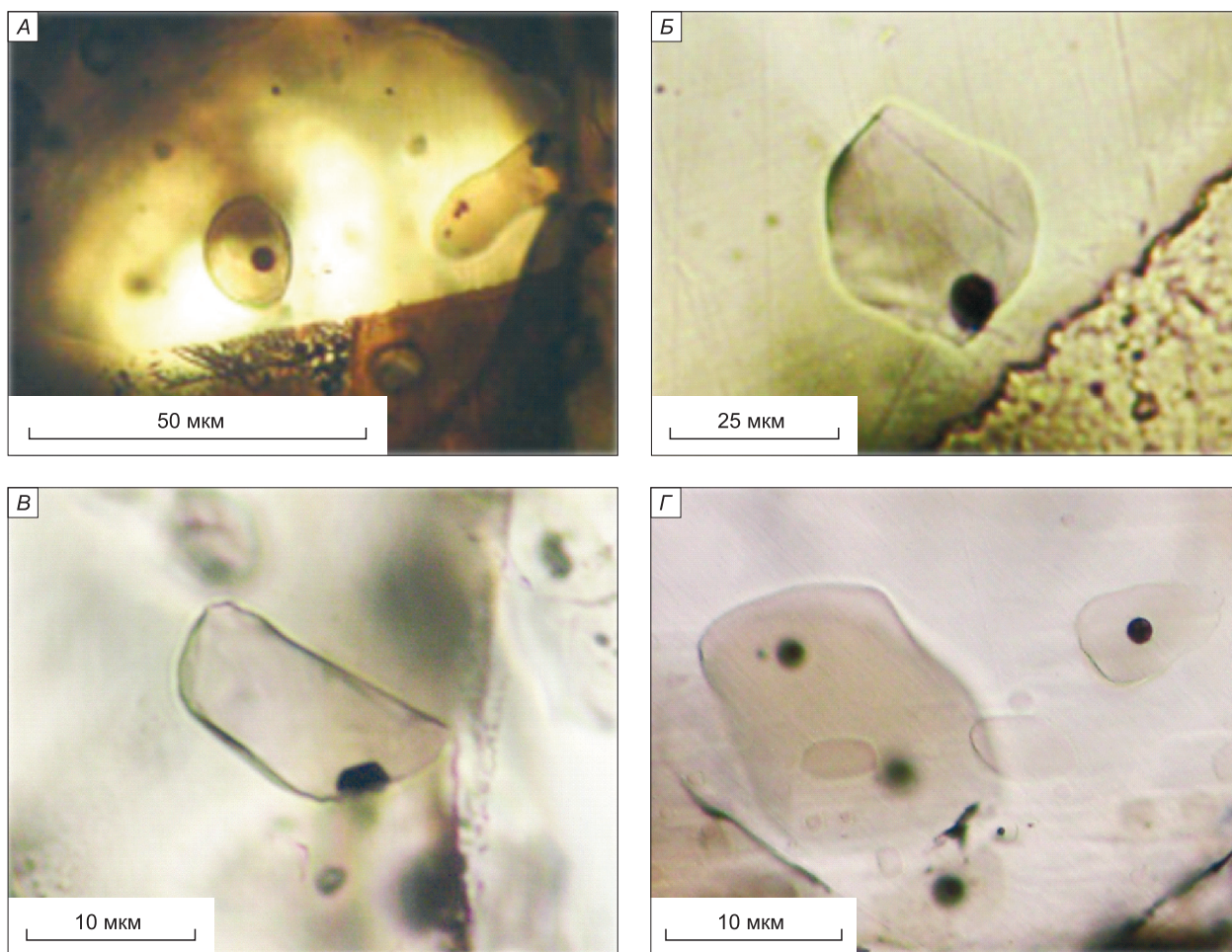
Первичные расплавленные включения (10—40 мкм) в *клинопироксене* содержат темные и светлые кристаллики, стекло, флюидный пузырек и мелкие рудные фазы. Температуры гомогенизации включений 1120—1150 °С. После экспериментов и закалки включения заполнены гомогенным стеклом с небольшой фазой рудного минерала (см. рис. 8, *В*).

Вкрапленники *плагиоклаза* содержат в центре и по зонам роста первичные расплавленные включения (5—70 мкм) прямоугольной формы и заполненные микрозернистой темной массой либо содержащие стекло с анизотропными кристалликами и флюидным пузырьком. Эксперименты показали, что включения становятся гомогенными при температурах 1160—1200 °С, заметно более низких, чем соответствующие данные для плагиоклаза из влк. Пра-Горелый. После экспериментов и закалки включения содержали гомогенное стекло, часто с небольшими флюидными фазами (см. рис. 8, *Г*).

### ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ

Детальные исследования показали, что в случае оливин-порфирового магнезиального базальта влк. Пра-Горелый наряду с типичными расплавленными включениями в оливинах и в плагиоклазах присутствуют включения, основной объем которых занимают флюидные фазы. В то же время изучение андезитобазальтов влк. Молодой Горелый показало отсутствие подобных включений.

В *оливине* влк. Пра-Горелый довольно часто совместно с первичными расплавленными включениями находятся вторичные включения (3—10 мкм) со следами расщуровки, располагающиеся по залеченным трещинкам. В составе включений преобладают темные с проблеском в центре флюидные фазы



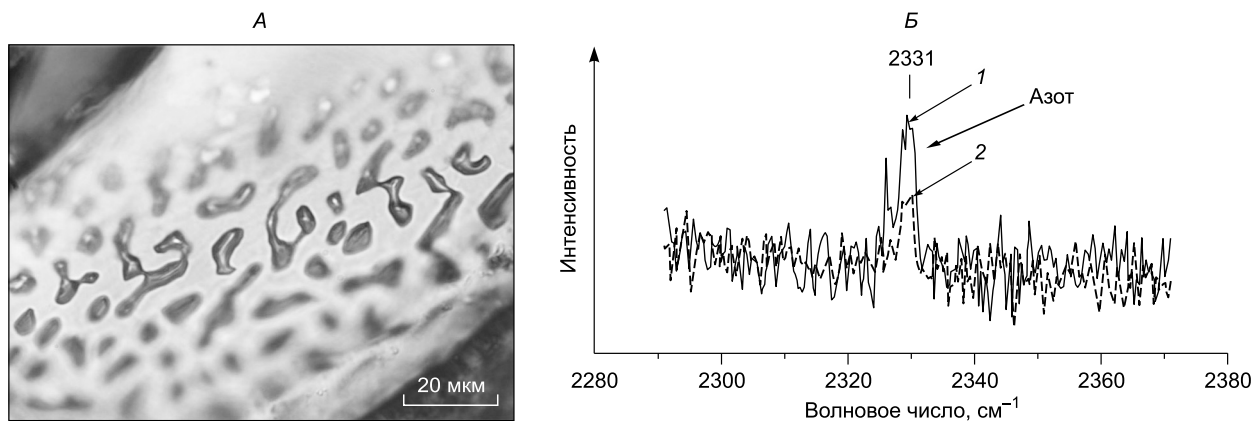
**Рис. 8. Первичные расплавные включения в минералах из андезибазальтов влк. Молодой Горелый.**

Прогретые, гомогенизированные и закаленные расплавные включения в оливине (*A* — температуры гомогенизации: 1120—1180 °С), ортопироксене (*B* — 1165—1190 °С), клинопироксене (*B* — 1120—1150 °С) и в плагиоклазе (*Г* — 1160—1200 °С) из андезибазальта влк. Молодой Горелый.

(рис. 9, *A*). Значительно реже присутствуют светлые стекловатые фазы в ассоциации с округлыми флюидными пузырьками. Криометрические исследования с охлаждением до  $-193$  °С не привели к заметному вымораживанию  $\text{CO}_2$  или сжижению  $\text{N}_2$  и  $\text{CH}_4$ , что свидетельствует о низкой плотности содержащихся во включениях летучих компонентов. Анализ с помощью КР-спектроскопии, проведенный при температуре  $+140$ °С, не установил в их составе  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ , а также паров  $\text{H}_2\text{O}$ . Исключение составили некоторые включения, в которых был обнаружен азот (см. рис. 9, *B*).

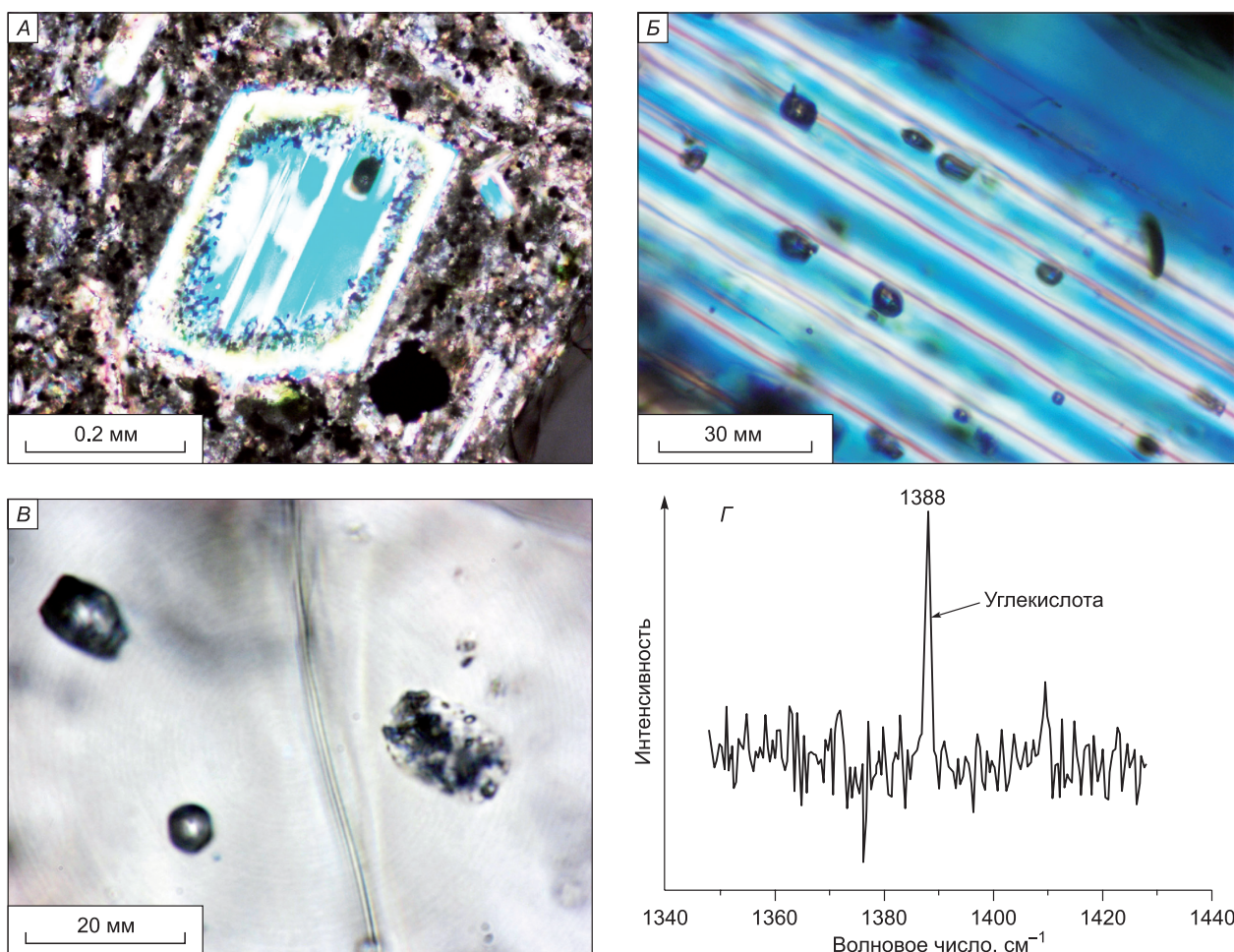
В *плагиоклазе* влк. Пра-Горелый были найдены первичные флюидные включения, формирующие зоны роста во вкрапленниках (рис. 10, *A*). Часто наблюдается равномерное расположение включений с ориентировкой вдоль полисинтетических двойников (см. рис. 10, *B*). Объемные округлые включения (размерами 10—20 мкм) имеют отчетливую огранку и тесно ассоциируют с первичными расплавными включениями (см. рис. 10, *B*). Криометрические исследования с охлаждением до  $-193$  °С флюидных включений приводили к вымораживанию незначительных количеств твердой  $\text{CO}_2$ , которая отчетливо плавилась при температуре  $-56.6$  °С и тут же гомогенизировалась в газовую фазу при температуре  $-56.4\dots-55$  °С, т. е. плотность флюидной фазы составляет  $0.015$  г/см<sup>3</sup>. Анализ с помощью КР-спектроскопии подтвердил присутствие во флюидных включениях малоплотной  $\text{CO}_2$  (см. рис. 10, *Г*), при этом других газов и паров  $\text{H}_2\text{O}$  обнаружено не было.

Необходимо отметить, что первичные флюидные включения с малоплотной углекислотой, находящиеся в ассоциации с первичными расплавными включениями и свидетельствующие о процессах фазовой сепарации расплавов при кристаллизации фенокристаллов, характерны не только для влк. Го-



**Рис. 9.** Вторичные флюидные включения (А) в оливиновых вкрапленниках из базальтов влк. Пра-Горелый. Б — КР-спектр флюидной фазы.

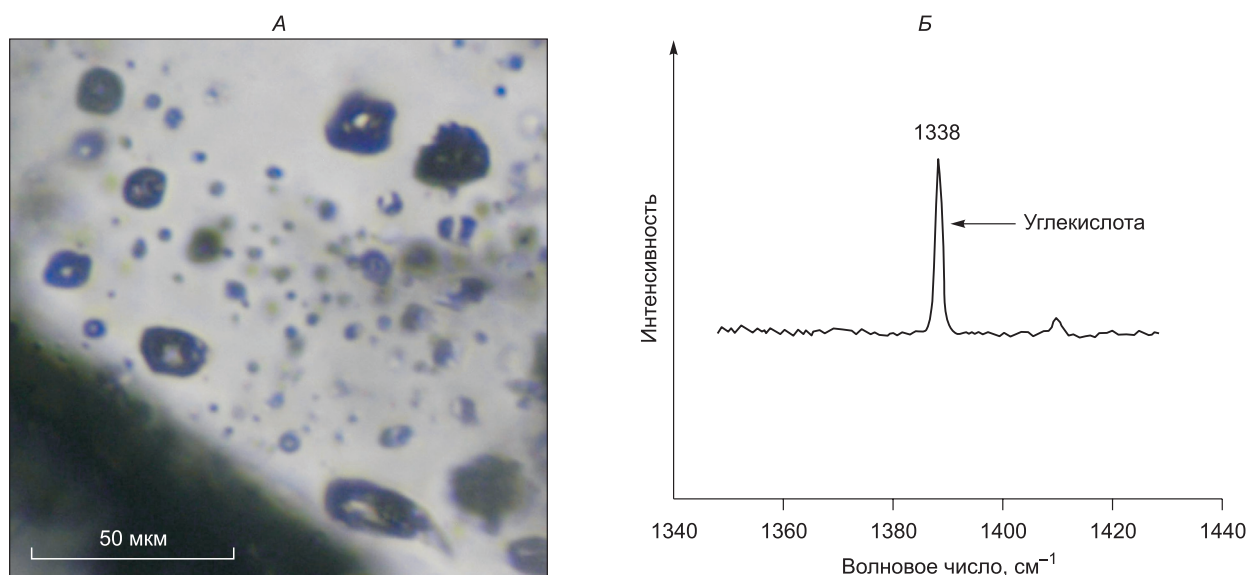
1 — азот во включениях; 2 — фоновый азот в чистой минеральной матрице.



**Рис. 10.** Первичные флюидные включения в плагиоклазе из базальтов влк. Пра-Горелый.

Расположение флюидных включений по зонам роста (А) и равномерно по кристаллу (Б) плагиоклаза. Первичные сингенетические флюидные и расплавные включения в плагиоклазе (В). КР-спектр первичного флюидного включения в плагиоклазе (Г).





**Рис. 11. Первичные флюидные включения в плагиоклазе из эффузивов (риолиты) влк. Хангар.**

Первичные флюидные включения, располагающиеся равномерно по кристаллу плагиоклаза (А). КР-спектр первичного флюидного включения в плагиоклазе (Б).

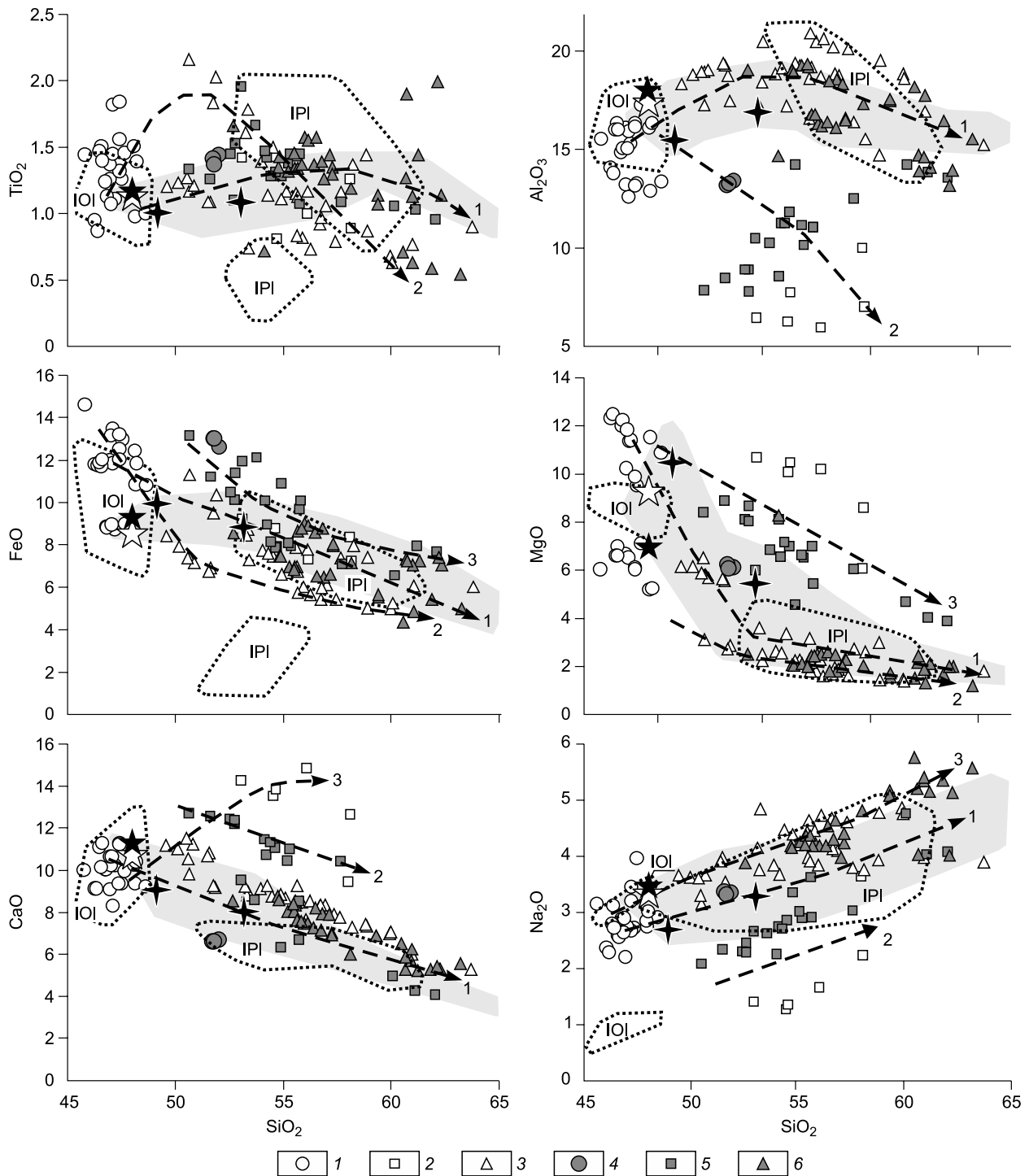
рель, но присутствуют в магматических вкрапленниках из эффузивов других вулканических комплексов [Бакуменко и др., 1999]. Также подобная ситуация (как показали предварительные результаты наших исследований) присутствует и в плагиоклазе из риолитов, формирующих современную постройку влк. Хангар, Камчатка (рис. 11). Таким образом, установленное нами наличие сингенетичных флюидных ( $\text{CO}_2$ ) и расплавных включений в минералах эффузивов влк. Горелый не является уникальным дискуссионным случаем и свидетельствует о реальности фазовой сепарации расплавов в вулканогенных магматических системах.

### СОСТАВЫ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Анализ гомогенных стекол прогретых и гомогенизированных включений в минералах (табл. 3) позволил выяснить особенности составов расплавов вулканов Пра-Горелый и Молодой Горелый. В целом составы включений в минералах из эффузивов обоих вулканов согласуются между собой. В частности, по соотношению  $\text{FeO}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$  практически все данные по включениям в оливинах и в плагиоклазах отвечают породам толеитовой серии, так же как и сами детально изученные образцы базальта и андезибазальта.

На вариационных диаграммах включения в оливине и в плагиоклазе для влк. Пра-Горелый и Молодой Горелый в большинстве случаев близки к данным по породам вулкана Горелый в целом, показывая падение содержаний железа, магния, кальция и рост натрия на фоне накопления  $\text{SiO}_2$  (тренд № 1 на рис. 12). Важно отметить, что результаты, полученные другими исследователями по включениям в плагиоклазе и в оливине [Толстых и др., 2012], также по большинству рассмотренных на рис. 12 компонентов соответствуют в основном вариациям составов эффузивов влк. Горелый, попадая на наш тренд № 1. Таким образом, полученные независимо друг от друга данные по включениям в оливине и в плагиоклазе влк. Горелый согласуются между собой, что является свидетельством достоверности установленных фактов. В то же время включения в пироксенах ведут себя более самостоятельно, показывая тренды с повышенными содержаниями  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и пониженными значениями  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . В целом имеющиеся сложные (с изгибами) тренды ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), по нашему мнению, позволяют предположить различные пути эволюции расплавов с оливином (46—48 мас. %  $\text{SiO}_2$ ) и без оливина (50—64 мас. %  $\text{SiO}_2$ ).

Заметим, что отличия в составах расплавных включений в различных минералах из одного образца показаны и для других вулканов Камчатки [Плечов, 2014; и др.]. Нами с целью выяснения состава первоначального расплава для сосуществующих вкрапленников плагиоклаза и клинопироксена в эффузивах влк. Горелый был использован метод контрольных линий, предложенный в статье [Watson, 1976] и приведенный в последующих работах [Реддер, 1987; Плечов, 2014]. Необходимым условием этого метода является синхронная кристаллизация сосуществующих минералов. Как показано в разделе «Гео-



**Рис. 12. Вариационные диаграммы (мас. %) для составов стекол прогретых и гомогенизированных включений в минералах из базальтоидов влк. Горелый.**

Расплавные включения в минералах: оливинового базальта влк. Пра-Горелый (светлые знаки) и андезибазальта влк. Молодой Горелый (темные). 1 — оливин, 2 — клинопироксен, 3 — плагиоклаз, 4 — оливин, 5 — клинопироксен и ортопироксен, 6 — плагиоклаз. Поля расплавных включений в оливине (IOI) и в плагиоклазе (IPI) из базальтов и андезибазальтов влк. Горелый по данным предыдущих исследователей [Толстых и др., 2012]. Серым цветом обозначено поле эффузивов влк. Горелый [GEOROC <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc>]. Четырехконечные звезды — детально изученные образцы. Пятиконечные звезды — средние составы гомогенизированных (светлые) и пересчитанных на равновесие с оливином-хозяином (темные) расплавных включений из работы [Назарова и др., 2017]. Тренды (1—3) показывают разные пути изменения состава расплавов при кристаллизации вкрапленников.

Таблица 3. Представительные анализы (мас. %) стекол гомогенизированных расплавных включений в минералах из эффузивов влк. Горелый

Включения в оливинах														
№ 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	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма	T <sub>гом</sub>	Fo
1	5	46.36	0.87	13.79	11.74	0.23	12.47	9.12	2.29	0.48	0.28	97.63	1240	77.36
2	6	48.12	0.98	12.86	10.87	0.22	11.52	9.37	2.74	0.47	0.30	97.45	1240	79.38
3	7	48.62	1.00	13.35	10.78	0.20	10.87	9.20	2.91	0.52	0.27	97.72	1240	79.38
4	200	46.97	1.26	13.21	13.17	0.28	10.24	9.09	2.66	0.55	0.24	97.67	1245	79.58
5	10	46.75	1.24	14.86	8.88	0.22	12.02	10.02	2.60	0.51	0.34	97.44	1230	82.58
6	11	47.19	1.11	15.28	8.71	0.00	11.40	10.21	2.74	0.51	0.23	97.38	1230	82.58
7	12	46.81	1.13	15.02	8.82	0.19	12.25	10.03	2.56	0.49	0.00	97.30	1230	82.58
8	19	47.08	1.45	15.88	11.83	0.20	6.53	10.64	2.89	0.63	0.33	97.46	1210	80.33
9	20	45.78	1.44	15.51	14.58	0.00	6.03	10.01	3.15	0.75	0.31	97.56	1195	80.17
10	21	47.40	1.56	16.35	12.53	0.21	6.11	11.26	3.20	0.61	0.27	99.50	1195	80.17
11	23	46.48	1.47	16.00	11.90	0.21	6.62	11.08	2.80	0.48	0.46	97.50	1210	80.62
12	25	47.65	1.46	17.26	9.01	0.00	7.13	9.97	3.96	0.70	0.35	97.49	1210	80.17
13	26	48.08	1.51	16.09	12.45	0.23	5.20	10.25	2.84	0.49	0.39	97.53	1195	80.62
14	28	47.40	1.84	16.15	12.02	0.28	6.05	11.24	3.45	0.52	0.64	99.59	1195	80.62
15	170	52.01	1.44	13.39	12.62	0.29	6.14	6.69	3.35	1.56	0.50	97.99	1180	70.44
16	171	51.71	1.41	13.14	13.01	0.25	6.26	6.60	3.37	1.66	0.59	98.00	1180	70.44
17	172	51.78	1.37	13.24	13.02	0.32	6.09	6.61	3.32	1.66	0.59	98.00	1180	70.44

Примечание. 1—14 — включения в оливинах из оливинового базальта влк. Пра-Горелый; 15—17 — включения в оливинах из андезибазальта влк. Молодой Горелый. T<sub>гом</sub> — температуры гомогенизации включений (°C). Fo — содержание форстеритового компонента (%) в оливине-хозяине.

Включения в пироксенах														
№ 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	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма	T <sub>гом</sub>	Mg#
1	95	54.55	1.43	6.25	8.79	0.30	10.09	13.52	1.27	1.38	0.41	97.99	1225	76.03
2	97	58.03	1.26	9.98	8.37	0.36	6.10	9.43	3.64	1.51	0.71	99.39	1205	75.63
3	98	54.66	0.81	7.74	7.91	—	10.47	13.86	1.35	0.91	0.27	97.98	1225	75.77
4	99	53.06	1.42	6.46	9.21	0.32	10.70	14.28	1.41	0.76	0.38	98.00	1225	75.77
5	182	52.72	1.10	8.88	10.13	0.26	8.67	12.18	2.45	1.17	0.44	98.00	1120	75.01
6	183	52.53	1.45	8.89	10.50	0.27	8.12	12.42	2.30	1.18	0.35	98.01	1120	76.25
7	184	52.73	1.53	7.78	11.39	0.33	8.04	12.36	2.29	1.13	0.42	98.00	1120	76.25
8	185	54.13	1.47	8.54	10.09	0.29	8.11	11.48	2.26	1.22	0.42	98.01	1120	76.74
9	189	53.04	1.96	10.47	11.95	0.25	6.02	9.53	2.66	1.57	0.56	98.01	1130	75.32
10	191	55.31	1.45	10.13	7.97	0.22	6.52	11.01	2.89	1.77	0.74	98.01	1150	75.32
11	192	55.19	1.38	11.13	8.07	0.00	6.65	10.43	3.01	1.53	0.62	98.01	1150	77.73
12	193	54.62	1.31	11.84	7.85	0.00	7.00	11.07	2.87	1.43	0.00	97.99	1150	77.73
13	194	54.40	1.28	11.24	8.12	0.00	7.18	11.33	2.72	1.33	0.39	97.99	1150	77.73
14	152	62.03	0.96	13.53	7.69	0.23	3.90	4.07	4.08	2.93	0.59	100.01	1165	70.27
15	156	54.88	1.28	14.24	10.91	0.26	4.56	6.32	3.35	1.89	0.32	98.01	1165	70.29
16	162	53.70	1.67	10.23	12.13	0.31	6.84	8.59	2.63	1.44	0.46	98.00	1190	70.29
17	165	60.10	1.06	14.22	6.57	0.00	4.70	4.95	4.76	2.86	0.76	99.98	1175	69.29

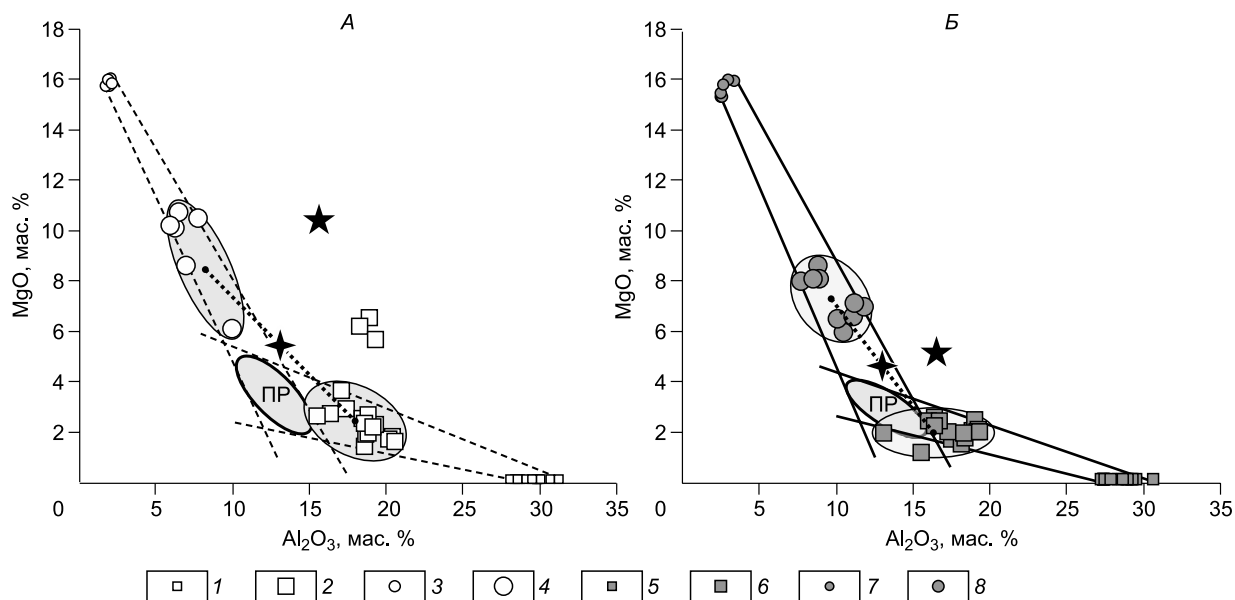
Примечание. 1—13 — включения в клинопироксенах; 14—17 включения в ортопироксенах; 1—4 — оливиновый базальт влк. Пра-Горелый; 5—17 — андезибазальт влк. Молодой Горелый. T<sub>гом</sub> — температуры гомогенизации включений (°C). Mg# — магнезиальность (Mg·100/(Mg + Fe<sup>2+</sup>)) пироксена-хозяина.

Включения в плагиоклазах														
№ 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	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма	T <sub>гом</sub>	An
1	37	55.87	0.82	20.45	6.03	0.00	1.80	8.48	4.46	2.08	0.00	99.99	1225	56.58
2	39	56.66	0.92	20.17	5.43	0.00	1.70	8.25	4.68	1.95	0.23	99.99	1200	56.58
3	42	59.99	0.63	18.57	5.24	0.00	1.42	7.07	4.76	2.31	0.00	99.99	1200	59.71
4	45	56.21	0.73	20.62	5.63	0.00	1.60	8.53	4.73	1.94	0.00	99.99	1200	59.71
5	49	51.84	2.03	17.43	10.35	0.28	2.89	9.15	3.35	2.06	0.64	100.02	1210	67.95
6	50	53.33	1.78	18.42	8.72	0.00	2.51	8.80	3.77	2.13	0.55	100.01	1210	65.66
7	54	50.61	1.17	18.95	7.37	0.20	6.53	10.55	3.30	1.03	0.28	99.99	1240	87.68
8	56	49.57	1.20	18.32	8.41	0.00	6.18	11.18	3.66	0.83	0.37	99.72	1240	87.68
9	58	51.50	1.09	19.36	6.75	0.00	5.64	10.68	3.92	0.80	0.23	99.97	1230	87.68
10	63	56.94	1.06	18.72	6.12	0.00	1.87	8.35	4.10	2.53	0.30	99.99	1180	65.00
11	64	56.73	0.97	18.84	5.95	0.21	1.95	8.35	4.14	2.59	0.26	99.99	1180	65.00
12	66	54.88	1.11	19.35	6.60	0.00	2.26	8.83	4.39	2.31	0.28	100.01	1210	66.03
13	69	53.23	1.61	17.10	8.43	0.20	3.62	9.20	4.15	1.89	0.56	99.99	1210	65.00
14	72	53.97	1.39	18.83	7.74	0.00	2.64	9.14	3.85	2.07	0.38	100.01	1225	58.78
15	73	55.57	1.15	18.60	6.95	0.00	2.33	8.52	3.99	2.20	0.38	99.69	1185	58.78
16	74	57.63	1.16	16.40	7.37	0.00	2.72	7.75	3.79	2.80	0.37	99.99	1225	57.24
17	75	58.18	1.37	15.51	7.94	0.00	2.59	7.28	3.77	2.90	0.45	99.99	1185	57.24
18	78	55.64	1.13	19.15	6.73	0.00	2.15	9.25	3.92	2.02	0.00	99.99	1185	58.78
19	109	63.19	0.54	15.53	4.95	0.00	1.20	5.57	5.58	2.92	0.53	100.01	1200	52.50
20	111	59.34	1.07	17.53	5.66	0.00	1.73	6.88	5.09	2.32	0.37	99.99	1210	52.54
21	113	60.49	0.71	18.18	4.32	0.00	1.54	6.52	5.76	2.22	0.27	100.01	1200	52.50
22	122	54.76	1.35	19.00	7.48	0.00	2.07	8.76	4.19	1.92	0.46	99.99	1200	64.92
23	123	54.82	1.43	18.87	7.48	0.00	2.06	8.58	4.15	2.05	0.55	99.99	1200	64.92
24	124	52.66	1.66	19.03	8.54	0.00	2.53	8.53	3.88	2.29	0.89	100.01	1200	64.92
25	125	55.22	1.32	19.27	6.97	0.25	2.11	8.04	4.26	2.03	0.51	99.98	1200	61.34
26	126	55.50	1.34	19.17	6.97	0.00	2.01	8.04	4.37	2.14	0.47	100.01	1200	61.34
27	133	56.41	1.37	16.40	8.60	0.20	2.60	7.25	4.18	2.55	0.45	100.01	1195	50.52
28	134	56.78	1.39	16.07	8.78	0.00	2.48	7.16	4.31	2.61	0.42	100.00	1195	50.52
29	135	58.09	1.19	17.28	7.12	0.00	2.03	6.00	4.82	3.11	0.35	99.99	1195	50.52
30	136	55.64	1.34	16.75	8.64	0.22	2.45	7.60	4.38	2.45	0.44	99.91	1195	63.05
31	137	57.26	1.30	16.47	8.05	0.00	2.27	6.94	4.41	2.56	0.65	99.91	1195	63.05
32	144	56.49	1.57	18.44	6.52	0.00	1.81	8.22	4.54	1.88	0.54	100.01	1225	60.15
33	145	57.12	1.44	18.32	6.58	0.23	2.00	7.90	3.99	1.92	0.51	100.01	1225	61.01
34	146	55.46	1.46	19.32	6.84	0.00	2.02	8.41	4.20	1.85	0.45	100.01	1225	56.89
35	148	62.12	1.99	13.15	7.43	—	1.99	5.43	4.02	2.76	1.10	99.99	1225	56.89

Примечание. 1—18 — включения в плагиоклазах из оливинного базальта влк. Пра-Горелый; 19—35 — включения в плагиоклазах из андезитобазальта влк. Молодой Горелый. An — содержание анортитового компонента (%) в плагиоклазе-хозяине.

лого-петрохимические особенности эффузивных комплексов вулкана Горелый» (и на рис. 2), сосуществующие вкрапленники плагиоклаза и клинопироксена в изученных образцах (G1-18 и Г8-1) имеют тесные контакты друг с другом, свидетельствующие об их одновременной кристаллизации. Таким образом, мы имеем возможность с помощью метода контрольных линий оценить составы реальных первоначальных расплавов для вулканов Пра-Горелый и Молодой Горелый, послуживших основой для кристаллизации плагиоклазов и клинопироксенов.

На рисунке 13 приведены соотношения содержания алюминия и магния, содержания которых, судя по предыдущим работам [Плечов, 2014], наиболее контрастны во включениях из сосуществующих минералов. Отчетливо выделяются поля первоначальных расплавов, располагающиеся фактически меж-

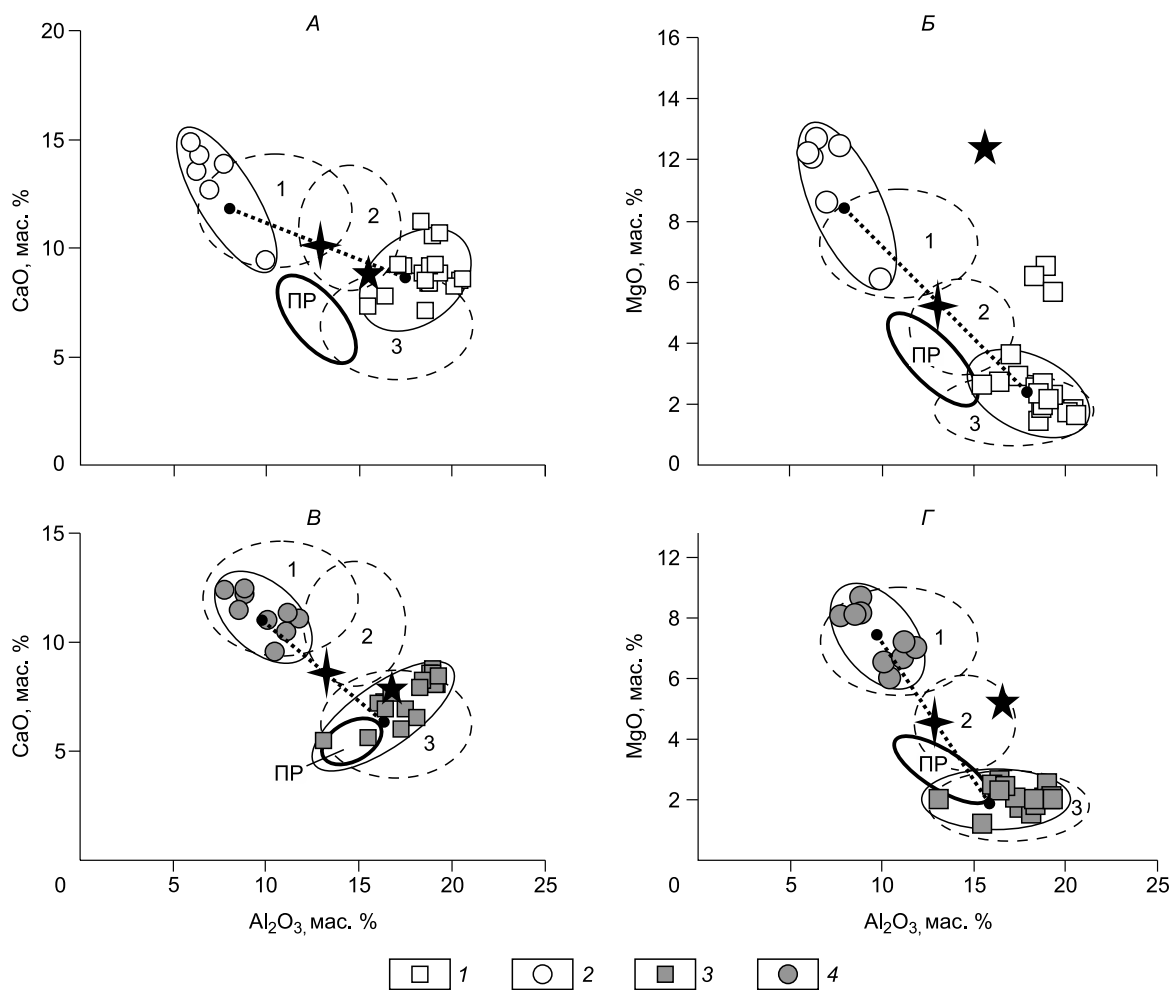


**Рис. 13. Расчет первоначальных составов расплавов для сосуществующих вкрапленников плагиоклаза и клинопироксена в эффузивах влк. Горелый с использованием метода контрольных линий [Watson, 1976; Реддер, 1987; Плечов, 2014].**

*А* — оливиновый базальт влк. Пра-Горелый. *Б* — андезитобазальт влк. Молодой Горелый. 1–8 — данные по составам плагиоклазов (1, 5), клинопироксенов (3, 7) и стекол гомогенизированных расплавных включений в плагиоклазах (2, 6) и в клинопироксенах (4, 8). ПР — поля первоначальных расплавов. Пятиконечные звезды — составы изученных образцов. Четырехконечные звезды — предполагаемые средние содержания компонентов в исходном расплаве, располагающиеся на середине линии (отмеченной точками), соединяющей центры полей составов включений в сосуществующих клинопироксенах и плагиоклазах.

ду полями составов включений в сосуществующих клинопироксенах и плагиоклазах в эффузивах влк. Пра-Горелый (G1-18) и Молодой Горелый (Г8-1). К сожалению, выяснилось, что этот метод показывает конкретные результаты преимущественно с контрастными по своим содержаниям элементами, а с большинством других (особенно с фактически отсутствующими в составах минералов) не дает однозначных решений. Учитывая, что на примере диаграммы  $MgO—Al_2O_3$ , приведенной при описании метода контрольных линий в работе [Плечов, 2014], исходные расплавы располагаются практически между составами включений в разных минералах (см. рис. 13), нами в качестве средних содержаний петрохимических компонентов в первоначальном расплаве были приняты данные, располагающиеся на середине пунктирной линии, соединяющей центры полей составов включений в сосуществующих клинопироксенах и плагиоклазах (рис. 14). Правомерность подобного подхода подтверждается тесной ассоциацией полученных результатов на рис. 13 с полями исходных расплавов (рассчитанных по [Плечов, 2014]) и расположением рядом с составами изученных образцов на рис. 14, а также для соотношений большинства других компонентов. Только в случае обр. G1-18 из-за значительного количества оливиновых вкрапленников порода существенно обогащена  $MgO$  и обеднена  $SiO_2$ .

Полученные составы первоначальных расплавов для сосуществующих минералов из эффузивов влк. Горелый были сравнены с данными по детально изученным базальтовым стеклам из Южной Атлантики. Это связано с тем, что проведенные нами исследования подводных океанических стекол [Крылова и др., 2009] показывают принципиальную картину поведения базальтового расплава при начале кристаллизации из него клинопироксена и плагиоклаза. В результате было выяснено, что средние содержания петрохимических компонентов в первоначальных расплавах располагаются в полях составов однородных оптически и химически базальтовых стекол (см. рис. 14), представляющих расплавы, из которых кристаллизация клинопироксенов и плагиоклазов не происходила. При этом точки расплавных включений в клинопироксенах и плагиоклазах находятся в полях различных по химическому составу микроучастков в оптически однородном базальтовом стекле, содержащем фенокристаллы плагиоклаза, клинопироксена (см. рис. 14). Попадание составов стекол гомогенизированных включений в клинопироксенах и плагиоклазах в разные поля базальтовых стекол показывает фактически предкристаллизационную подготовку расплава к последующей кристаллизации минералов с захватом соответствующих по составу расплавных включений.



**Рис. 14. Расчет первоначальных составов расплавов для сосуществующих вкрапленников плагиоклаза и клинопироксена в эффузивах влк. Горелый.**

*А, Б* — оливиновый базальт влк. Пра-Горелый. *В, Г* — андезибазальт влк. Молодой Горелый. 1–4 — данные по составам стекловомогенизированных расплавных включений в плагиоклазах (1, 3) и в клинопироксенах (2, 4). ПР — поля первоначальных расплавов, рассчитанные по методу контрольных линий [Watson, 1976; Реддер, 1987; Плечов, 2014] (см. рис. 13). Пятиконечные звезды — составы изученных образцов. Четырехконечные звезды — предполагаемые средние содержания компонентов в первоначальном расплаве, располагающиеся на середине линии (отмеченной точками), соединяющей центры полей составов включений в сосуществующих клинопироксенах и плагиоклазах. 1–3 — поля составов океанических базальтовых стекол [Крылова и др., 2009]. 1, 3 — различные по химическому составу микроучастки в оптически однородном базальтовом стекле, содержащем фенокристаллы плагиоклаза, клинопироксена и оливина. 2 — поле составов однородного по оптическим и химическим свойствам стекла без присутствия фенокристаллов.

В последнее время составы расплавных включений в оливинах из эффузивов принято корректировать до равновесия с оливином-хозяином. Подобная работа для оливиновых базальтов, отобранных фактически там же и из того же докальдерного магматического комплекса влк. Горелый, что и наш обр. G1-18, была проделана ранее [Назарова и др., 2017]. Данные из этой публикации, представляющие составы включений и расплавов, привлечены нами в качестве сравнительного материала при подготовке статьи. При этом хорошо видно (см. [Назарова и др., 2017, табл. 1]), что составы гомогенизированных включений в оливинах и скорректированных включений не имеют принципиальных различий. В то же время проведение корректировки составов включений в оливинах вполне обосновано предыдущими работами и поэтому мы, не повторяя более ранние исследования, сделали подобную корректировку на примере расплавного включения с максимальным содержанием магния. Расчеты выполнялись по программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011]. Задавались следующие параметры: содержание воды 1.7 мас. % (из работы [Назарова и др., 2017]), состав оливина ( $Fo = 82.5$  ф. ед.), содержание FeO (11.03 мас. %) в оливиновом базальте, буфер QFM. Обращает на себя внимание в результатах расчетов

заметное содержание  $H_2O$  (1.95 мас. %) и установленная температура (1230 °C), фактически совпадающая с температурой гомогенизации включения — около 1240 °C.

### УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ В ГЛУБИННЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВЛК. ГОРЕЛЫЙ

Исследования первичных расплавных включений в минералах позволили получить представительный фактический материал, послуживший основой для выяснения с помощью расчетного моделирования физико-химических параметров эволюции глубинных расплавов влк. Горелый.

Важнейший параметр состава магм, необходимый для расчетного моделирования, — содержание  $H_2O$ . Традиционный метод оценки содержания воды основан на анализе расплавных включений в оливине [Sobolev, Chaussidon, 1996]. Ранее было измерено количество воды во включениях в оливине из магнезиальных базальтов влк. Горелый — 0.3 мас. %. При этом расчетные содержания  $H_2O$  в глубинных расплавах были гораздо больше и составили 1.7 мас. %, а для состава первичного расплава, находившегося в равновесии с оливином, 1.5 мас. % [Назарова и др., 2017]. Максимальные содержания воды в расплавных включениях в плагиоклазе из эффузивов влк. Горелый составили 0.62—0.78 мас. % (в среднем 0.7 мас. %) [Толстых и др., 2012]. Есть расчетные данные о содержании около 3 мас. %  $H_2O$  в базальтовых магмах влк. Горелый [Gavrilenko et al., 2016]. В ходе расчетного моделирования нами были использованы практически все эти значения  $H_2O$ .

Среди эффузивов влк. Пра-Горелый важную роль играют оливиновые базальты, так как благодаря своему высокомагнезиальному составу ( $MgO \sim 11$  мас. %) [Гавриленко, Озеров, 2009] эти породы могут нести прямую информацию об условиях образования родоначальных магм [Назарова и др., 2017].

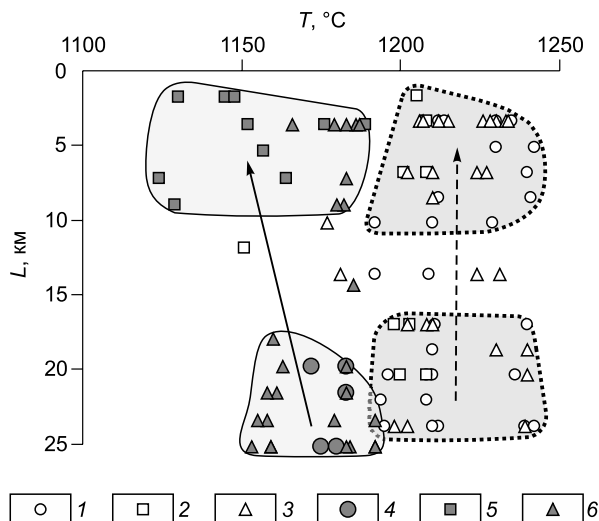
Нами при расчетах параметров ликвидусной кристаллизации оливина из магнезиальных базальтов влк. Пра-Горелый по программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] (на основе составов стекол и температур гомогенизации расплавных включений) использованы данные по содержанию  $H_2O$  (1.7 мас. %), установленные при изучении расплавных включений в оливинах из оливиновых базальтов [Назарова и др., 2017]. При расчетном моделировании кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов применялись данные по  $H_2O$  во включениях в плагиоклазе [Толстых и др., 2012]: максимум 0.7 мас. %.

При моделировании ликвидусной кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов из андезибазальтов влк. Молодой Горелый по программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] (на основе составов стекол и температур гомогенизации включений) были использованы данные по содержанию  $H_2O$  во включениях в плагиоклазе [Толстых и др., 2012]: максимум 0.7 мас. %.

В целом расчеты по программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] показали, что минералы из эффузивов влк. Горелый кристаллизовались при давлениях, значения которых формируют два отчетливых интервала (7—5 кбар и 3.0—0.5 кбар). Полученные параметры давлений позволили оценить по методике, описанной в разделе «Методы исследования» (с учетом плотностных моделей для базальтовых и андезибазальтовых систем), глубины формирования фенокристаллов, показывающие соответственно два основных уровня (25—17 и 10—1.7 км), характерные как для Пра-Горелого, так и для Молодого Горелого вулканов (рис. 15). При этом устанавливаются разные температурные режимы с более высокими характеристиками для влк. Пра-Горелый (1242—1192 °C), чем в случае влк. Молодой Горелый (1192—1124 °C). Эволюция  $PT$ -параметров также существенно различается — магмы влк. Пра-

**Рис. 15. Сравнение условий кристаллизации глубинных расплавов при формировании базальтов влк. Пра-Горелый (светлые значки) и андезибазальтов влк. Молодой Горелый (темные значки).**

Глубины кристаллизации минералов рассчитаны (см. раздел «Методы исследования») с использованием плотностных моделей по базальтовым (Пра-Горелый) и андезибазальтовым (Молодой Горелый) системам с помощью данных по давлениям, полученным по программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] на основе исследования расплавных включений. Результаты изучения расплавных включений в минералах: оливинового базальта влк. Пра-Горелый (1 — оливин, 2 — клинопироксен, 3 — плагиоклаз), андезибазальта влк. Молодой Горелый (4 — оливин, 5 — клинопироксен и ортопироксен, 6 — плагиоклаз).  $L$  — глубина кристаллизации минералов.  $T$  — температуры кристаллизации минералов.



Горелый при подъеме из глубинных условий (24 км) до близповерхностных (до 1.7 км) сохраняют свои максимальные (до 1242 °С) температуры, в то время как для влк. Молодой Горелый наблюдается закономерное снижение температур (1192—1130 °С) при подъеме расплава с 25 до 1.8 км (см. рис. 15).

Дополнительно к использованной методике для определения *PT*-условий кристаллизации с помощью PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] была применена современная программа WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава [Yavuz, Yildirim, 2018] и включающая целый ряд таких термобарометров, как [Putirka, 2008; Masotta et al., 2013; и др.]. При этом использованы составы первоначальных расплавов, рассчитанные для сосуществующих клинопироксенов и плагиоклазов (см. выше). В результате определены достаточно широкие интервалы давлений (7—1 кбар) и температур (1260—1115 °С), которые в целом подтверждают полученные с помощью PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] *PT*-параметры. Необходимо отметить, что для оливиновых базальтов влк. Пра-Горелый и андезибазальтов Молодого Горелого давления весьма близки (7—1 и 6—1 кбар) и соответственно нет существенных различий в глубинах кристаллизации (24—3.4 и 22—3.6 км), рассчитанных на основе данных по давлениям и согласно плотностным характеристикам (см. «Методы исследования»), а температуры заметно различаются (1260—1140 и 1215—1115 °С). Глубины кристаллизации клинопироксенов, рассчитанные напрямую в рамках программы WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018] с использованием плотностных моделей для островодужной коры [DeBari, Greene, 2011] составили 10.0—6.5 км. Эти значения попадают в отмеченные выше интервалы.

Расчетное моделирование по программе COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] влк. Пра-Горелый проводилось на основе данных по составу первичного расплава, находившегося в равновесии с оливином [Назарова и др., 2017, табл. 1]. Моделировалась равновесная декомпрессионная кристаллизация, начиная с давления 8 кбар и содержания H<sub>2</sub>O 1.5 мас. %, при буфере QFM+1.5 (согласно рекомендации в работе [Gavrilenko et al., 2016]). Было выяснено, что, начиная с 1230 °С и давления 7.3 кбар, происходила кристаллизация оливина, к которому (при давлениях 6.5 кбар) присоединялись кристаллизовавшиеся одновременно клинопироксен и плагиоклаз. Далее при снижении параметров шло образование всех трех минералов (рис. 16). При этом в ходе кристаллизации минералов количество воды на уровне нижней камеры (7—5 кбар) возрастало до 2 мас. %, а в верхней камере (3-1 кбар) от 2.8 до 3.6 мас. %.

В случае влк. Молодой Горелый при расчетном моделировании по программе COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] главное внимание было уделено расплавному включению в клинопироксенах и в плагиоклазах. За основу взяты составы первоначальных расплавов, установленные для сосуществующих минералов (см. соответствующий раздел). Задавались следующие параметры равновесной кристаллизации: давление 6 и 2 кбар (нижняя и верхняя камеры соответственно), а также декомпрессионная система (начиная с 8 кбар), буфер QFM+1.5. Содержание воды: 0.7 мас. % (данные непосредственных замеров включений в плагиоклазах влк. Горелый из работы [Толстых и др., 2012]) и 3 мас. % [Gavrilenko et al., 2016]. В результате было выяснено, что одновременная кристаллизация плагиоклаза и клинопироксена наблюдалась только при низких давлениях (2 кбар) в условиях верхней камеры и содержание воды в расплаве при этом возрастало от 0.7 до 3 мас. % на заключительных этапах кристаллизации.

Как показали проведенные ранее исследования [Добрецов и др., 2016, 2017, 2019] важные данные о *PT*-параметрах в промежуточных камерах под вулканами Камчатки можно получить, используя амфиболовые термобарометры. В нашем случае амфиболы были изучены в образце оливинового базальта влк. Пра-Горелый. Использование барометров [Johnson, Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; и др.] и термобарометров [Ridolfi et al., 2010] показало, что кристаллизация амфиболов в докальдерную стадию развития влк. Горелый (Пра-Горелый) происходила в довольно широком интервале давлений (7—2 кбар) и при температурах 890—860 °С. При этом, как было отмечено выше, рассмотренные амфиболы находятся в тесном сростании с плагиоклазами, содержащими меньше калия, чем основная группа плагиоклазовых вкрапленников с расплавыми включениями, и соответственно обладающими более низкими (менее 1150 °С) температурами кристаллизации, что согласуется с рассчитанными параметрами (начиная с 890 °С) формирования амфиболов.

### ФАЗОВАЯ СЕПАРАЦИЯ ГЛУБИННЫХ РАСПЛАВОВ ВЛК. ПРА-ГОРЕЛЫЙ

Детальные исследования магнезиальных оливиновых базальтов влк. Пра-Горелый позволили установить активную роль CO<sub>2</sub> при кристаллизации вкрапленников оливина и плагиоклаза.

В *фенокристаллах оливина* были найдены первичные расплавные включения с аномально большими флюидными фазами, анализ которых с помощью КР-спектроскопии показал преобладание в них CO<sub>2</sub>, что свидетельствует о значительной роли углекислоты в расплавах, из которых кристаллизовались эти вкрапленники.



Исследования *вкрапленников плагиоклаза* выявили наличие первичных флюидных включений, формирующих зоны роста, а также располагающихся равномерно по объему кристалла (см. рис. 10, *A, B*). Важен факт сонахождения первичных флюидных и расплавных включений (см. рис. 10, *B*), свидетельствующий об их сингенетичности и гетерофазности расплава, из которого рос плагиоклаз. Криометрические исследования и КР-спектроскопия (см. рис. 10, *Г*) говорят о преобладании углекислоты в этих флюидных включениях. Таким образом, на основе исследования первичных флюидных включений с  $\text{CO}_2$  можно сделать обоснованный вывод о кристаллизации плагиоклаза из гетерофазного (расплав, насыщенный микропузырьками газового  $\text{CO}_2$ ) расплава.

В целом на основе изучения зональных фенокристов плагиоклаза оказалось возможным расшифровать историю развития гетерофазных магматических систем влк. Пра-Горелый в докальдерную стадию. В начале вкрапленники плагиоклаза формировались в спокойной обстановке — кристаллизация минералов из гомогенного расплава без резких изменений *PT*-параметров. Затем быстрое падение давления привело к вскипанию (резкая объемная фазовая сепарация магмы при падении давления с образованием гетерофазной системы: расплав + газовые пузырьки  $\text{CO}_2$ ) расплава и выделению  $\text{CO}_2$  из магмы. При этом плагиоклаз продолжал кристаллизоваться из гетерофазного (кипящего) расплава, воздействовавшего и на вкрапленники оливина (с образованием в нем вторичных флюидных включений). На заключительной стадии образование плагиоклаза шло опять в спокойной обстановке из гомогенного расплава.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

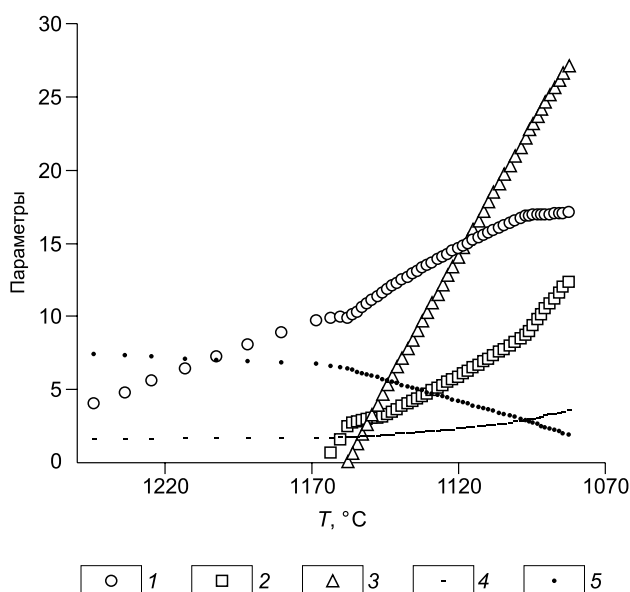
Исследования расплавных и флюидных включений, и минералов, а также расчетное моделирование на основе данных по расплавным включениям с использованием современных программ (PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004], WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018]) позволили выяснить особенности физико-химических параметров магматических систем в ходе развития докальдерного влк. Пра-Горелый и формирования последующих современных комплексов влк. Молодой Горелый.

Прежде всего, хотелось бы отметить, что при сравнении результатов, полученных различными методами, необходимо учитывать, что на рис. 15 показаны ликвидусные температуры, рассчитанные по соответствующей системе программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и представляющие максимальные значения температур кристаллизации минералов. Следовательно, они могут превышать параметры, рассчитанные, в частности, по программе COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] (рис. 16) и приведенные в работах других исследователей [Чашин и др., 2011; Назарова и др., 2017; и др.]. В целом полученные нами с помощью различных методов температурные характеристики кристаллизации вкрапленников оливина, клинопироксена и плагиоклаза (1260—1115 °С), а также амфиболов (890—860 °С) хорошо согласуются с ранее опубликованными данными по магматизму влк. Горелый: 1116—1221 °С [Чашин и др., 2011], 780—1230 °С [Seligman et al., 2014], 1121—1177 °С [Назарова и др., 2017].

В случае высокомагнезиальных оливиновых базальтов влк. Пра-Горелый, несмотря на близкие температурные характеристики (судя по температурам гомогенизации включений) формирования основных (оливин, клинопироксен, плагиоклаз) вкрапленников, оказалось возможным выяснить последовательность кристаллизации минералов на основе данных по размерам, взаимоотношениям и степени идиоморфизма. В результате установлено, что фенокристаллы оливина кристаллизовались первыми. Далее шло фактически совмест-

**Рис. 16. Кристаллизация минералов в ходе эволюции *PT*-параметров первичного расплава для оливиновых базальтов влк. Пра-Горелый.**

В ходе расчетного моделирования (условия приведены в тексте) по программе COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] был использован состав первичного расплава, находившегося в равновесии с оливином [Назарова и др., 2017, табл. 1]. Параметры — показаны изменения содержания минералов (%), 1 — оливин, 2 — клинопироксен, 3 — плагиоклаз и воды (4, мас. %), а также давлений (5, кбар) в расплаве при снижении температуры (*T*, °С).



ное образование клинопироксена и плагиоклаза. На заключительных (наиболее низкотемпературных) стадиях формировались сростки амфибола с плагиоклазом, имеющим иной состав по сравнению с преобладающими вкрапленниками, содержащими расплавы включения. При этом, несмотря на то, что совместная кристаллизация оливина и амфибола возможна даже при относительно низких температурах (1070—915 °С) [Krawczynski et al., 2012], в случае оливиновых базальтов влк. Пра-Горелый нам не удалось найти доказательств существования этого явления.

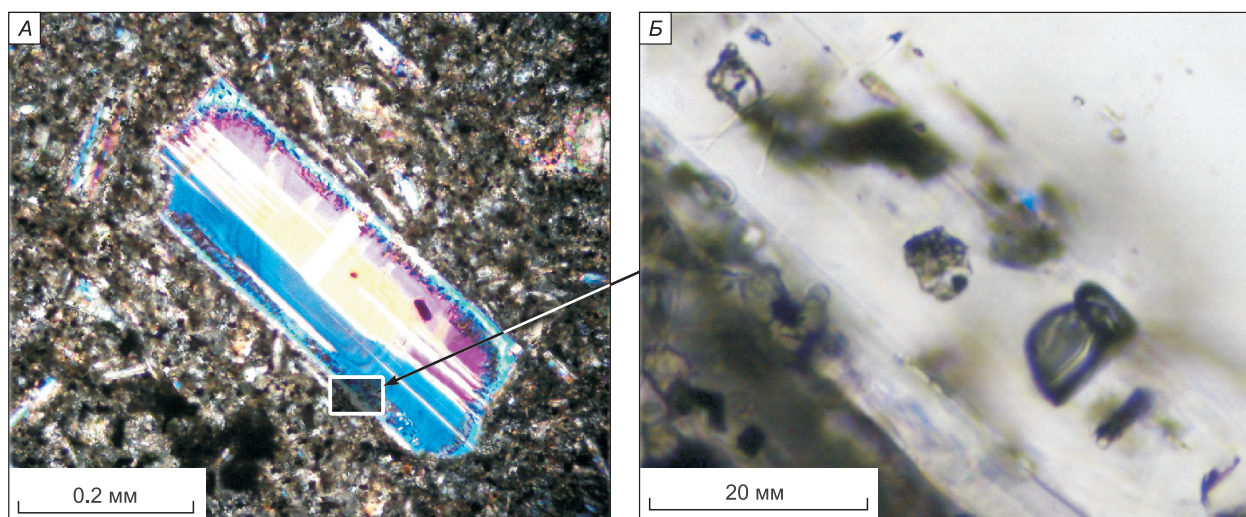
Установленные нами параметры давлений, при которых формировались вкрапленники минералов из эффузивов влк. Горелый, укладываются в достаточно широкий диапазон (7.0—0.5 кбар), показывая соответственно глубины кристаллизации от 25 до 1.7 км. При этом глубины образования клинопироксенов, рассчитанные напрямую в рамках программы WinPLtb (основанной на соотношениях составов пироксена и расплава [Yavuz, Yildirim, 2018]) с использованием плотностных моделей для островодужной коры [DeBari, Greene, 2011], составили 10—6.5 км. Последние данные согласуются с результатами предыдущих исследований (около 10 км [Gavrilenko et al., 2016]) и практически совпадают большей частью с геофизической информацией о параметрах магматической камеры (до 10 км [Kuznetsov et al., 2017; Selyangin, 2019]) для влк. Горелый. О возможности существования более глубоких магматических очагов свидетельствуют данные в работах [Гавриленко, Озеров, 2009; Gavrilenko et al., 2016] о развитии двух стадий эволюции исходных магм влк. Горелый при давлениях 6—8 и 1.0—1.5 кбар. Об этом же свидетельствуют и давления в 5—6 кбар, установленные для магматических систем влк. Горелый [Seligman et al., 2014], а также геофизические данные для этого района [Kuznetsov et al., 2017]. Реальность существования глубоких (около 20 км и, возможно, более) магматических камер показана с помощью сейсмических исследований на других вулканах Камчатки [Гонтовая и др., 2010; Levin et al., 2014; Добрецов и др., 2016, 2017, 2019].

Проведенное расчетное моделирование с помощью программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] показало, что установленный нами достаточно широкий (7.0—0.5 кбар) интервал давлений и соответственно глубин кристаллизации минералов (25.0—1.7 км) можно разбить на два уровня. Эти промежуточные камеры на глубинах 25—17 и 10.0—1.7 км характерны для обоих вулканов — Пра-Горелый и Молодой Горелый. При этом устанавливаются разные температурные режимы (см. рис. 15) с более высокими характеристиками для влк. Пра-Горелый (1240—1190 °С), чем в случае влк. Молодой Горелый (1190—1125 °С). Эволюция *PT*-параметров также различается: магмы Пра-Горелого при подъеме из глубинных условий (24 км) до фактически близповерхностных (до 1.7 км) сохраняют свои максимальные (до 1240 °С) температуры, в то время как для Молодого Горелого наблюдается закономерное снижение температур (1190 → 1130 °С) при подъеме расплава с глубин 25 до 1.8 км. В целом установленные нами параметры давлений (7—5 и до 0.5 кбар) в двух промежуточных камерах (см. рис. 15) хорошо согласуются с данными предыдущих исследователей, показавших, что первый этап развития магматизма влк. Горелый характеризуется высокими давлениями (6—8 кбар), а кристаллизация на втором этапе проходила в близповерхностных условиях (1.0—1.5 кбар). Существование этого уровня кристаллизации свидетельствует в пользу наличия близповерхностного магматического очага, ответственного за образование кальдеры и игнимбритов [Гавриленко, Озеров, 2009].

Параметры заключительных (наиболее низкотемпературных) стадий развития магматических систем влк. Горелый (Пра-Горелый) рассмотрены с помощью амфиболовых термометров. Было установлено, что кристаллизация амфиболовых вкрапленников в базальтах в докальдерную стадию происходила при температурах 890—860 °С. При этом плагиоклазы, находящиеся в тесном сростании с амфиболами также имеют довольно невысокие (менее 1150 °С) параметры. Реальность таких достаточно низких температур для магматизма влк. Горелый подтверждается данными работы [Seligman et al., 2014] — минимальные значения около 780 °С. При близких температурах (930—1010 °С) кристаллизуются амфиболы эффузивов вулканов Ичинский и Уксичан [Добрецов и др., 2019].

В то же время наблюдается несогласованность установленных относительно низких температур (максимум 890 °С) кристаллизации амфиболов с рассчитанными для них высокими давлениями (до 7 кбар), которые могут свидетельствовать о весьма значительных (более 20 км) глубинах. К тому же время существования подобных низкотемпературных расплавов на больших глубинах не подтверждается результатами наших исследований расплавленных включений и клинопироксенов. Принимая это во внимание, вряд ли будет правомерным установленные для амфиболов давления объяснять исключительно глубиной. При этом необходимо отметить, что по сравнению с другими фенокристаллами (оливин, клинопироксен, плагиоклаз) вкрапленники амфибола встречаются нечасто и незначительны по размерам. Таким образом, ситуация, в которой формировались амфиболы из оливиновых базальтов влк. Пра-Горелый, была весьма редкой и, соответственно, связанной с локальными процессами, приводившими к повышению давления.

В целом результаты наших исследований составов стекол гомогенизированных расплавленных включений не противоречат данным, полученным другими исследователями по включениям в плагиоклазе и



**Рис. 17. Фазовая сепарация расплавов влк. Пра-Горелый.**

*А, Б* — фазовая сепарация расплава с образованием сингенетичных флюидных и расплавных включений в фенокристаллах плагиоклаза.

в оливине [Толстых и др., 2012; Назарова и др., 2017], соответствуя в общем по большинству рассмотренных химических компонентов (см. рис. 12) вариациям составов эффузивов влк. Горелый.

Проведенное расчетное моделирование на основе данных по расплавным включениям позволило оценить содержание воды в магматических системах влк. Горелый. В имеющихся публикациях показано, что количество  $H_2O$  в магмах этого вулкана может колебаться в очень широких пределах: 0.3 мас. % [Назарова и др., 2017], 0.7 мас. % [Толстых и др., 2012], 1.5 и 1.7 мас. % [Назарова и др., 2017], около 3 мас. % [Gavrilenko et al., 2016]. В ходе расчетного моделирования нами были использованы практически все эти значения  $H_2O$ . Выяснено, что в процессе падения давления (при подъеме магмы) происходило накопление воды в расплаве (см. рис. 16): при 7 → 5 кбар количество  $H_2O$  растет от 1.5 до 2 мас. %. В последующем (при 3 → 1 кбар) происходит максимальное накопление воды (от 2.8 до 3.6 мас. %). Таким образом, повышенные (3 мас. % [Gavrilenko et al., 2016]) количества  $H_2O$  в магмах влк. Горелый получают свое подтверждение.

Как было отмечено выше, судя по имеющимся данным [Aicuppa et al., 2012], для влк. Горелый устанавливается относительное обеднение  $H_2O$  с одновременным обогащением  $CO_2$  по сравнению с высокотемпературными газами других вулканов Курило-Камчатской дуги. В связи с этим, большое значение для расшифровки условий развития глубинных магматических систем влк. Пра-Горелый играют исследованные нами первичные флюидные включения с  $CO_2$  низкой плотности, сингенетичные первичным расплавным включениям. Такое сочетание включений в плагиоклазе прямо свидетельствует о его кристаллизации из кипящего (гетерофазного) расплава. В целом, как видно на рис. 10 и 17, центральные части вкрапленников плагиоклаза формировались из гомогенного расплава. Резкое падение давления приводит к фазовой сепарации магмы. В плагиоклазе растут из двухфазового (расплав + газообразная углекислота) расплава зоны (ширины до 100 мкм, см. рис. 10 и 17), насыщенные флюидными включениями  $CO_2$ . Затем происходило удаление фазы  $CO_2$  и рост плагиоклаза из относительно гомогенного расплава.

В целом необходимо подчеркнуть, что первичные флюидные включения с  $CO_2$  низкой плотности были найдены исключительно в минералах из базальтов влк. Пра-Горелый, и, соответственно, установленные на основе их изучения процессы вскипания (фазовой сепарации) расплава происходили в докальдерную стадию развития магматизма влк. Горелый. Для выяснения физико-химических условий магматических систем, действовавших во время образования кальдеры, необходимо изучать непосредственно продукты этого процесса, в основном кислого состава, и представленные, в частности, игнимбритами. Именно в этом направлении авторы статьи планируют проведение своих последующих исследований, основанных на изучении игнимбритов из вулканов Камчатки.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исследования расплавных и флюидных включений, минералов, а также расчетное моделирование на основе данных по составам расплавных включений, клинопироксенов и амфиболов (с использо-

ванием современных программ (PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004], WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018]) позволили выяснить особенности физико-химических параметров магматических систем в ходе развития докальдерного вулкана Пра-Горелый и при формировании последующих современных комплексов влк. Молодой Горелый.

2. С помощью исследования расплавных включений и минералов, а также с использованием расчетного моделирования на основе их составов были получены температурные характеристики кристаллизации вкрапленников оливина, клинопироксена и плагиоклаза (1260—1115 °С), а также амфиболов (890—860 °С), хорошо согласующиеся с ранее опубликованными данными по магматизму влк. Горелый: 1116—1221 °С [Чащин и др., 2011], 780—1230 °С [Seligman et al., 2014], 1121—1177 °С [Назарова и др., 2017].

3. Проведенное расчетное моделирование с помощью программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] показало, что установленный нами достаточно широкий (7—0.5 кбар) интервал давлений и соответственно глубин кристаллизации минералов (25—1.7 км) можно разбить на два уровня. Эти промежуточные камеры на глубинах 25—17 и 10—1.7 км характерны для обоих вулканов — Пра-Горелый и Молодой Горелый. При этом устанавливаются разные температурные режимы с более высокими характеристиками для влк. Пра-Горелый (1240—1190 °С), чем в случае влк. Молодой Горелый (1190—1125 °С).

4. Установлено присутствие в плагиоклазе первичных флюидных включений с  $\text{CO}_2$  низкой плотности и сингенетичных им первичных расплавных включений, что прямо свидетельствует о кристаллизации минерала из гетерофазного расплава. При этом центральные части вкрапленников плагиоклаза формировались из гомогенного расплава. Резкое падение давления приводило к фазовой сепарации магмы и к росту в кристаллах плагиоклаза из двухфазового (расплав + газообразная углекислота) расплава зон, насыщенных флюидными включениями  $\text{CO}_2$ . Затем в связи с исчезновением самостоятельной фазы  $\text{CO}_2$  рост плагиоклаза происходил из гомогенного расплава.

Авторы выражают свою благодарность профессору А.Б. Перепелову и Р.И. Кулакову за предоставленные для исследования образцы, а также профессору Ю.А. Озерову за возможность отбора проб оливин-порфириновых базальтов. Благодарим профессоров С.З. Смирнова и М.Г. Гавриленко, а также всех других специалистов, принявших участие в дискуссии по результатам исследований магматизма влк. Горелый, за критические замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Работа выполнена по государственным заданиям ИГМ СО РАН и ИНГТГ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и договора № 14.Y26.31.0029.

## ЛИТЕРАТУРА

**Арискин А.А., Бармина Г.С.** Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М., МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000, 362 с.

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

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

**Будников В.А.** Извержение вулкана Горелый в 1986 г. // Вулканология и сейсмология, 1988, № 4, с. 89—103.

**Влодавец В.И.** Горелый хребет // Бюллетень вулканологической станции, 1957, № 25, с. 68—70.

**Гавриленко М.Г., Озеров А.Ю.** Вулкан Горелый — эволюция магматических расплавов // Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии (22—27 сентября 2009 г. Петропавловск-Камчатский, 2009), Петропавловск-Камчатский, 2009, т. 1, с. 308—310.

**Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В.** Структура верхней мантии зоны перехода океан—континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология, 2010, № 4, с. 13—29.

**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.

**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.

**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.

- Кирсанов И.Т.** Извержение вулкана Горелый в 1980 г. // Вулканология и сейсмология, 1981, № 2, с. 70—74.
- Кирсанов И.Т.** Вулкан Горелый, его геологическое строение, последние извержения и состав продуктов // Вулканическая деятельность, ее механизм, связь с геодинамикой, прогноз извержений и землетрясений / Ред. С.А. Федотов. Петропавловск-Камчатский, 1985, с. 32—33.
- Кирсанов И.Т., Озеров А.Ю.** Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980-1981 гг. // Вулканология и сейсмология, 1983, № 1, с. 25—42.
- Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В.** Вулкан Горелый // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2 / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991, с. 294—315.
- Крылова М.А., Лебедева С.М., Быков В.Н., Симонов В.А.** Неоднородное строение океанических базальтовых стекол по данным электронной микроскопии и ИК Фурье микроспектрометрии // Литосфера, 2009, № 4, с. 41—50.
- 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.
- Ладыгин В.М., Гирина О.А., Фролова Ю.В.** Петрофизические особенности лавовых потоков вулкана Безымянный, Камчатка // Вулканология и сейсмология, 2012, № 6, с. 18—30.
- Магматогенная кристаллизация** по данным изучения включений расплавов / Т.Ю. Базарова, И.Т. Бакуменко, В.П. Костюк, Л.И. Панина, В.С. Соболев, А.И. Чепуров. Новосибирск, Наука, 1975, 232 с.
- Мартынов Ю.А., Перепелов А.Б., Чащин А.А.** Геохимическая типизация базальтоидов Мутновского вулканического поля (Южная Камчатка) // Тихоокеанская геология, 1995, т. 14, № 5, с. 72—83.
- Назарова Д.П., Портнягин М.В., Крашенинников С.П., Миронов Н.Л.** Исходное содержание H<sub>2</sub>O и условия образования родоначальных магм вулкана Горелый (Южная Камчатка) по данным микроэлементной термобарометрии // ДАН, 2017, т. 472, № 3, с. 311—314.
- Новограбленов П.Т.** Каталог вулканов Камчатки // Известия Государственного географического общества, 1932, т. 64, № 1, с. 88—99.
- Петрографический кодекс** России. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2009, 194 с.
- Плечов П.Ю.** Методы изучения флюидных и расплавных включений. М., «Издательство КДУ», 2014, 268 с.
- Реддер Э.** Флюидные включения в минералах. М., Мир, 1987, 632 с.
- Селянгин О.Б., Пономарева В.В.** Строение и развитие Гореловского вулканического центра, Южная Камчатка // Вулканология и сейсмология, 1999, № 2, с. 3—23.
- Симонов В.А.** Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.
- 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 А.В., Соболев С.В.** Теория, практика и петрологические применения методов исследования расплавных включений в минералах // Термобарометрия и геохимия рудообразующих флюидов (по включениям в минералах). Тезисы докл. VII Всесоюзного совещания, в 2 частях. Львов, 1985, ч. 1, с. 113—115.
- Соболев В.С., Бакуменко И.Т., Костюк В.П.** О возможности использования расплавных включений для петрологических реконструкций // Геология и геофизика, 1976 (5), с. 146—149.
- Толбачинское** трещинное извержение 2012—2013 гг. (ТТИ-50) / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2017, 421 с.
- Толстых М.Л., Наумов В.Б., Гавриленко М.Г., Озеров А.Ю., Кононкова Н.Н.** Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов вулканического центра Горелый (Южная Камчатка) по данным изучения включений в минералах // Геохимия, 2012, № 6, с. 576—606.
- Хетчиков Л.Н., Пахомова В.А., Чащин А.А., Одариченко Э.Г.** Особенности состава силикатных стекол расплавных включений в минералах и основной массе пород вулкана Горелый (Южная Камчатка) // Труды ВНИИСИМС, 2000, т. XVI, с. 322—336.
- Хетчиков Л.Н., Чащин А.А., Пахомова В.А., Одариченко Э.Г.** Вкрапленники плагиоклаза в базальтах вулканов Горелый и Мутновский (юг Камчатки) и условия их образования по данным изучения расплавных включений // Труды X Международной конференции по термобарогеохимии. Александров, ВНИИСИМС, 2001, с. 111—140.
- Чаплыгин И.В., Таран Ю.А., Дубинина Е.О., Шапарь В.Н., Тимофеева И.Ф.** Химический состав и металлоносность магматических газов вулкана Горелый (Камчатка) // ДАН, 2015, т. 463, № 1, с. 85—89.

- Чащин А.А.** Игнимбристы вулкана Горелый (Южная Камчатка): состав, условия формирования // Труды ДВГТУ, Владивосток, 1999, вып. 121 (Сер. 4), с. 142—148.
- Чащин А.А., Мартынов Ю.А.** Петрология пород вулканов Горелый и Мутновский (Южная Камчатка). Владивосток, Дальнаука, 2011, 270 с.
- Чащин А.А., Мартынов Ю.А., Перепелов А.Б., Екимова Н.И., Владимирова Т.П.** Физико-химические условия формирования и эволюции позднеплейстоцен-голоценовых магм вулканов Горелый и Мутновский (Южная Камчатка) // Тихоокеанская геология, 2011, т. 30, № 4, с. 87—108.
- Aiuppa A., Giudice G., Liuzzo M., Tamburello G., Allard P., Calabrese S., Chaplygin I., McGo-nigle A.J.S., Taran Y.** First volatile inventory for Gorely volcano, Kamchatka // *Geophys. Res. Lett.*, 2012, 39 (6), L06307.
- Ariskin A.A., Barmina G.S.** COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // *Geochem. Int.*, 2004, v. 42 (1), p. S1-S157.
- Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Pere-pelov 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, p. 57—80.
- Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.** Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2011, v. 12 (7), Q07021.
- DeBari S.M., Greene A.R.** Vertical stratification of composition, density, and inferred magmatic processes in exposed arc crustal sections // *Arc-continent collision. Frontiers in Earth Sciences*. Berlin, Springer-Verlag, 2011, p. 121—144.
- Duggen S., Portnyagin M., Baker J., Ulfbach D., Hoernle K., Garbe-Schonberg D., Grassineau N.** Drastic shift in lava geochemistry in volcanic front to rear arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, v. 71, p. 452—480.
- Gavrilenko M., Ozerov A., Kyle P.R., Carr M.J., Nikulin A., Vidito C., Danyushevsky L.** Abrupt transition from fractional crystallization to magma mixing at Gorely volcano (Kamchatka) after caldera collapse // *Bull. Volcanol.*, 2016, 78 (7), p. 1—28.
- GEOROC** <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch M.D.** Nomenclature of the amphibole supergroup // *Am. Mineral.*, 2012, v. 97 (11—12), p. 2031—2048.
- Johnson M.C., Rutherford M.J.** Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // *Geology*, 1989, v. 17 (9), p. 837—841.
- Kuznetsov P.Y., Koulakov I., Jakovlev A., Abkadyrov I., Deev E., Gordeev E.I., Senyukov S., El Khrepy S., Al Arifi N.** Structure of volatile conduits beneath Gorely volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography // *Geoscience*, 2017, v. 7 (4), 111, doi: 10.3390/geosciences7040111.
- Krawczynski M.J., Grove T.L., Behrens H.** Amphibole stability in primitive arc magmas: effects of temperature, H<sub>2</sub>O content, and oxygen fugacity // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2012, v. 164 (2), p. 317—339.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W.V., Nickel E.H., Schumaker J.C., Smith D.C., Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G.** Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names // *Mineral. Mag.*, 1997, № 61, p. 295—321.
- Le Maitre R.W., Bateman P., Dudek A.** A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford, Blackwell, 1989, 193 p.
- Levin V., Droznina S., Gavrilenko M., Carr M.J., Senyukov S.** Seismically active subcrustal magma source of the Klyuchevskoy volcano in Kamchatka, Russia // *Geology*, 2014, v. 42 (11), p. 983—986.
- Masotta M., Mollo S., Freda C., Gaeta M., Moore G.** Clinopyroxene-liquid thermometers and barometers specific to alkaline differentiated magmas // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2013, № 166, p. 1545—1561.
- Miyashiro A.** Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *Am. J. Sci.*, 1970, v. 274, p. 321—355.
- Putirka K.D.** Thermometers and barometers for volcanic systems // *Rev. Mineral. Geochem.*, 2008, v. 69 (1), p. 61—120.
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M.** Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2010, v. 160, p. 45—66.

**Schmidt M.W.** Amphibole composition as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1992, v. 110 (2—3), p. 304—310.

**Seligman A., Bindeman I., Jicha B., Ellis B., Ponomareva V., Leonov V.** Multi-cyclic and isotopically diverse silicic magma generation in an arc volcano: Gorely eruptive center, Kamchatka, Russia // *J. Petrol.*, 2014, 55 (8), p. 1561—1594.

**Selyangin O.B.** Structure, substance and near-surface magmatic chambers of Mutnovsky and Gorely volcanoes (Mutnovsky geothermal region, Kamchatka). III Gorelovsky volcanic center of Mutnovsky geothermal area // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2019, v. 367, p. 1—21.

**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 (5), p. 1183—1211.

**Sobolev A.V., Chaussidon M.** H<sub>2</sub>O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-oceanic ridges: Implications for H<sub>2</sub>O storage and recycling in the mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 137, p. 45—55.

**Watson E.B.** Glass inclusions as samples of early magmatic liquid: determinative method and application to South Atlantic basalt // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1976, v. 1, p. 73—84.

**Yavuz F., Yildırım D.K.** A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry // *Periodico di Mineralogia*, 2018, v. 87 (2), p. 149—172, doi:10.2451/2018PM787.

*Поступила в редакцию 26 июня 2019 г.,  
после доработки — 12 июня 2020 г.*