

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

Симонов В. А., Добрецов Н. Л., Котляров А. В., Карманов Н. С., Боровиков А. А.

Аннотация

Исследования расплавных и флюидных включений, минералов, а также расчетное моделирование (на основе данных по составам расплавных включений, клинопироксенов и амфиболов) позволили выяснить особенности физико-химических параметров магматических систем в ходе развития докальдерного вулкана Пра-Горелый и при формировании последующих современных комплексов вулкана Молодой Горелый. Получены температурные характеристики кристаллизации вкрапленников оливина, клинопироксена и плагиоклаза (1115-1260°C), а также амфибола (740-890°C), хорошо согласующиеся с ранее опубликованными данными по магматизму вулкана Горелый. Расчетное моделирование на основе составов и температур гомогенизации расплавных включений показало, что установленный нами интервал давлений (0.5-7 кбар) и соответственно глубин кристаллизации минералов (21-1.5 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 вулкана Пра-Горелый (1240-1190°C), чем для вулкана Молодой Горелый (1190-1125°C). В первом случае установлено присутствие в плагиоклазе первичных флюидных включений с CO₂ 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 CO₂. При закрытии системы и исчезновении самостоятельной фазы CO₂ рост плагиоклаза происходил из гомогенного расплава.

Ключевые слова:

Расплавные и флюидные (CO₂) включения, минералы – вкрапленники в эффузивах, промежуточные магматические камеры, РТ параметры магматизма, вулкан Горелый, Камчатка

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

В.А. Симонов^{1,3,4}, Н.Л. Добрецов^{2,3}, А.В. Котляров^{1,4}, Н.С. Карманов¹, А.А. Боровиков¹

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

²*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

³*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия*

⁴*Казанский федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия*

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, вулкан 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 вулкана Горелый наблюдался мощный этап кальдерообразования, во время которого на поверхность было выброшено около 120 км³ вулканогенного материала и в результате образовалась кальдера размерами около 13х9 км [Bindeman et al., 2010].

Для вулкана 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, вулкан 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 вулкана Горелый имеют длительную историю, уходящую в начало 20-го века [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 21-го века [Гавриленко, Озеров, 2009; Чашин, Мартынов, 2011; Duggen et al., 2007; Gavrilenko et al., 2016] рассматриваются петролого-геохимические характеристики пород вулкана Горелый, которые позволили выяснить с помощью ЭВМ-

Рис.1

моделирования физико-химические условия формирования и эволюции магм [Чащин и др., 2011]. Большой интерес представляют данные по летучим компонентам вулкана [Чаплыгин и др., 2015; Aicurra et al., 2012]. Получены важные данные по расплавленным включениям в минералах из эффузивов вулкана Горелый [Хетчиков и др., 2000, 2001; Толстых и др., 2012; Назарова и др., 2017], позволившие оценить составы магм и параметры генерации первичных расплавов.

Анализ отмеченных публикаций показал, что геологические, петрологические, геохимические и минералогические свойства эффузивных пород вулкана Горелый хорошо охарактеризованы и повторно их изучать не имеет смысла. Проведено ЭВМ-моделирование на основе составов пород. Рассмотрены также свойства расплавленных включений в минералах. В частности, в последнее время опубликованы результаты исследования расплавленных 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 вулкана Горелый. Соответственно получить принципиально новые данные, ограничившись только изучением расплавленных включений вряд ли возможно. В то же время, обзор имеющейся литературы по вулкану Горелый показал, что есть два вопроса, связанных с исследованием включений в минералах из эффузивов вулкана Горелый, которые практически не рассмотрены. Во-первых, при расчетном моделировании условий магматических систем не были использованы данные по расплавленным включениям, содержащим прямую информацию о минералообразующих средах. Во-вторых, отсутствуют данные по первичным флюидным включениям, содержащим CO_2 и позволяющим оценить роль углекислого газа в магмах при кристаллизации вкрапленников из эффузивов вулкана Горелый. Последнее имеет особую важность в связи с тем, что для этого вулкана устанавливается относительное обеднение H_2O с одновременным обогащением CO_2 по сравнению с высокотемпературными газами других вулканов Курило-Камчатской дуги [Aicurra et al., 2012].

Учитывая все отмеченное выше, целью настоящей статьи было определение физико-химических условий кристаллизации минералов и выяснение роли CO_2 на докальдерной и посткальдерной стадиях развития магматизма вулкана Горелый (Камчатка) с помощью расчетного моделирования на основе составов гомогенизированных расплавленных включений и в результате анализа флюидных включений с CO_2 .

Для решения поставленных задач основное внимание было уделено изучению первичных расплавленных включений в минералах из представительных базальтоидных образцов, характеризующих докальдерный (вулкан Пра-Горелый) и современный (Молодой Горелый) этапы развития вулканического центра Горелый. С целью сравнительного анализа были исследованы эффузивы вулкана Хангар (Южная Камчатка). При этом кроме проб авторов были использованы образцы Р.И. Кулакова (современные породы вулкана Горелый) и А.Б. Перепелова (вулкан Хангар). В общем необходимо подчеркнуть, что именно составы стекол прогретых гомогенизированных включений послужили основой для расчетного моделирования магматических систем, а первичные флюидные включения с CO_2 позволили выяснить особенности поведения летучих компонентов в расплавах вулкана Горелый.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Следует отметить особенности методического подхода, использованного при

исследовании магматизма вулкана 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 CO_2 , позволяющие рассмотреть процессы фазовой сепарации магм при кристаллизации минералов из эффузивов вулкана 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 вулкана 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 вулкана Горелый, которую получить другими методами практически невозможно.

В ходе изучения собранных на вулкане Горелый образцов, были просмотрены шлифы и тонкие (толщиной около 0.2 мм) полированные с обеих сторон пластинки для выяснения петрографических особенностей, 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 рентгено-флуоресцентного 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 вулкана 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 А.В., Соболев С.В., 1985; Бакуменко, 1986; и многие другие]. Эксперименты по гомогенизации расплавных включений при высоких температурах проводились в микротермокамере с

инертной средой [Соболев, Слуцкий, 1984] с применением имеющихся методик [Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994; и др.]. Учитывая то, 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 свыше 1000°C 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 секунд. 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 вулкана 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°C при помощи микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam».

В целом, для выяснения физико-химических параметров расплавов при кристаллизации вкрапленников эффузивов вулкана 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 минералов 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 физикохимические 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 вулкана 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 вулкана Пра-Горелый наиболее детально нами изучались оливиновые базальты и соответственно при расчетах глубин учитывалась плотность пород базальтового состава, которая согласно справочным данным из Интернета имеет следующие значения: базальт (твердая фаза) – около 2.97 г/см³, диабаз-базальт – 2.7-3.3 г/см³, невыветрелое габбро – 2.8-3.2 г/см³. Нами использовалось среднее из всех этих данных - около 3 г/см³. В то же время для вулкана Молодой-Горелый основное внимание было уделено исследованиям включений в

минералах из андезибазальтов и соответственно для оценки глубин кристаллизации использовались значения плотности именно этих пород, установленные для вулкана Безымянный на Камчатке [Ладыгин и др., 2012] – в среднем около 2.85 г/см^3 . В целом, учитывая плотностные характеристики базальтовых (около 3 г/см^3) и андезибазальтовых (около 2.85 г/см^3) пород, при сравнении с данными по обычной стандартной воде (давление в 1 кбар соответствует столбу H_2O 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 вулкана Горелый.

Глубины кристаллизации клинопироксенов дополнительно были оценены напрямую по программе [Yavuz, Yildirim, 2018] с использованием плотностно-глубинных моделей для островодужной коры. В частности применены данные по островным дугам, одна из которых (Jurassic Talkeetna arc, Alaska), располагающаяся на северо-восточном продолжении Алеутской дуги и имеющая 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 вулкана Горелый.

В общем, рассчитанные разными методами результаты сравнивались между собой и тестировались сейсмическими данными как по вулкану 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 вулкана 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]. Также 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_2O [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 то, 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 вулкана 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 вулкана Горелый с помощью программы PETROLOG с учетом информации из статьи [Назарова и др., 2017].

ГЕОЛОГО-ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭФФУЗИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВУЛКАНА 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. Выделяется несколько комплексов, но в целом в строении вулкана Горелый участвуют две основные постройки – древняя и современная (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 км³ 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-порфировые 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 вулкана Горелый и поэтому привлекают внимание многих исследователей [Гавриленко, Озеров, 2009; Толстых и др., 2012; Назарова и др., 2017; Duggen et al., 2007].

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 году во время экскурсии, проведенной под руководством д.г.-м.н. Ю.А. Озерова (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН). Был опробован ранне-плейстоценовый лавовый поток, относящийся к вулкану Пра-Горелый и располагающийся на северо-западном склоне сопки Двугорбая. При этом, точка опробования (52.531° с.ш.; 158.136° в.д.) находится в 350 м на ЮВ от места отбора образцов оливин-порфировых базальтов между горами Двугорбая и Скалистая (52.531° с.ш.; 158.134° в.д.), изученных ранее [Назарова и др., 2017]. Судя по схеме на рис. 1 в работе [Толстых и др., 2012], здесь же отобраны магнезиальные базальты докальдерной стадии, в оливине из которых были исследованы расплавные включения [Толстых и др., 2012].

Рис.2

Изученные оливиновые базальты содержат вкрапленники с расплавленными включениями. Причем фенокристы клинопироксена и плагиоклаза тесно ассоциируют друг с другом, а вкрапленники оливина находятся как бы 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 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 показано далее, несколько иной состав по сравнению с преобладающими вкрапленниками, содержащими расплавленные включения.

Рис.3

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 вулкана Горелый (сопка Горелая, 1829 м) из лавовых потоков современного этапа вулканизма. Порода содержит вкрапленники клинопироксена и плагиоклаза (размерами до 2 мм) с расплавленными включениями. Судя по взаимоотношениям (рис. 2 Б) эти сосуществующие минералы кристаллизовались одновременно. Отдельные достаточно редкие вкрапленники (до 1 мм) ортопироксена находятся в основной массе андезибазальтов вулкана Молодой Горелый, не образуя сростки с другими фенокристами.

Табл.1

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 вулкана 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 вулкана 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 вулкана Молодой Горелый сложена серией базальтовых, андезитовых и дацитовых эффузивов. Реконструкция показывает, что обе серии вулкана Горелый представляют собой родственные ряды пород, которые прошли 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 SiO₂. При этом тренды эволюции приурочены к пограничным областям между толеитами и известково-

щелочными сериями, а также между высококалиевыми и умереннокалиевыми породами. В то же время, отчетливо видны существенно более широкие вариации составов эффузивов

Рис.4

вулкана Пра-Горелый с трендами более медленного накопления (в частности K_2O) по сравнению с данными по современному вулкану Молодой Горелый (рис. 4).

В целом, петрохимические исследования показали, что магматизм изученных вулканов Пра-Горелый и Молодой Горелый обладает как общими чертами, 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 SiO_2 и скорости накопления K_2O и FeO .

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ ИЗ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД

Табл.2

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

Рис.5

Оливины из базальтов вулкана Пра-Горелый существенно отличаются от оливинов андезибазальтов вулкана Молодой Горелый повышенными значениями форстеритового компонента (соответственно $Fo = 77-85$ по сравнению с $Fo = 62-71$, рис. 5 А) и пониженным содержанием марганца (соответственно MnO 0.2-0.39 мас.% 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 вулкана Горелый ($Fo = 71-85$, [Толстых и др., 2012]; $Fo = 84-85$, [Назарова и др., 2017]) (рис. 5 А).

Ортопироксены из андезибазальтов вулкана Молодой Горелый по соотношению минералов ($En - Wo - Fs$) относятся к гиперстену. Для них намечается некоторый рост содержания Al_2O_3 с повышением магнезиальности (рис. 5 Б).

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

Плагиоклазы из базальтов вулкана Горелый наиболее детально изучались в ходе исследования расплавных включений. В таблице 2 представлены составы полевых шпатов, проанализированных преимущественно рядом с расплавными включениями. По содержанию анортитового компонента (57-87 An) плагиоклаз из магнезиального базальта вулкана Пра-Горелый соответствует лабрадору и битовниту. При этом плагиоклазы, находящиеся в тесном срастании 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 вулкана 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 (рис. 5 В).

Амфиболы были изучены только в магнезиальных оливиновых базальтах вулкана Пра-Горелый. Редкие микровкрапленники (около 0.5 мм) коричневатого цвета находятся в тесном сростании с плагиоклазом (см. рис. 3). По своему составу (табл. 2) они наиболее близки согласно 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

Рис. 6,7,8

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

Рис.6

Вулкан Пра-Горелый. Первичные расплавные включения (размеры 10-75 мкм) в **оливине** (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°C. Часть мелких включений гомогенизируется около 1170°C. После прогрева и закалки включения содержат гомогенное светло-коричневатое стекло и флюидный пузырек (рис. 6 Б).

Рис.7

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 (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 (рис. 6 В). Экспериментальные исследования свидетельствуют об относительно невысоких температурах гомогенизации включений – 1150-1205°C. После прогрева и закалки включения содержат преимущественно гомогенное светлое стекло (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 (рис. 6 Д). После прогрева и закалки включения в плагиоклазе заполнены светлым гомогенным стеклом, содержащим часто флюидные пузырьки (рис. 6 Е). Эксперименты в микротермокамере свидетельствуют о более высоких (чем для клинопироксена) и близких к данным по оливинам температурах гомогенизации включений: 1180-1240°C. Редко были установлены более низкие температуры - 1150°C. Выделяются две группы включений (с температурами гомогенизации выше 1210°C и ниже 1200°C), для каждой из которых 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 расплавных включений и находящихся в тесном срастании с амфиболами. Учитывая то, что эти минералы имеют относительно минимальные количества калия, температуры их формирования должны быть менее 1150°C (минимальные температуры гомогенизации в других вкрапленниках).

Рис.8

Вулкан Молодой Горелый. Во вкрапленниках *оливина* первичные расплавные включения (10-60 мкм) содержат множество фаз. Иногда можно различить светлые кристаллики. После гомогенизации (около 1180°C и редко - 1120°C, что ниже, чем в оливине из Пра-Горелого) включения содержат стекло и флюидный пузырек (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°C. После опытов и закалки включения содержат главным образом гомогенное стекло (рис. 8 Б).

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

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

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ

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

Рис.9

В *оливине* вулкана Пра-Горелый довольно часто совместно с первичными расплавными 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. 9 А). Значительно реже присутствуют светлые стекловатые фазы в ассоциации с округлыми флюидными пузырьками. Криометрические исследования с охлаждением до -193°C не привели к заметному вымораживанию CO₂ или сжижению N₂ и CH₄, что свидетельствует о низкой плотности содержащихся во включениях летучих компонентов. Анализ с помощью КР-спектроскопии, проведенный при температуре +140°C, не установил в их составе CO₂, CH₄, N₂, H₂, а также паров H₂O. Исключение составили некоторые включения, в которых

Рис.10

был обнаружен азот (рис. 9 Б).

В *плагиоклазе* вулкана Пра-Горелый были найдены первичные флюидные включения, формирующие зоны роста во вкрапленниках (рис. 10 А). Часто наблюдается

равномерное расположение включений с ориентировкой вдоль полисинтетических двойников (рис. 10 Б). Объемные округлые включения (размерами 10-20 мкм) имеют отчетливую огранку и тесно ассоциируют с первичными расплавленными включениями (рис. 10 В). Криометрические исследования с охлаждением до -193°C флюидных включений приводили к вымораживанию незначительных количеств твердой CO_2 , которая отчетливо плавилась при температуре -56.6°C и тут же гомогенизировалась в газовую фазу при температуре $-56.4 - -55^{\circ}\text{C}$, то есть плотность флюидной фазы составляет 0.015 г/см^3 . Анализ с помощью КР-спектроскопии подтвердил присутствие во флюидных включениях малоплотной CO_2 (рис. 10 Г), при этом других газов и паров H_2O обнаружено не было.

Рис.11 Необходимо отметить, что первичные флюидные включения с малоплотной углекислотой, находящиеся в ассоциации с первичными расплавленными включениями и свидетельствующие о процессах фазовой сепарации расплавов при кристаллизации фенокристаллов, характерны не только для вулкана Горелый, но присутствуют в магматических вкрапленниках из эффузивов других вулканических комплексов [Бакуменко и др., 1999; и др.]. Также подобная ситуация (как показали предварительные результаты наших исследований) присутствует и в плагиоклазе из риолитов, формирующих современную постройку вулкана Хангар, Камчатка (рис. 11). Таким образом, установленное нами наличие сингенетичных флюидных (CO_2) и расплавленных включений в минералах эффузивов вулкана Горелый не является уникальным дискуссионным случаем и свидетельствует о реальности фазовой сепарации расплавов в вулканогенных магматических системах.

Табл.3

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 $\text{FeO/MgO} - \text{SiO}_2$ практически все данные по включениям в оливинах и в плагиоклазах отвечают породам

Рис.12

толеитовой серии, также как и сами детально изученные образцы базальта и андезибазальта.

На вариационных диаграммах включения в оливине и в плагиоклазе для вулканов Пра-Горелый и Молодой Горелый в большинстве случаев близки к данным по породам вулкана Горелый в целом, показывая падение содержания железа, магния, кальция и рост натрия на фоне накопления SiO_2 (тренд № 1 на рис. 12). Необходимо 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 вулкана Горелый, попадая на наш тренд № 1. Таким образом, полученные независимо друг от друга данные по включениям в оливине и в плагиоклазе вулкана 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 MgO, CaO и пониженными значениями Al_2O_3 , Na_2O . В целом, имеющиеся сложные (с изгибами) тренды (TiO_2 , MgO, Al_2O_3), по нашему мнению, позволяют предположить различные пути эволюции расплавов с оливином (46-48 мас.% SiO_2) и без оливина (50-64 мас.% SiO_2).

Необходимо отметить, 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 вулкана 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 «Геолого-петрохимические особенности эффузивных комплексов вулкана Горелый» (и на рисунке 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.

Рис.13

На рисунке 13 приведены соотношения содержаний 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 между полями составов включений в сосуществующих клинопироксенах и плагиоклазах в эффузивах вулкана Пра-Горелый (G1-18) и Молодой Горелый (Г8-1). К сожалению, выяснилось, что этот метод показывает конкретные результаты преимущественно с контрастными по своим

Рис.14

содержаниям элементами, а с большинством других (особенно с фактически отсутствующими в составах минералов) не дает однозначных решений. Учитывая то, 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 (рис. 13), нами в качестве средних содержаний петрохимических компонентов в первоначальном расплаве были приняты данные, располагающиеся на середине линии (отмеченной точками), соединяющей центры полей составов включений в сосуществующих клинопироксенах и плагиоклазах (рис. 14). Правомерность подобного подхода подтверждается тесной ассоциацией полученных результатов на рисунке 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 образца 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 вулкана 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 (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 (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.

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 вулкана Горелый, что и наш образец 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. табл. 1 в работе [Назарова и др., 2017]), 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 ($Fo = 82.5$), 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 ($1230^{\circ}C$), фактически совпадающая с температурой гомогенизации включения – около $1240^{\circ}C$.

УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ В ГЛУБИННЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВУЛКАНА 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 вулкана 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; и др.]. Ранее было измерено количество воды во включениях в оливине из магнезиальных базальтов вулкана Горелый – 0.3 мас.% [Назарова и др., 2017]. 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 вулкана 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 вулкана Горелый [Gavrilenko et al., 2016]. В ходе расчетного моделирования нами были использованы практически все эти значения H_2O .

Среди эффузивов **вулкана 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 вулкана 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 **вулкана 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.%.

Рис.15

В целом расчеты по программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] показали, что минералы из эффузивов вулкана Горелый кристаллизовались при давлениях, значения которых формируют два отчетливых интервала (7-5 кбар и 3-0.5 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 км 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 вулкана Пра-Горелый (1242-1192°C), чем в случае вулкана Молодой Горелый (1192-1124°C). Эволюция PT - параметров также существенно различается - магмы вулкана Пра-Горелый при подъеме из глубинных условий (24 км) до близповерхностных (до 1.7 км) сохраняют свои максимальные (до 1242°C) температуры, в то время как для вулкана Молодой Горелый наблюдается закономерное снижение температур (1192-1130°C) при подъеме расплава с 25 км до 1.8 км (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°C), которые в целом подтверждают полученные с помощью

PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] *PT* - параметры. Необходимо отметить, что для оливиновых базальтов вулкана Пра-Горелый и андезибазальтов Молодого Горелого давления весьма близки (7-1 кбар и 6-1 кбар) и соответственно нет существенных различий в глубинах кристаллизации (24-3.4 км и 22-3.6 км), рассчитанных на основе данных по давлениям и согласно плотностным характеристикам (см. «Методы исследования»), а температуры заметно различаются (1260-1140°C и 1215-1115°C). Глубины кристаллизации клинопироксенов, рассчитанные напрямую в рамках программы WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018] с использованием плотностных моделей для

Рис.16

островодужной коры [DeBari, Greene, 2011] составили 10-6.5 км. Эти значения попадают в отмеченные выше интервалы.

Расчетное моделирование по программе COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] вулкана Пра-Горелый проводилось на основе данных по составу первичного расплава, находившегося в равновесии с оливином (табл. 1 в работе: [Назарова и др., 2017]). Моделировалась равновесная декомпрессионная кристаллизация, начиная с давления 8 кбар и содержания H₂O 1.5 мас.%, при буфере QFM+1.5 (согласно рекомендации в работе [Gavrilenko et al., 2016]). Было выяснено, что начиная с 1230°C и давлении 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 вулкана Молодой Горелый, при расчетном моделировании по программе COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] главное внимание было уделено расплавленным включениям 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 кбар и 2 кбар (нижняя и верхняя камеры), а также декомпрессионная система (начиная с 8 кбар), буфер QFM+1.5. Содержание воды: 0.7 мас. % (данные непосредственных замеров включений в плагиоклазах вулкана Горелый из работы [Толстых и др., 2012]) и 3 мас.% (согласно [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 мас.% 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 вулкана 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 вулкана Горелый (вулкан Пра-Горелый) происходила в довольно широком интервале давлений (7-2 кбар) и при температурах 890-860°C. При этом, как было отмечено выше, рассмотренные амфиболы находятся в тесном сростании с плагиоклазами (содержащими меньше калия, чем основная группа плагиоклазовых вкрапленников с расплавленными

включениями) и соответственно обладающими более низкими (менее 1150°C) температурами кристаллизации, что согласуется с рассчитанными параметрами (начиная с 890°C) формирования амфиболов.

ФАЗОВАЯ СЕПАРАЦИЯ ГЛУБИННЫХ РАСПЛАВОВ ВУЛКАНА ПРА-ГОРЕЛЫЙ

Детальные исследования магнезиальных оливиновых базальтов вулкана Пра-Горелый позволили установить активную роль CO₂ 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 свидетельствует о преобладании в них CO₂, что свидетельствует о значительной роли углекислоты в расплавах, из которых кристаллизовались эти вкрапленники.

Исследования **вкрапленников плагиоклаза** показали наличие первичных флюидных включений, формирующих зоны роста, а также располагающихся равномерно по объему кристалла (рис. 10 А, Б). Важен факт сонахождения первичных флюидных и расплавных включений (рис. 10 В), свидетельствующий об их сингенетичности и гетерофазности расплава, из которого рос плагиоклаз. Криометрические исследования и КР-спектроскопия (рис. 10 Г) говорят о преобладании углекислоты в этих флюидных включениях. Таким образом, на основе исследования первичных флюидных включений с CO₂ можно сделать обоснованный вывод о кристаллизации плагиоклаза из гетерофазного (расплав насыщенный микропузырьками газового CO₂) расплава.

В целом, на основе изучения зональных фенокристов плагиоклаза оказалось возможным расшифровать историю развития гетерофазных магматических систем вулкана 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 CO₂) расплава и выделению CO₂ 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 вулкана Пра-Горелый и формирования последующих современных комплексов вулкана Молодой Горелый.

Прежде всего, хотелось бы отметить, что при сравнении результатов, полученных различными методами, необходимо учитывать, что на рис 15 нашей статьи показаны ликвидусные температуры, рассчитанные по соответствующей системе программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и представляющие максимальные значения температур кристаллизации минералов. Соответственно они могут превышать параметры,

рассчитанные, в частности по программе COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004] (рис. 16) и приведенные в работах других исследователей [Чащин 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°C), а также амфиболов (890-860°C) хорошо согласуются с ранее опубликованными данными по магматизму вулкана Горелый: 1116-1221°C [Чащин и др., 2011], 780-1230°C [Seligman et al., 2014], 1121-1177°C [Назарова и др., 2017].

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

Установленные нами параметры давлений, при которых формировались вкрапленники минералов из эффузивов вулкана Горелый, укладываются в достаточно широкий диапазон (7-0.5 кбар), показывая соответственно глубины кристаллизации от 25 км 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 вулкана 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 вулкана Горелый при давлениях 6-8 кбар и 1-1.5 кбар. Об этом же свидетельствуют и давления в 5-6 кбар, установленные для магматических систем вулкана 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; Добрецов и др., 2016, 2017, 2019; Levin et al., 2014].

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 км и 10-1.7 км характерны для обоих вулканов - Пра-Горелый и Молодой Горелый. При этом устанавливаются разные температурные режимы (рис. 15) с более высокими

характеристиками для вулкана Пра-Горелый (1240-1190°C), чем в случае вулкана Молодой Горелый (1190-1125°C). Эволюция *PT* - параметров также различается: магмы вулкана Пра-Горелый при подъеме из глубинных условий (24 км) до фактически близповерхностных (до 1.7 км) сохраняют свои максимальные (до 1240°C) температуры, в то время как для вулкана Молодой Горелый наблюдается закономерное снижение температур (1190 → 1130°C) при подъеме расплава с глубин 25 км до 1.8 км. В целом, установленные нами параметры давлений (7-5 кбар и до 0.5 кбар) в двух промежуточных камерах (рис. 15) хорошо согласуется с данными предыдущих исследователей, показавших, что первый этап развития магматизма вулкана Горелый характеризуется высокими давлениями (6-8 кбар), а кристаллизация на втором этапе проходила в близповерхностных условиях (1-1.5 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 вулкана Горелый (вулкан Пра-Горелый) рассмотрены с помощью амфиболовых термометров. Было установлено, что кристаллизация амфиболовых вкрапленников в базальтах в докальдерную стадию происходила при температурах 890-860°C. При этом плагиоклазы, находящиеся в тесном срастании с амфиболами также имеют довольно невысокие (менее 1150°C) параметры. Реальность таких достаточно низких температур для магматизма вулкана Горелый подтверждается данными в работе [Seligman et al., 2014] – минимальные значения около 780°C. При близких температурах (930-1010°C) кристаллизуются амфиболы эффузивов вулканов Ичинский и Уксичан [Добрецов и др., 2019].

В то же время, наблюдается несогласованность установленных относительно низких температур (максимум 890°C) кристаллизация амфиболов с рассчитанными для них высокими давлениями (до 7 кбар), которые могут свидетельствовать о весьма значительных (более 20 км) глубинах. К тому же время, существование подобных низкотемпературных расплавов на больших глубинах не подтверждается результатами наших исследований расплавных 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 крайне не часто и незначительны по размерам. Таким образом, ситуация, в которой формировались амфиболы из оливиновых базальтов вулкан Пра-Горелый, была весьма редкой и соответственно связанной с локальными процессами, приводившими к повышению давления.

В целом, результаты наших исследований составов стекол гомогенизированных расплавных включений не противоречат данным, полученным другими исследователями по включениям в плагиоклазе и в оливине [Толстых и др., 2012; Назарова и др., 2017], соответствуя в общем по большинству рассмотренных химических компонентов (рис. 12) вариациям составов эффузивов вулкана Горелый.

Проведенное расчетное моделирование на основе данных по расплавным включениям позволило оценить содержание воды в магматических системах вулкана Горелый. В имеющихся публикациях показано, что количество H₂O 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 (соответственно при подъеме магмы) происходило накопление воды в расплаве (рис. 16): при $7 \rightarrow 5$ кбар количество H_2O растёт от 1.5 до 2 мас.%. В последующем (при $3 \rightarrow 1$ кбар) происходит максимальное

Рис.17

накопление воды (от 2.8 до 3.6 мас.%). Таким образом, повышенные (3 мас.% [Gavrilenko et al., 2016]) количества H_2O в магмах вулкана Горелый получают свое подтверждение.

Как было отмечено выше, судя по имеющимся данным [Ahipra et al., 2012], для вулкана 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 вулкана Пра-Горелый играют исследованные нами первичные флюидные включения с CO_2 низкой плотности, сингенетичные первичным расплавленным 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 (шириной до 100 мкм, 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 вулкана Пра-Горелый, и соответственно установленные на основе их изучения процессы вскипания (фазовой сепарации) расплава происходили в докальдерную стадию развития магматизма вулкана 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 расплавленных и флюидных включений, минералов, а также расчетное моделирование на основе данных по составам расплавленных включений, клинопироксенов и амфиболов (с использованием современных программ (PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], COMAGMAT [Арискин, Бармина, 2000; Ariskin, Barmina, 2004], WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018]) позволили выявить особенности физико-химических параметров магматических систем в ходе развития докальдерного вулкана Пра-Горелый и при формировании последующих современных комплексов вулкана Молодой Горелый.

2. С помощью исследования расплавленных 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°C), а также амфиболов (890-860°C), хорошо согласующиеся с ранее опубликованными данными по магматизму вулкана Горелый: 1116-1221°C [Чашин и др., 2011], 780-1230°C [Seligman et al., 2014], 1121-1177°C [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 км 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 вулкана Пра-Горелый (1240-1190°C), чем в случае вулкана Молодой Горелый (1190-1125°C).

4. Установлено присутствие в плагиоклазе первичных флюидных включений с CO₂ 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 CO₂. Затем в связи с исчезновением самостоятельной фазы CO₂ 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-порфировых базальтов. Благодарим профессоров С.З. Смирнова и М.Г. Гавриленко, а также всех других специалистов, принявших участие в дискуссии по результатам исследований магматизма вулкана Горелый, за критические замечания, способствовавшие улучшению статьи. Работа выполнена по государственным заданиям ИГМ СО РАН и ИНГГГ 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., Ярмолук В.В. Об условиях формирования вулкаников Западно-Забайкальской позднемезозойской кайнозойской вулканической области (по данным изучения расплавных и флюидных включений в минералах). // Геохимия, т. 12, 1999, 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, 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., 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.

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.

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 / Отв. ред. С.А. Федотов. Петропавловск-Камчатский, 1985, с. 32-33.

Кирсанов И.Т., Мелекесцев И.В. Вулкан Горелый // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2 / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М., Наука, 1991, с. 294-315.

Кирсанов И.Т., Озеров А.Ю. (1983) Состав продуктов и энергетический эффект извержения вулкана Горелый в 1980-1981 гг. // Вулканология и сейсмология, 1983, № 1, с.25-42.

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. 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 H₂O 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. Санкт-Петербург: 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: Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.

Соболев А.В., Соболев С.В. Теория, практика и петрологические применения методов исследования расплавных включений в минералах // Термобарометрия и геохимия

рудобразующих флюидов. Ч.1., Львов, 1985, 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.

Соболев А.В., Слущкий 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.

Толбачинское трещинное извержение 2012-2013 гг. (ТТИ-50) / Отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. 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). // Доклады Академии Наук, 2015, 463(1), с. 85-89.

Чащин А.А. Игнимбриты вулкана Горелого (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., McGonigle A.J.S., Taran Y. First volatile inventory for Gorely volcano, Kamchatka // Geophysical Research Letters, 2012, 39(6), L06307.

Ariskin A.A., Barmina G.S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // Geochemistry International, 2004, v. 42 (Supp. 1), p. S1-S157.

Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., Chen C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2010, v. 189, p. 57-80.

Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, v. 12, is. 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 // *Bulletin of Volcanology*, 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 // *American Mineralogist*, 2012, v.97 (11-12), p. 2031-2048.

Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimental calibration of the aluminium-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 // *Geosciences*, 2017, v. 7, p. 1-16.

Krawczynski M.J., Grove T.L., Behrens H. Amphibole stability in primitive arc magmas: effects of temperature, H₂O content, and oxygen fugacity // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2012, v. 164 (2), p. 317-339.

Leake BE, Woolley AR, Arps CES, Birch WD, Gilbert MC, Grice JD, Hawthorne FC, Kato A, Kisch HJ, Krivovichev VG, Linthout K, Laird J, Mandarino J, Maresch WV, Nickel EH, Schumacher JC, Smith DC, Stephenson NCN, Ungaretti L, Whittaker EJW, 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., et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission 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 // *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, № 166, p. 1545-1561.

Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *American J. Science*, 1970, v. 274, p. 321-355.

Putirka K.D. Thermometers and barometers for volcanic systems // *Rev Miner. 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, is. 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 // *Journal of Petrology*, 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 Conference Series: Earth and Environment Science (EES)*, 2019, 367, p. 1-21.

Sobolev A.V., Chaussidon M. H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-oceanic ridges: Implications for H₂O storage and recycling in the mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, v. 137, p. 45-55.

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, is. 5, p. 1183-1211.

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

Yavuz F., Yıldırım D.K. WinPLtb: A Windows Program for Pyroxene-Liquid Thermobarometry // Periodico di Mineralogia, 2018, v. 87, Iss. 2, p. 149-172.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

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

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

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

А Соотношение фенокристаллов в оливиновом базальте вулкана Пра-Горелый (образец G1-18). Ol – оливин, Срх – клинопироксен, Pl – плагиоклаз. Б Одновременная кристаллизация вкрапленников клинопироксена (Срх) и плагиоклаза (Pl) в андезибазальте вулкана Молодой Горелый (Г8-1).

Рис. 3. Сложное строение вкрапленников, содержащих амфиболы в сростании с плагиоклазом в оливиновом базальте вулкана Пра-Горелый (образец 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.

Рис. 4. Составы (мас.%) эффузивов вулкана Горелый.

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

Рис. 5. Составы вкрапленников из эффузивов вулкана Горелый.

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

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

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

Рис. 7. Первичное расплавное включение с флюидной фазой в оливиновом вкрапленнике из базальта вулкана Пра-Горелый.

А Светлым кружком показано место анализа флюидной фазы. Б КР-спектр флюидной фазы в первичном расплавном включении в оливине.

Рис. 8. Первичные расплавные включения в минералах из андезибазальтов вулкана

Молодой Горелый.

Прогретые, гомогенизированные и закаленные расплавные включения в оливине (А, температуры гомогенизации: 1120-1180°C), ортопироксене (Б, 1165-1190°C), клинопироксене (В, 1120-1150°C) и в плагиоклазе (Г, 1160-1200°C) из андезибазальта вулкана Молодой Горелый.

Рис. 9. Вторичные флюидные включения (А) в оливиновых вкрапленниках из базальтов вулкана Пра-Горелый.

Б КР-спектр флюидной фазы. 1 – азот во включении; 2 – фоновый азот в чистой минеральной матрице.

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

Расположение флюидных включений по зонам роста (А) и равномерно по кристаллу (Б) плагиоклаза. Первичные сингенетичные 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) вулкана Хангар.

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

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

Расплавные включения в минералах: оливинового базальта вулкана Пра-Горелый (1 – оливин, 2 – клинопироксен, 3 – плагиоклаз), андезибазальта вулкана Молодой Горелый (4 – оливин, 5 – клинопироксен и ортопироксен, 6 – плагиоклаз). Поля расплавных включений в оливине (IOI) и в плагиоклазе (IPi) из базальтов и андезибазальтов вулкана Горелый по данным предыдущих исследователей [Толстых и др., 2012]. Серым цветом обозначено поле эффузивов вулкана 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, 2, 3) показывают разные пути изменения состава расплавов при кристаллизации вкрапленников.

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

А - оливиновый базальт вулкана Пра-Горелый. Б - андезибазальт вулкана 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.

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

А, Б - оливиновый базальт вулкана Пра-Горелый. В, Г - андезибазальт вулкана

Молодой Горелый. 1-4 – данные по составам стекол гомогенизированных 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, 2, 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.

Рис. 15. Сравнение условий кристаллизации глубинных расплавов при формировании базальтов вулкана Пра-Горелый (светлые значки) и андезибазальтов вулкана 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 вулкана Пра-Горелый (1 – оливин, 2 – клинопироксен, 3 – плагиоклаз), андезибазальта вулкана Молодой Горелый (4 – оливин, 5 – клинопироксен и ортопироксен, 6 – плагиоклаз). L км – глубина кристаллизации минералов. T °C – температуры кристаллизации минералов в °C.

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

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

Рис. 17. Фазовая сепарация расплавов вулкана Пра-Горелый.

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

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

№ п.п.	№ образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	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 вулкана Пра-Горелый; 2 - андезибазальт вулкана Молодой Горелый.

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

Оливины

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ 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	н.о.	99,99	70,44
15	175	37,48	25,23	0,55	36,49	0,25	н.о.	100,00	71,35
16	176	37,19	26,70	0,62	35,21	0,28	н.о.	100,00	69,38

Примечание. 1-12 – оливины из оливинового базальта вулкана Пра-Горелый; 13-16 – оливины из андезибазальта вулкана Молодой Горелый. н.о. – содержание компонента не определялось. Fo – значения форстеритового компонента.

Пироксены

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ 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	н.о.	100,00	70,29
14	157	52,89	0,51	1,68	17,49	0,44	24,59	2,40	н.о.	100,00	71,47
15	158	53,51	0,25	1,04	18,30	0,60	24,39	1,90	н.о.	99,99	70,37
16	159	53,46	0,25	0,80	18,49	0,57	24,52	1,92	н.о.	100,01	70,27
17	160	53,06	0,30	0,84	19,00	0,55	24,16	2,09	н.о.	100,00	69,38
18	164	53,56	0,38	1,42	16,99	0,63	24,56	2,22	н.о.	99,76	72,04
19	167	52,87	0,43	1,08	18,87	0,59	24,16	1,99	н.о.	99,99	69,53

20	168	53,45	0,40	1,05	18,58	0,52	24,07	1,93	н.о.	100,00	69,78
----	-----	-------	------	------	-------	------	-------	------	------	--------	-------

Примечание. 1-11 – клинопироксены; 12-21 – ортопироксены; 1-5 – пироксены из оливинового базальта вулкана Пра-Горелый; 6-20 - пироксены из андезита базальта вулкана Молодой Горелый. н.о. – содержание компонента не определялось. $Mg\# = Mg \cdot 100 / (Mg + Fe)$, ф. е.

Амфиболы

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Al ^{IV}
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 вулкана Пра-Горелый в тесном сростании с плагиоклазом. н.о. – содержание компонента не определялось. Al^{IV} – алюминий в четверной координации, ф. е.

Плагиоклазы

№ п.п.	№ анализа	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	An
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 вулкана Пра-Горелый (1-12 – вкрапленники с расплавленными включениями, 13-18 – плагиоклазы в сростках с амфиболами); 19-33 – плагиоклазы из андезитобазальта вулкана Молодой Горелый. Ап – содержание анортитового компонента (%).

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

Включения в оливинах

№ п/п	№ анализ а	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма	T _{гом}	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 вулкана Пра-Горелый; 15-17 - включения в оливинах из андезибазальта вулкана Молодой Горелый. T_{гом} – температуры гомогенизации включений в °С. Fo – содержание форстеритового компонента (%) в оливине-хозяине.

Включения в пироксенах

№ п/п	№ анализ а	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма	T _{гом}	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 вулкана Пра-Горелый; 5-17 - андезибазальт вулкана Молодой Горелый. $T_{\text{гом}}$ – температуры гомогенизации включений в °С. Mg# – магнезиальность ($\text{Mg} \cdot 100 / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$) пироксена-хозяина.

Включения в плагиоклазах

№ п/п	№ анализ а	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма	$T_{\text{гом}}$	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 оливинового базальта вулкана Пра-Горелый; 19-35 - включения в плагиоклазах из андезибазальта вулкана Молодой Горелый. $T_{\text{гом}}$ –

температуры гомогенизации включений в °С. Ап – содержание анортитового компонента (%) в плагиоклазе-хозяине.

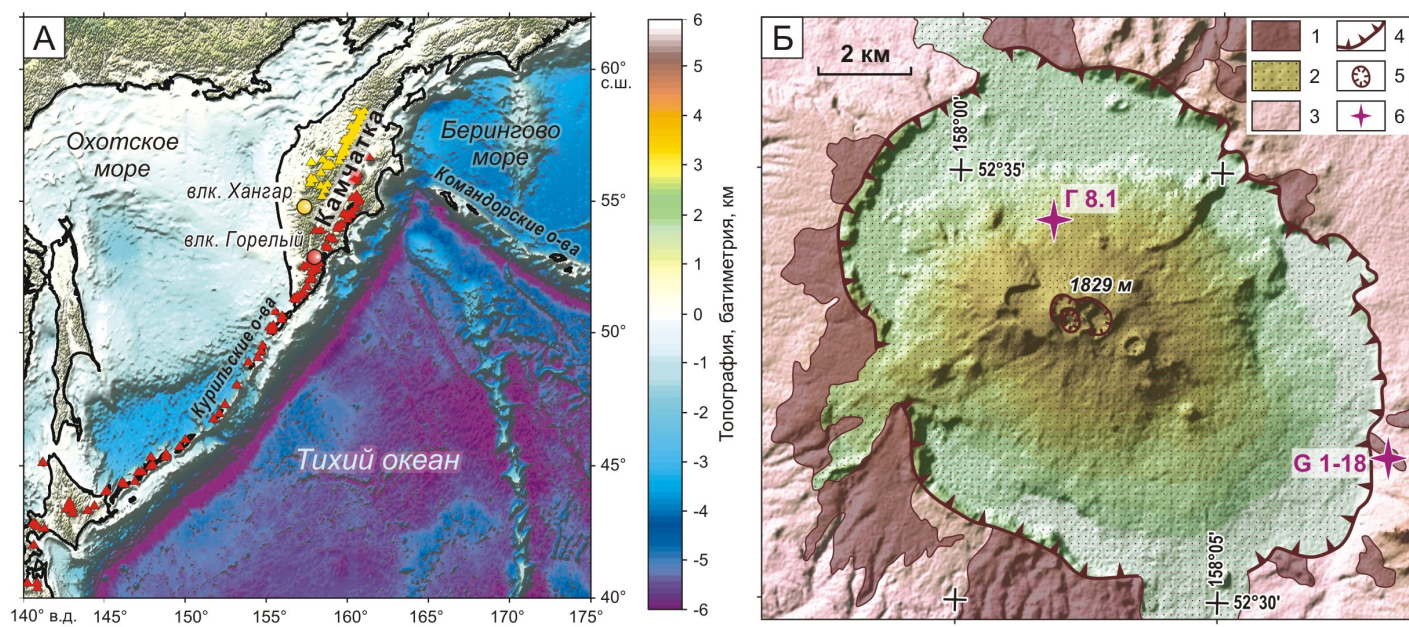


Рис. 1. В.А. Симонов...

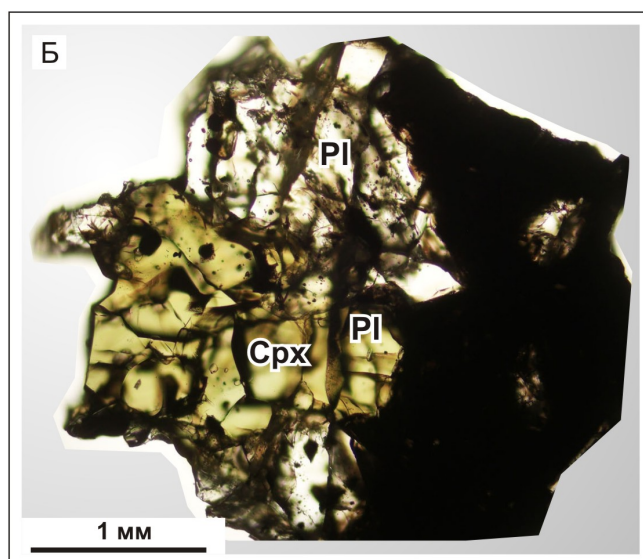
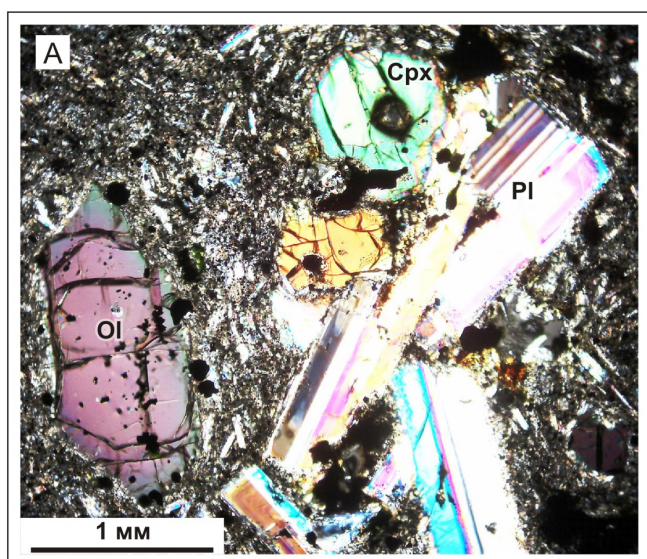


Рис. 2. В.А. Симонов...

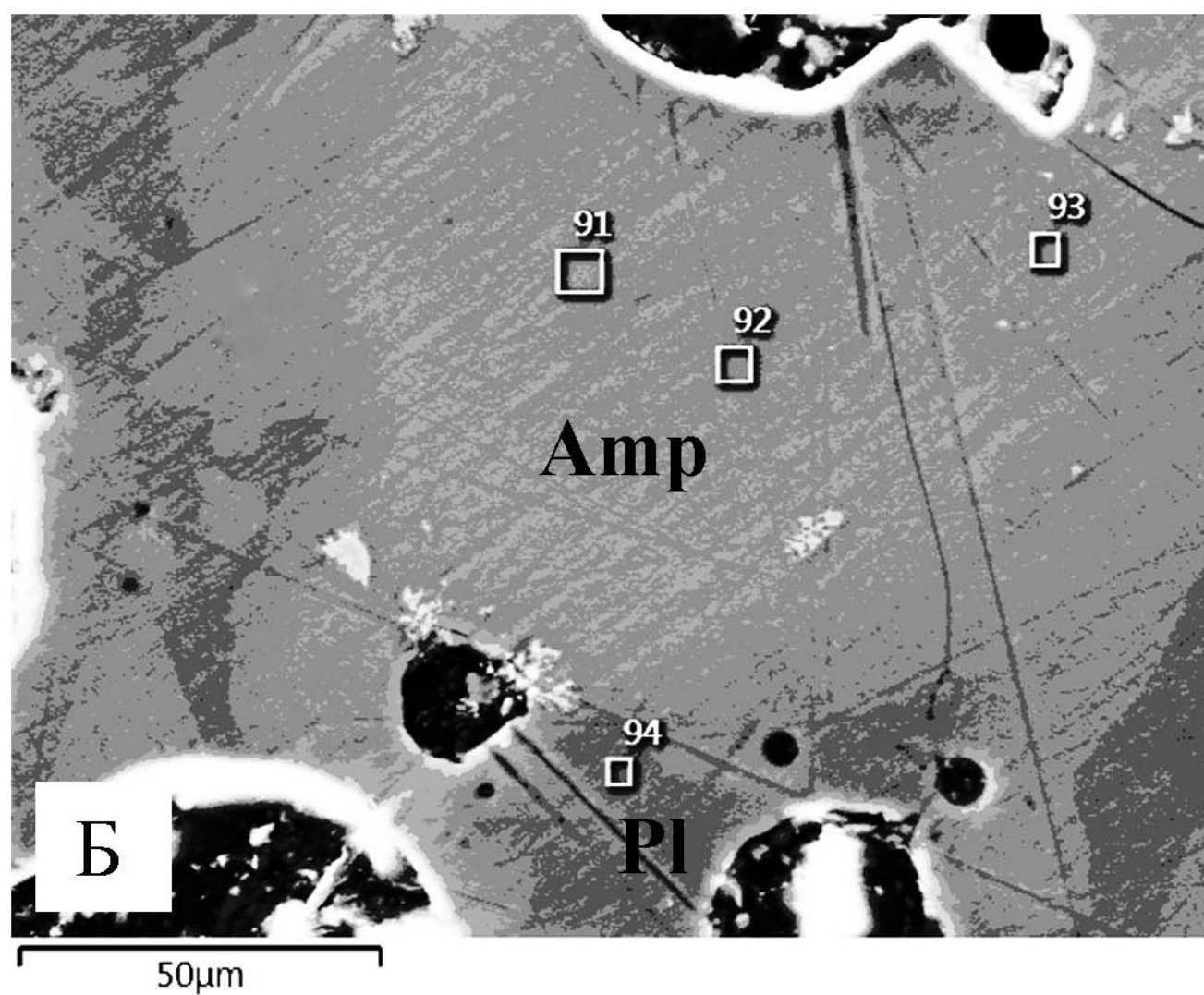
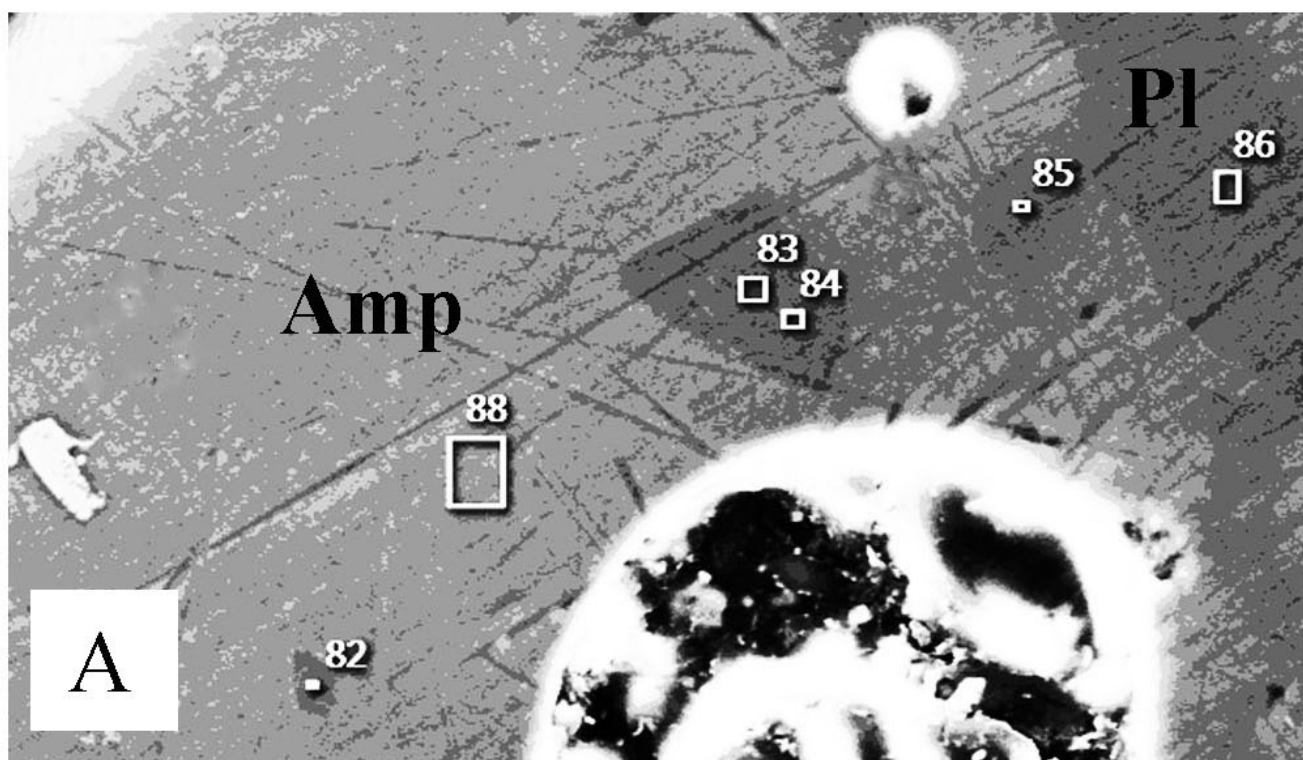


Рис. 3. В.А. Симонов...

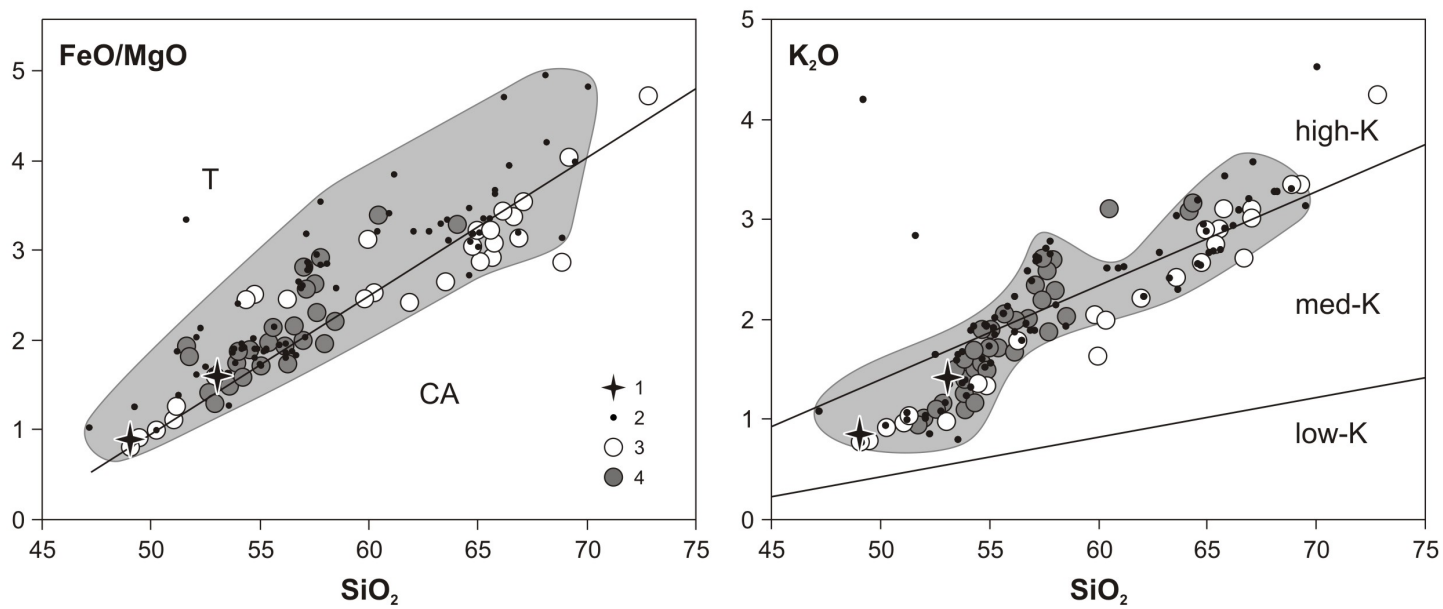


Рис. 4. В.А. Симонов...

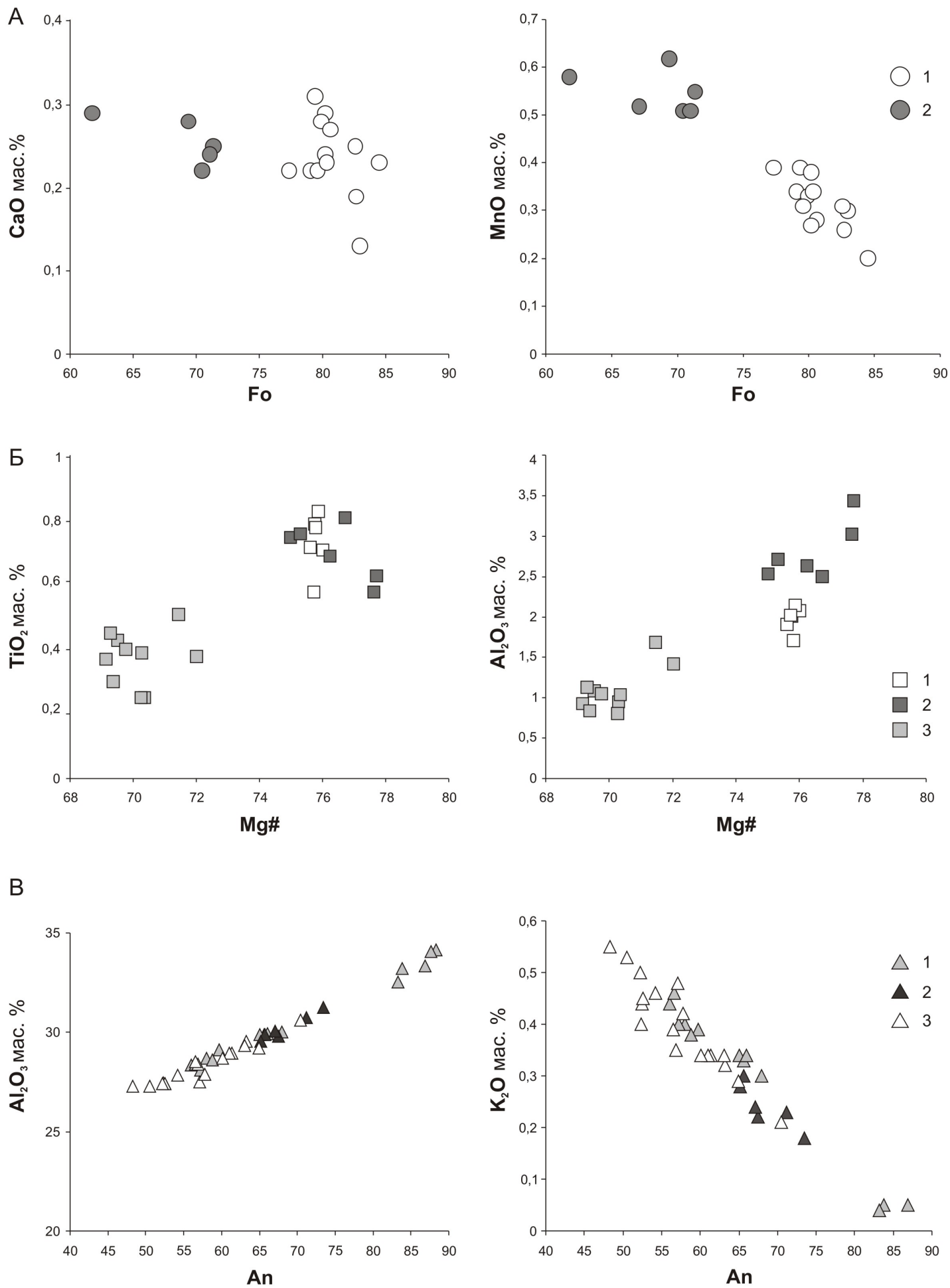


Рис. 5. В.А. Симонов...

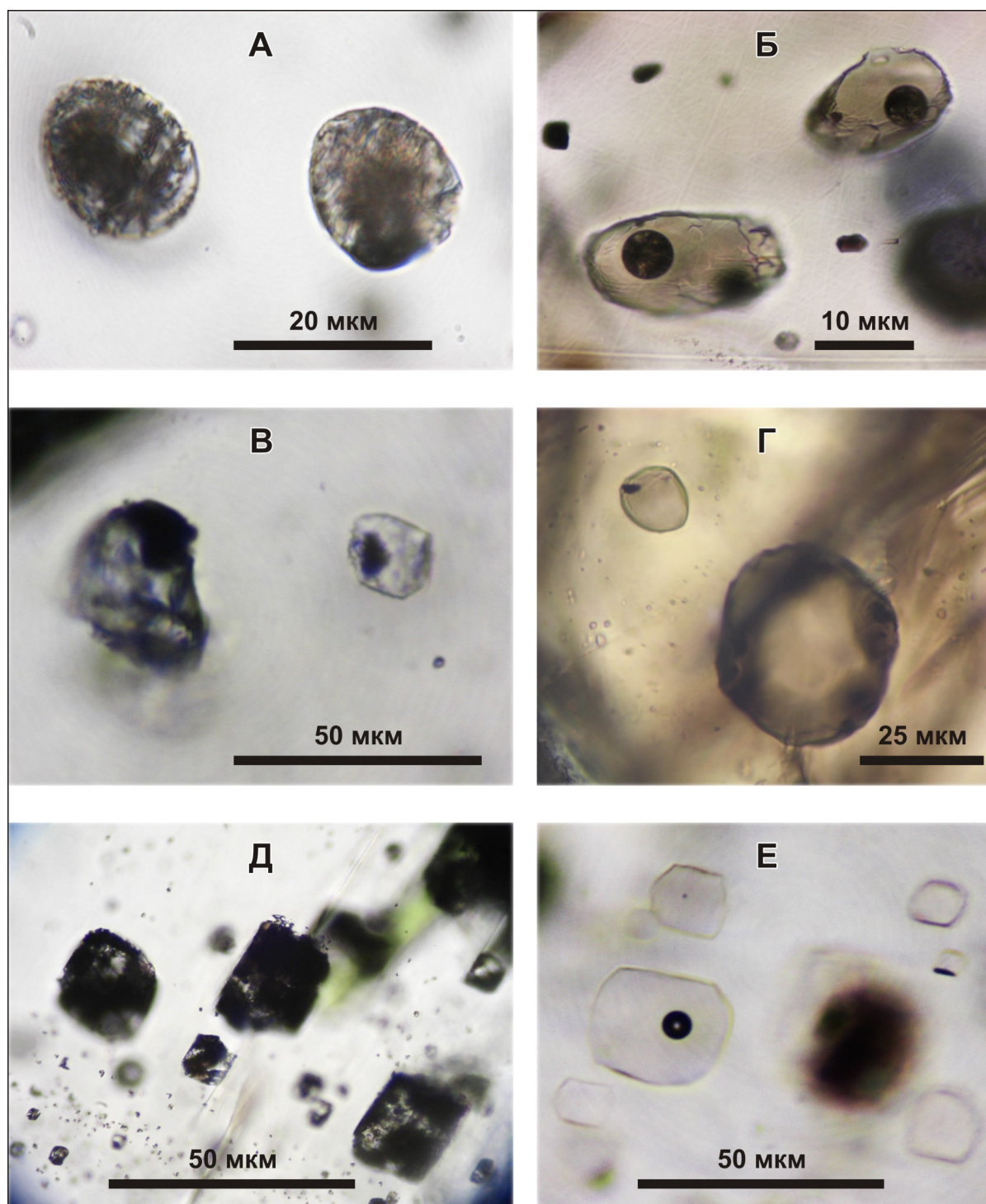


Рис. 6. В.А. Симонов...

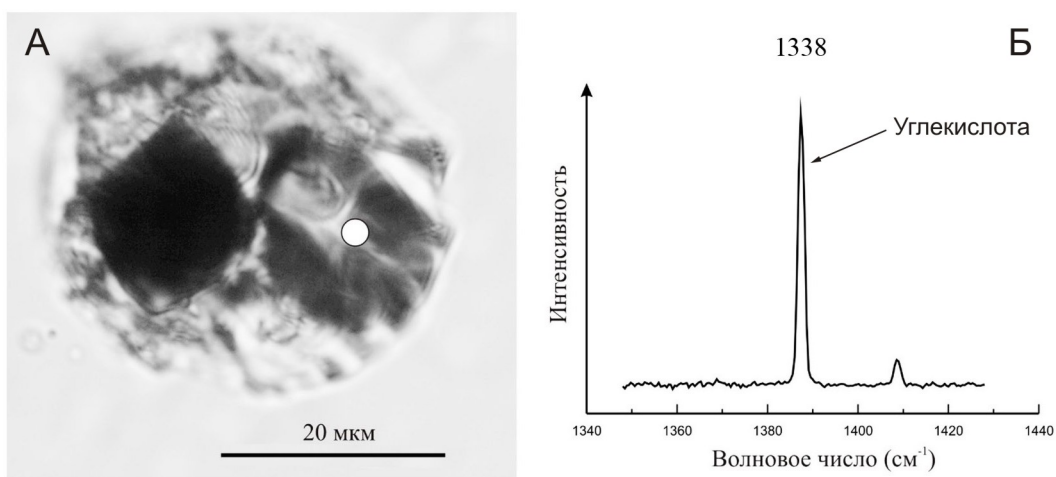


Рис. 7. В.А. Симонов...

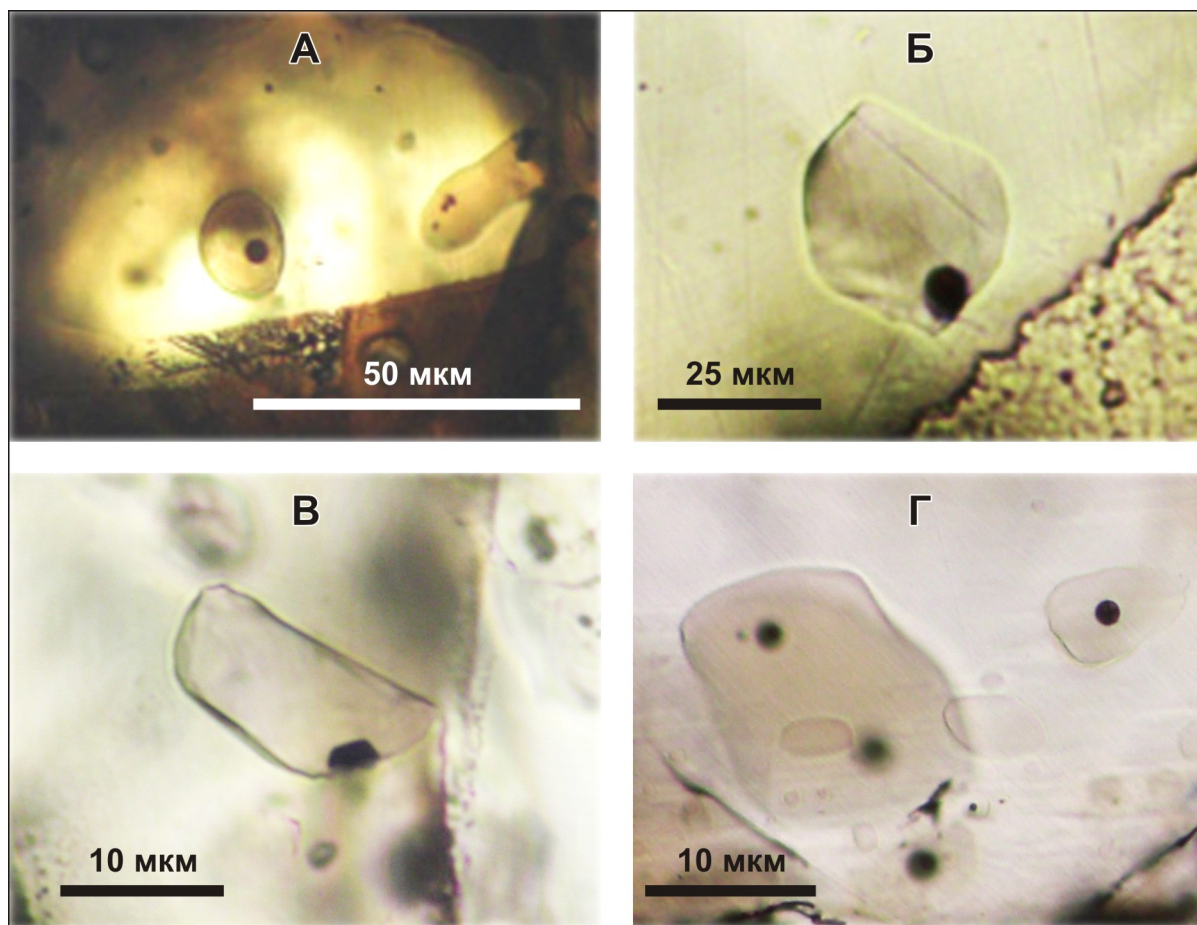


Рис. 8. В.А. Симонов...

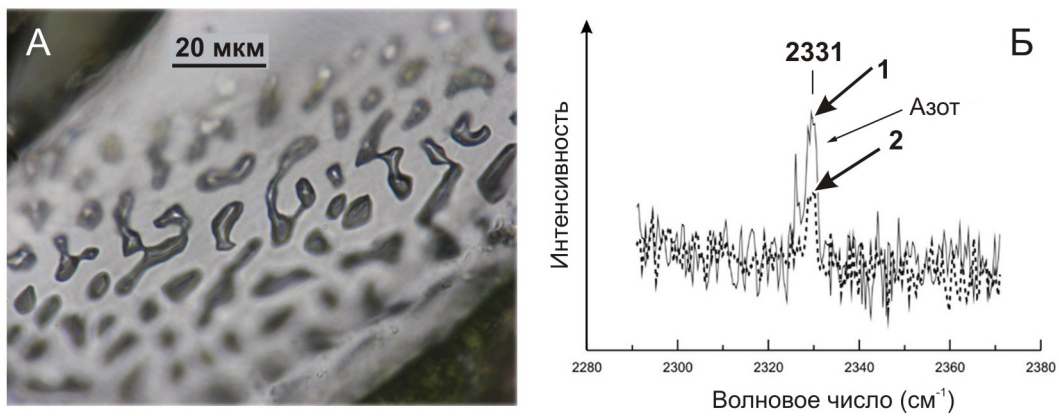


Рис. 9. В.А. Симонов...

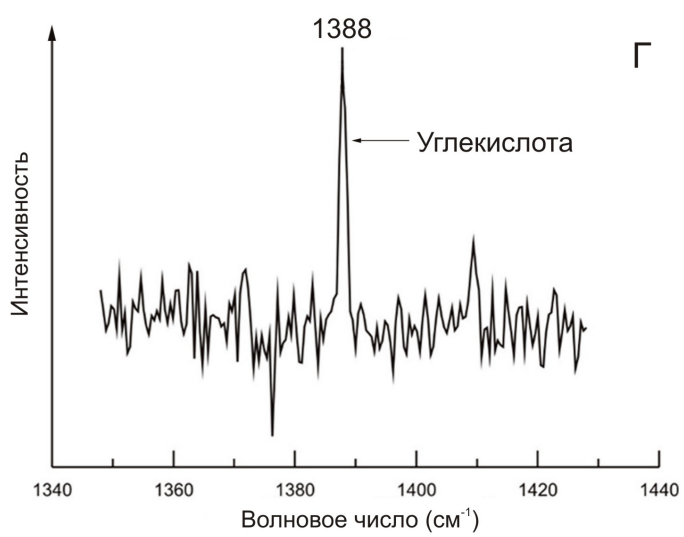
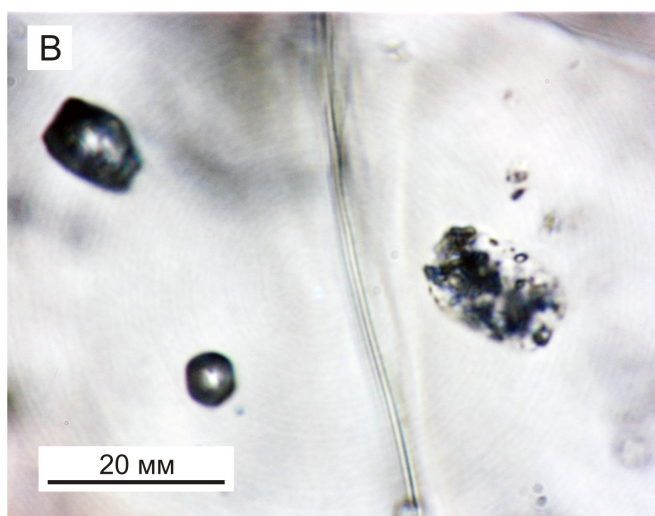
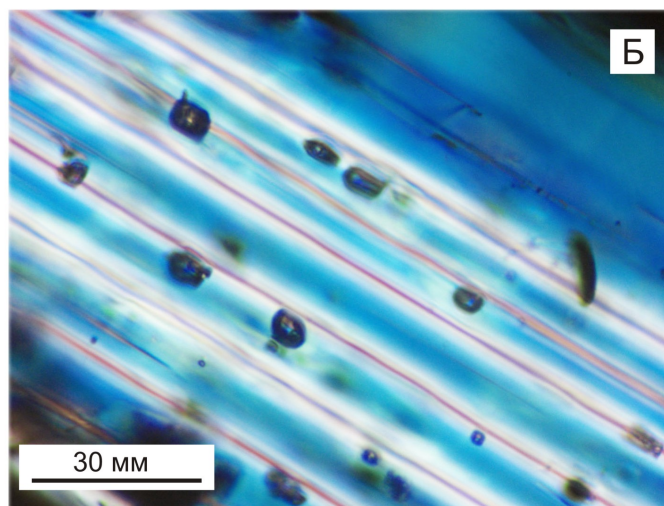
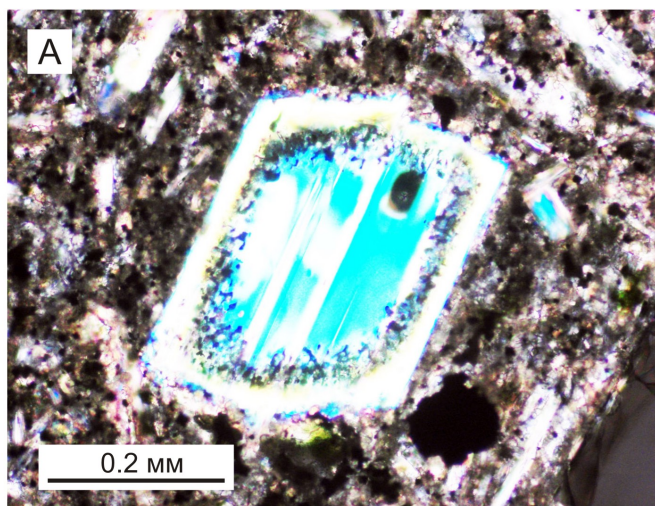


Рис. 10. В.А. Симонов...

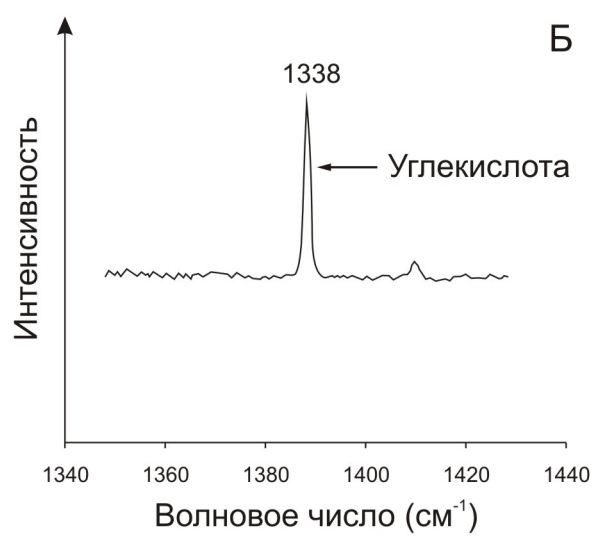
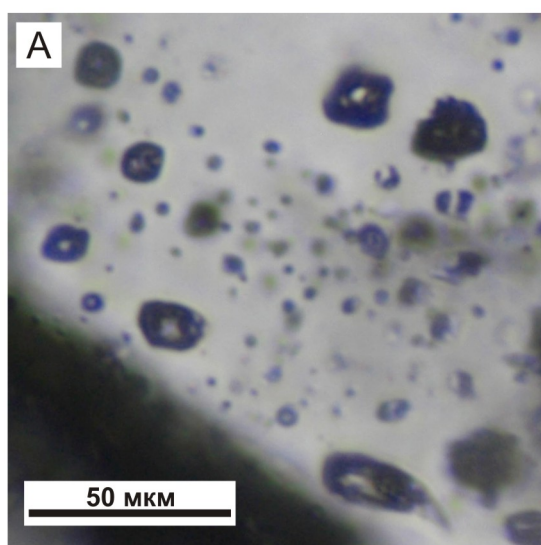


Рис. 11. В.А. Симонов...

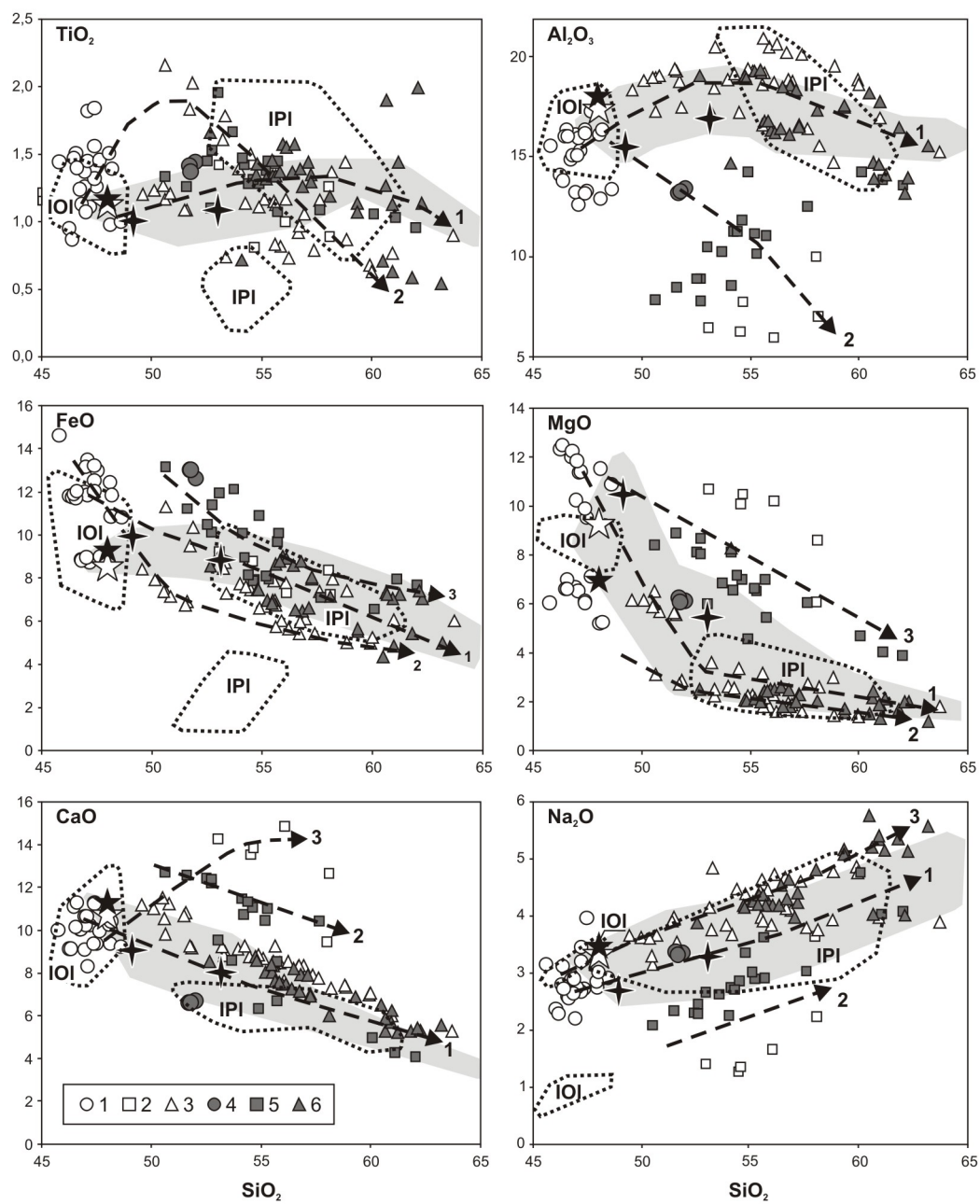


Рис. 12. В.А. Симонов...

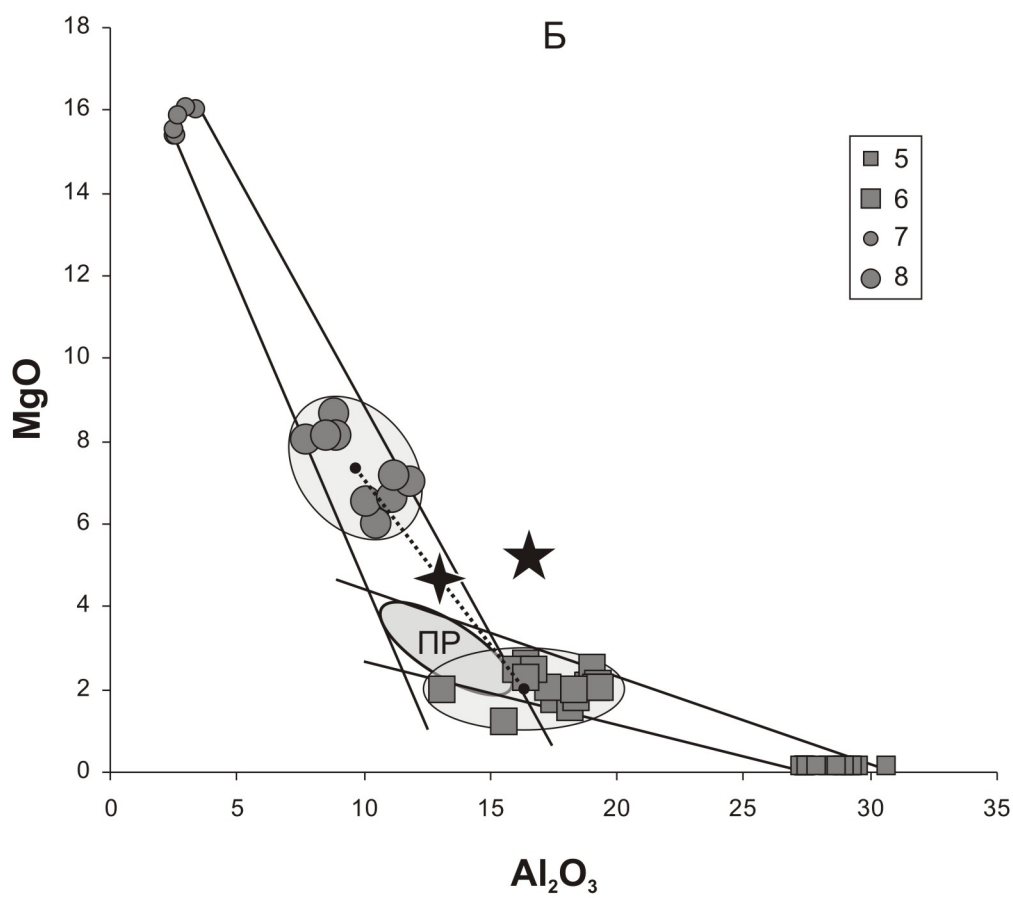
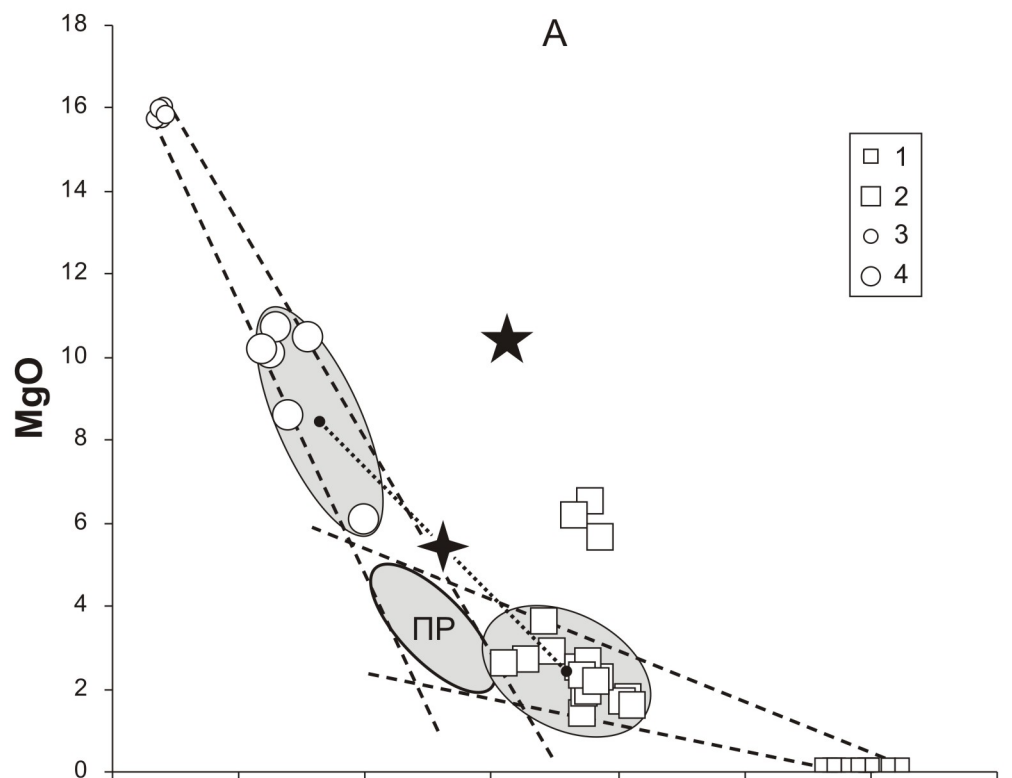


Рис. 13. В.А. Симонов...

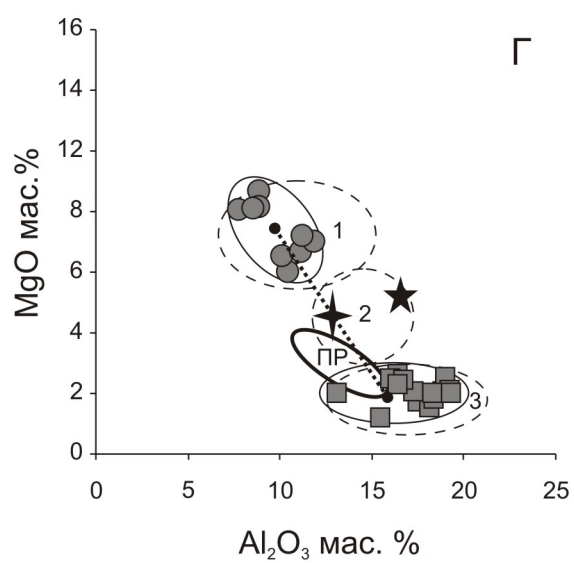
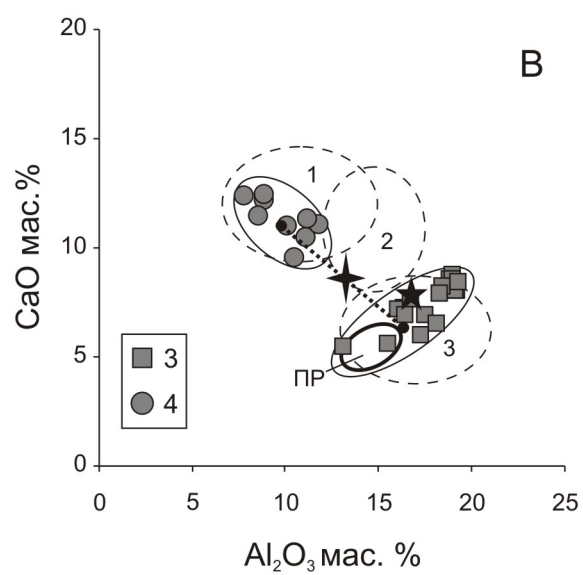
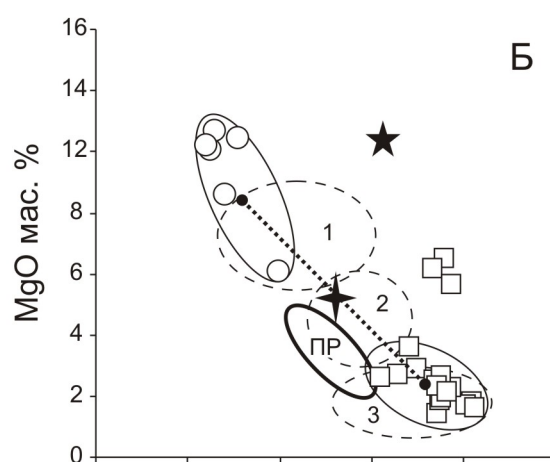
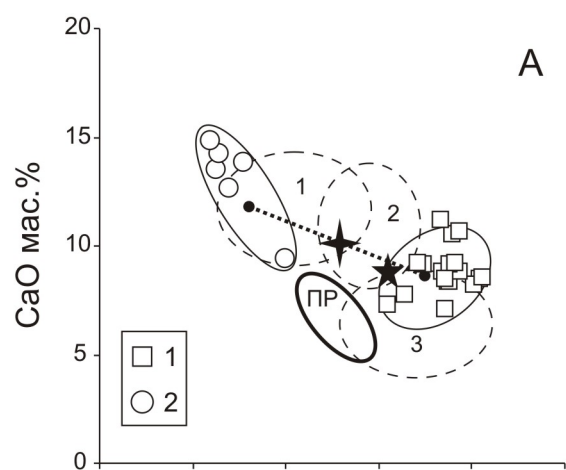


Рис. 14. В.А. Симонов...

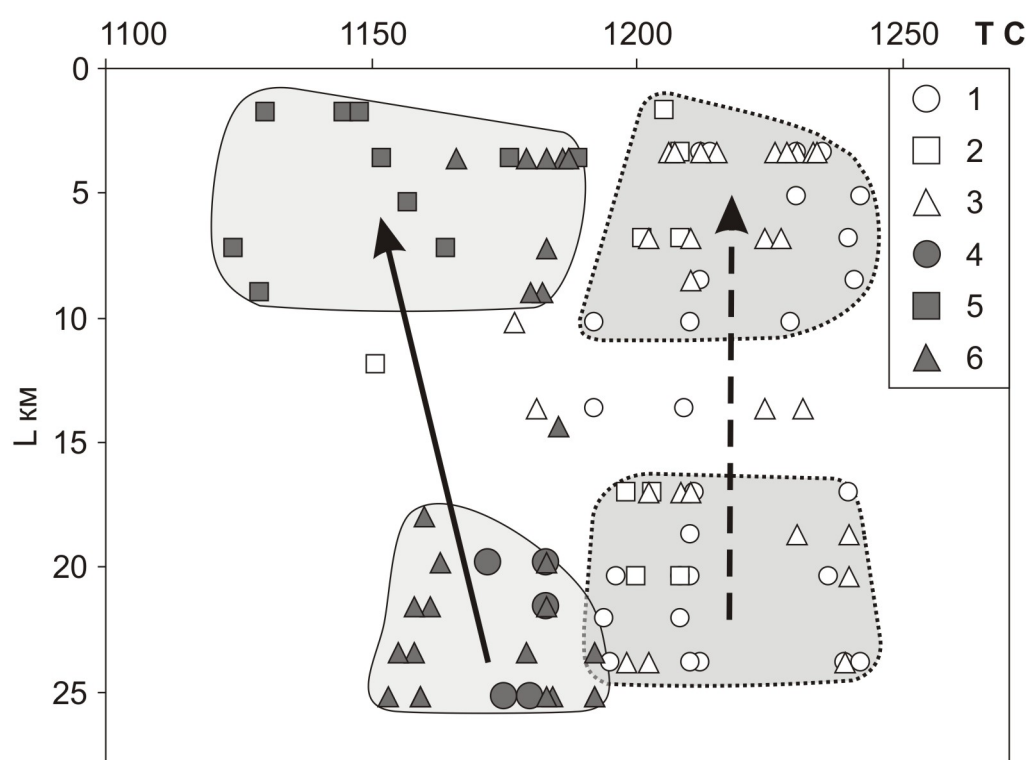


Рис. 15. В.А. Симонов...

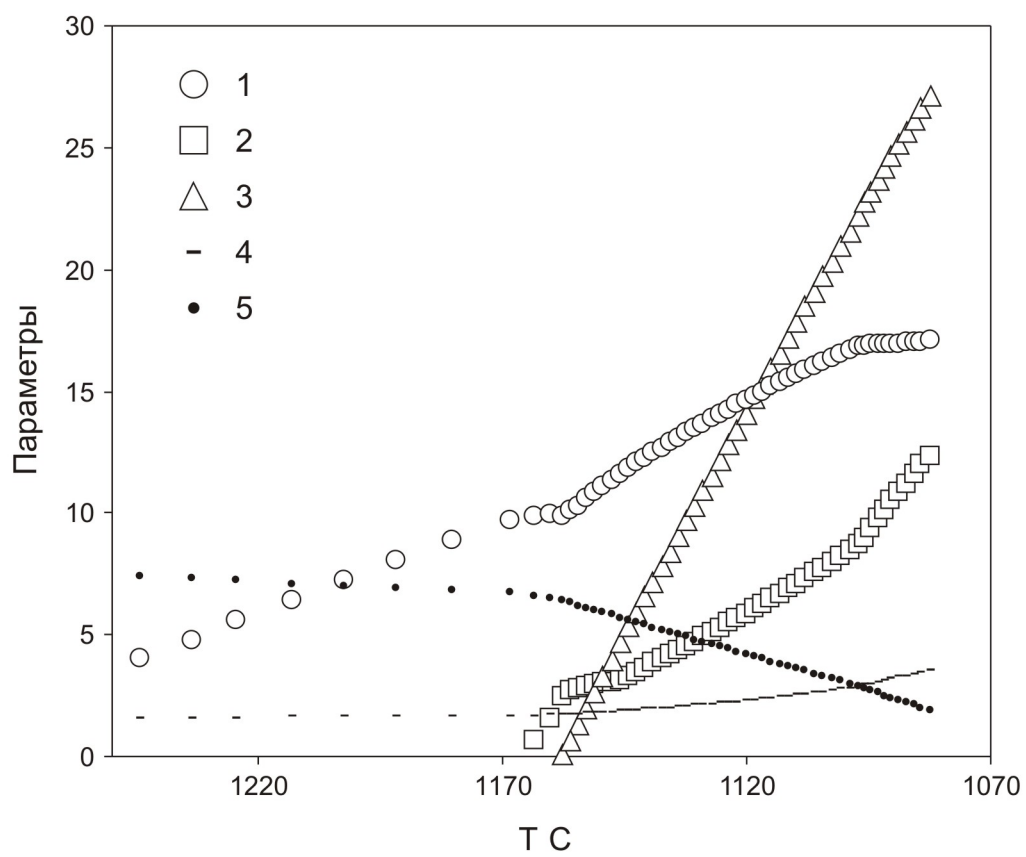


Рис. 16. В.А. Симонов...

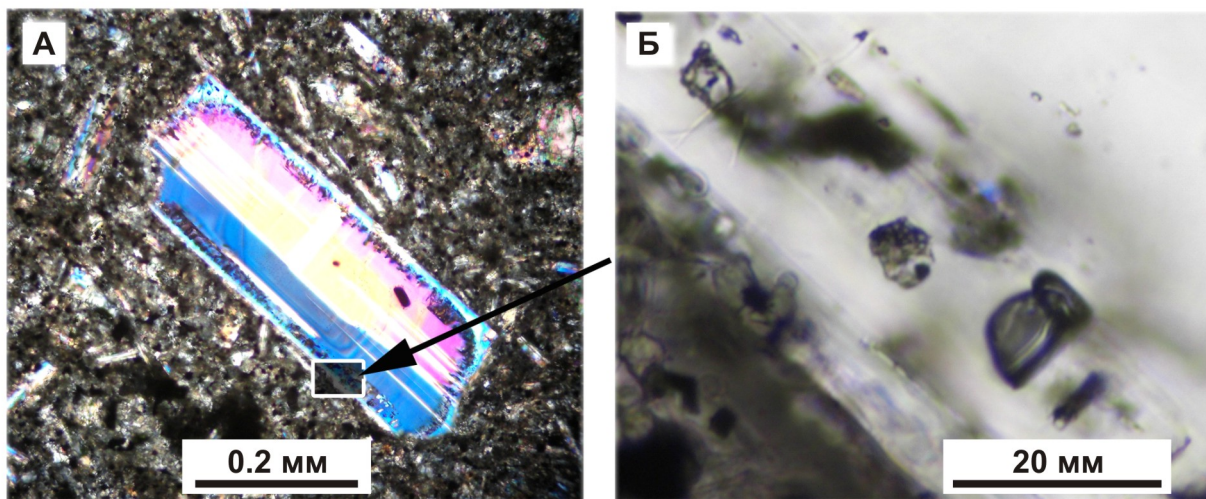


Рис. 17. В.А. Симонов...