

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МАГМАТИЗМА ВУЛКАНОВ УКСИЧАН И ИЧИНСКИЙ (Срединный хребет Камчатки): ДАННЫЕ ПО РАСПЛАВНЫМ ВКЛЮЧЕНИЯМ

Н.Л. Добрецов<sup>1,3</sup>, В.А. Симонов<sup>2,3,4</sup>, А.В. Котляров<sup>2,4</sup>, Н.С. Карманов<sup>2</sup>

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

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

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

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

В результате термобарогеохимических исследований расплавных включений, а также изучения клинопироксенов и амфиболов из эффузивных пород вулканов Уксичан и Ичинский установлены параметры расплавов на глубине и выяснены особенности эволюции магматических систем в ходе образования минералов в промежуточных камерах. В случае влк. Уксичан исследования расплавных включений позволили оценить давления при ликвидусной кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов из базальтовых магм и в результате установить четыре интервала глубин формирования этих минералов: около 60, 45—30, 27—18 и от 12 км до близповерхностных условий. Сравнение расчетов на основе информации по расплавным включениям и данных по клинопироксенам и амфиболам дало возможность определить пути эволюции *P-T*-характеристик расплавов влк. Уксичан при их подъеме. Для наиболее высокотемпературных магм, образующихся на глубине около 60 км, типично в целом последовательное понижение температуры с продвижением магмы вверх (1320—1240—1200 °С). На основе представительных данных по составам амфиболов для вулканов Уксичан и Ичинский выяснены общие закономерности эволюции магматических систем среднего и кислого составов с формированием для обоих вулканов трех уровней кристаллизации в промежуточных камерах. На глубинах 22.0—18.5 км (18—16 км) и при температурах 980—930 °С (1010—985 °С) кристаллизовались амфиболы соответственно андезитов Ичинского и латитов Уксичанского вулканов. При подъеме на более высокий уровень (15.5—11.0 км) и при снижении температуры от 945 до 880 °С совместно образуются амфиболы из андезитов и дацитов обоих вулканов. На заключительной стадии (при снижении температур в диапазоне 900—810 °С и в ходе подъема расплавов с 10 до 3 км) кристаллизовались исключительно амфиболы из дацитов обоих вулканов.

*Физико-химические параметры магматизма, расплавные включения, клинопироксен, амфибол, базальт, андезит, дацит, промежуточные надсубдукционные камеры, вулканы Камчатки.*

### PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF MAGMATISM OF THE UKSICHAN AND ICHINSKY VOLCANOES (*Sredinnyi Ridge, Kamchatka*): DATA ON MELT INCLUSIONS

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

Thermobarogeochemical study of melt inclusions and investigation of clinopyroxenes and amphiboles from effusive rocks of the Uksichan and Ichinsky Volcanoes gave an insight into the parameters of deep-seated melts and the evolution of magmatic systems during the formation of minerals in intermediate chambers. Study of melt inclusions from the Uksichan volcanic rocks made it possible to estimate the pressure during the liquidus crystallization of clinopyroxenes and plagioclases from basaltic magmas and to establish four depth intervals of the formation of these minerals: ~60, 45–30, 27–18, and from 12 km to the subsurface. Comparison of the results of calculation based on melt inclusion data and of the clinopyroxene and amphibole data helped to establish the evolution paths of the *P-T* parameters of ascending melts of the Uksichan Volcano. The most high-temperature magmas, generated at a depth of ~60 km, are characterized by a successive temperature decrease during their ascent (1320–1240–1200 °C). Based on the representative data on the compositions of amphiboles from the Uksichan and Ichinsky Volcanoes, we have elucidated the general regularities of the evolution of intermediate and acid magmatic systems, with three depths of crystallization in intermediate chambers. Amphiboles of the Ichinsky Volcano andesites and the Uksichan Volcano latites crystallized at depths of 22.0–18.5 and 18–16 km and at temperatures of 980–930 and 1010–985 °C, respectively. As melt ascended to a depth of 15.5–11.0 km and a temperature decreased from 945 to 880 °C, amphiboles of andesites and dacites of both volcanoes were produced. At the final stage (a temperature decrease to 900–810 °C and ascent of melts to a depth of 3 km), only amphiboles of dacites of both volcanoes crystallized.

*Physicochemical parameters of magmatism, melt inclusions, clinopyroxene, amphibole, basalt, andesite, dacite, intermediate suprasubduction chambers, volcanoes of Kamchatka*

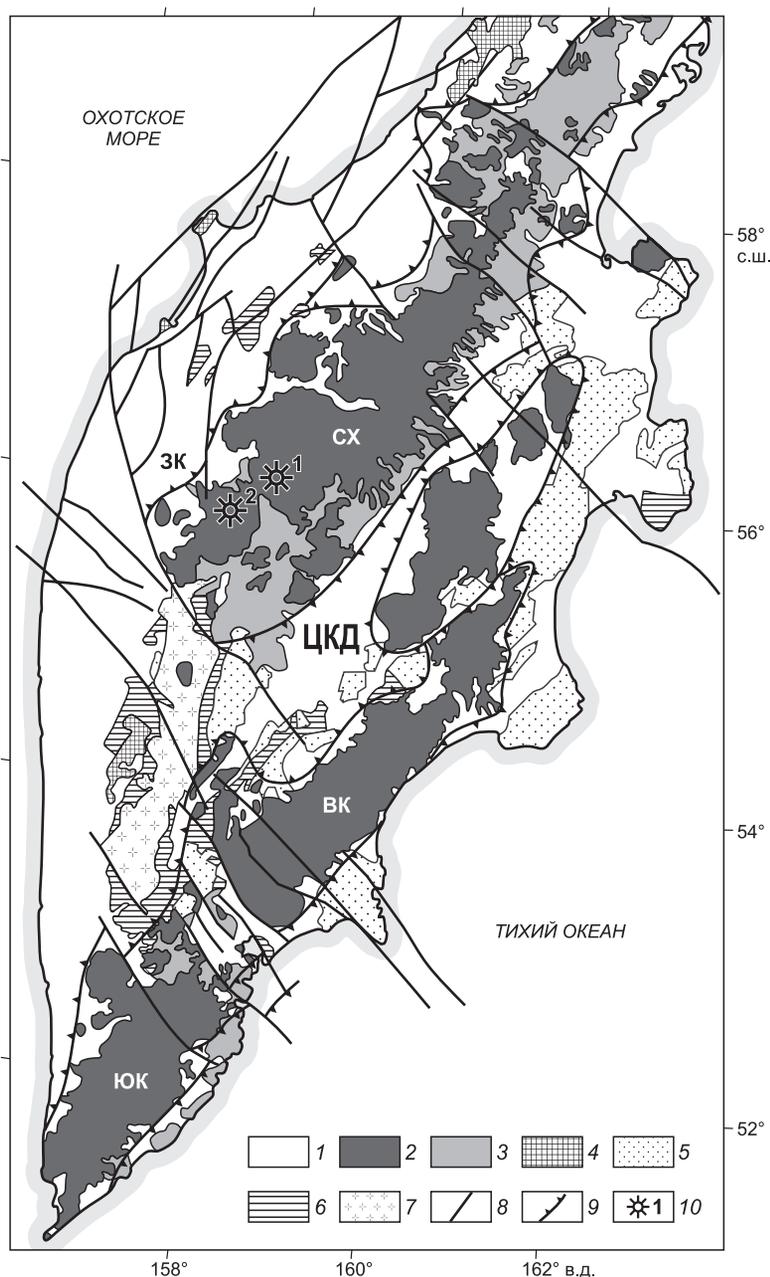
## ВВЕДЕНИЕ

Вулканический пояс Срединного хребта на Камчатке (рис. 1) долгое время (с 45—50 до 17—15 млн лет) развивался как обычная зона субдукционного магматизма [Толбачинское..., 2017]. После перерыва и перестройки, обусловленной столкновением Камчатки с Карагинской островной дугой (произошедшим около 13—15 млн лет), он превратился в тыловой пояс. В результате здесь сочетаются крупные стратовулканы и кальдеровулканы с большой долей андезит-дацит-риолитов, типичные для стандартных зон субдукции, и поздние небольшие щитовые базальтовые вулканы и ареалы туфво-лавовых конусов субщелочных базальтов, характерные для тыловых зон.

Несмотря на значительный интерес к этому региону, история развития вулканизма в Срединном хребте изучена недостаточно. Полученные в результате исследований последних лет данные [Перепелов, 2004, 2005, 2014; Bindeman et al., 2004, 2010; Костицын, Аносова, 2013; Давыдова, 2014; Перепелов и др., 2016] касаются отдельных проблем магматизма. Авторы статьи тоже внесли свой вклад, изучив типичные породы влк. Ичинский — крупного действующего вулкана Срединного хребта и сравнил их с современными лавами вулкана Толбачик в Ключевой группе [Добрецов и др., 2013, 2016]. В последнее время мы дополнительно исследовали ключевые участки вулканов Уксичан и Ичинский (рис. 2, 3). На основе обработки собранных материалов получили новые минералогические и термо-

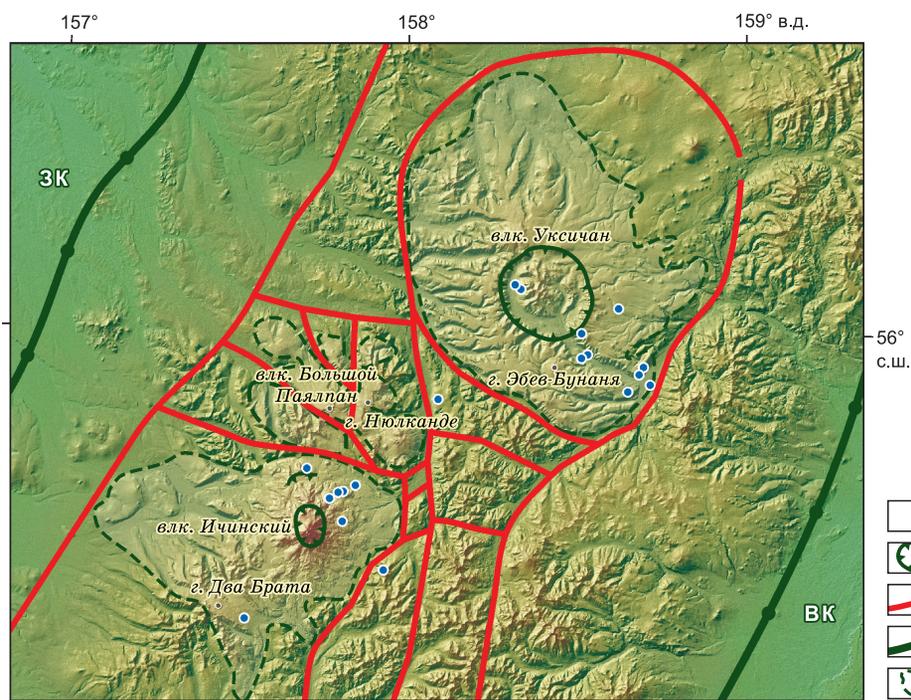
барогеохимические данные для этих вулканов и составили структурную схему южной части вулканического пояса Срединного хребта, включающую вулканы Уксичан, Ичинский и вулканические постройки между ними (см. рис. 3).

Целью настоящей статьи является уточнение эволюции вулканизма Срединного хребта Камчатки на примере крупных вулканов этого пояса — Уксичан и Ичинский. Для решения поставленных задач значительное внимание было уделено аналитической обработке образцов (изучение пород, минералов и расплавных включений), собранных авторами на вулканах Уксичан и Ичинский, результаты которой легли в основу расчетного моделирования магматических процессов. В итоге были



**Рис. 1. Схема надсубдукционного магматизма Камчатки.**

1 — современные и неогеновые вулканогенно-осадочные отложения, нерасчлененные; 2 — плиоцен-голоценовые вулканические пояса Южной Камчатки (ЮК), Восточной Камчатки (ВК) и Срединного хребта (СХ); 3 — олигоцен-миоценовые вулканогенные комплексы; 4 — раннесреднеэоценовый Западно-Камчатский вулканический пояс (ЗК); 5 — палеогеновые вулканогенные, вулканогенно-осадочные и терригенно-осадочные комплексы; 6 — позднемиоценовые вулканогенные и терригенно-осадочные комплексы; 7 — гранитогнейсовые купола и коллизионные зоны; 8 — разломы; 9 — границы вулканических поясов; 10 — исследованные вулканы Уксичан (1) и Ичинский (2). ЦКД — Центральная Камчатская депрессия. Рисунок составлен с использованием информации из работы [Перепелов, 2014].

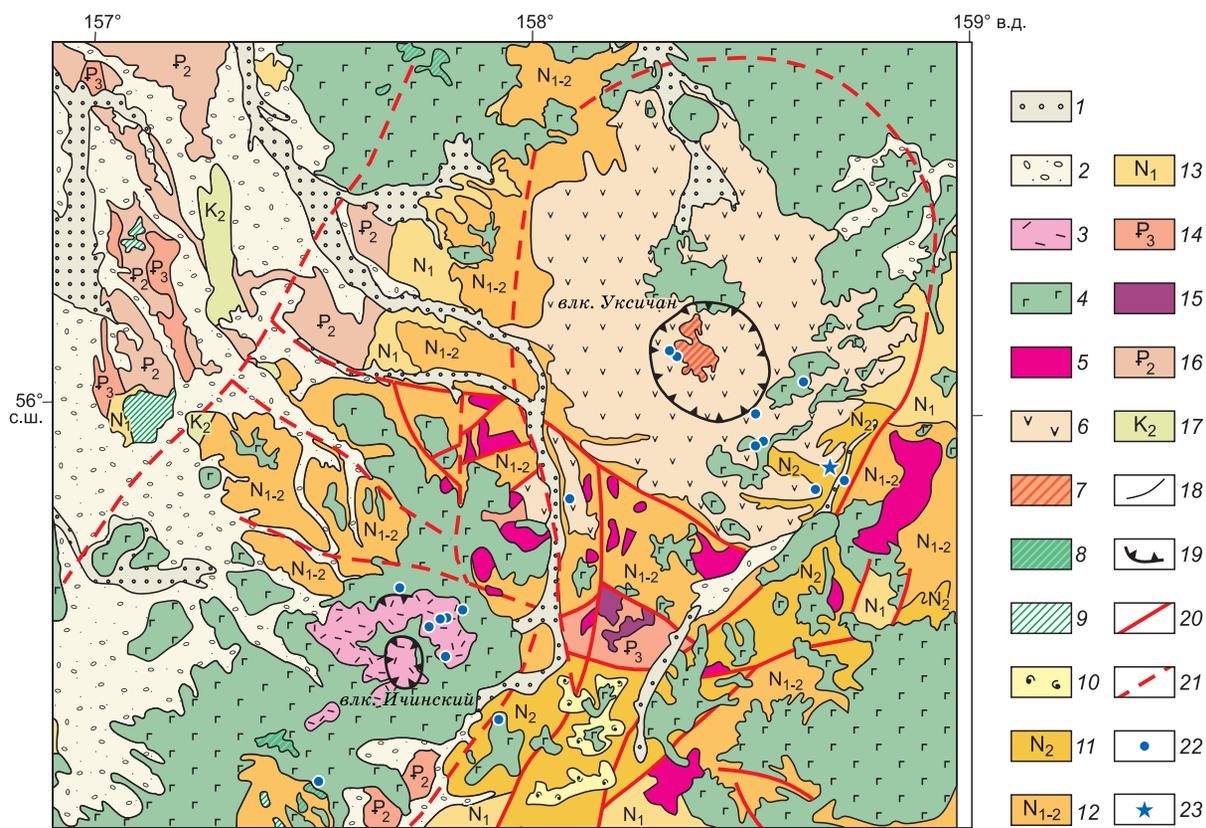


**Рис. 2. Схема рельефа юго-западной части Срединного хребта и структурная позиция исследованных вулканических центров.**

1 — отмечены участки детальных исследований и отбора образцов; 2 — кальдеры, 3 — разломы, 4 — границы структурно-формационных зон; 5 — границы вулканических построек. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

установлены параметры расплавов на глубине и выяснены условия эволюции магматических систем в ходе кристаллизации минералов в промежуточных камерах вулканов Уксичан и Ичинский.

Особенностью работы является комплексный подход с использованием геолого-петрологических, петрохимических, минералогических и термобарогеохимических исследований материалов, собранных авторами на вулканах Уксичан и Ичинский, а также проведение сравнительного анализа полученных результатов с сейсмотомографическими данными, что позволило наиболее обоснованно рассмотреть процессы развития магматических систем Срединного хребта Камчатки. При этом необходимо подчеркнуть, что важнейшей основой полученных результатов по условиям кристаллизации минералов из эффузивов рассмотренных вулканов послужили термобарогеохимические исследования расплавных включений. В связи с этим следует отметить особенности методического подхода, использованного в данном случае при исследовании магматизма вулканов Уксичан и Ичинский. Во-первых, далеко не каждый образец даже достаточно свежей породы содержит расплавные включения, по которым можно получить (во время высокотемпературных экспериментов, а также при последующей подготовке и анализе закалочных стекол в единичных сохранившихся после прогрева и закалки включениях) представительную и достоверную информацию. Поэтому, учитывая значительную трудоемкость экспериментальных исследований расплавных включений, мы вынуждены проводить предварительный отбор из имеющейся коллекции наиболее перспективных на расплавные включения образцов, содержащих обязательно свежие вкрапленники минералов. В итоге мы получаем результаты по включениям для проб, которые с точки зрения геологии и геохимии могут и не являться идеальными показателями магматизма вулкана, но эти данные представляют важнейшую информацию о физико-химических параметрах магматических систем. 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 получаем представительные данные об эволюции магматических систем. При этом, учитывая большую трудоемкость работы с расплавными включениями, сочетающей высокотемпературные (1100—1200 °С) эксперименты по их гомогенизации с последующей подготовкой и анализом микропроб (микронных размеров) закалочного стекла внутри прогретых включений,



**Рис. 3. Схема геологического строения юго-западной части вулканического пояса Срединного хребта.**

1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — четвертичные водно-ледниковые отложения; 3 — верхние плейстоцен-голоценовые лавы кислого состава (риодациты и дациты) влк. Ичинский; 4 — плиоцен-голоценовые базальты и андезидазальты (покровные фации); 5 — плиоцен-голоценовые субвулканические образования кислого состава (дациты и андезидациты); 6 — плиоцен-плейстоценовые вулканогенные породы (андезиты, андезидазальты, базальты, трахиандезиты, трахиандезидазальты); 7 — внутрикальдерный экструзивный комплекс влк. Уксичан (андезидазальты, трахидациты); 8 — четвертичные субвулканические образования (андезиты, базальты); 9 — плиоцен-миоценовые субвулканические образования основного состава (базальты); 10 — плиоцен-эоплейстоценовые покровные фации: игнимбриты, туфы риодацитов; 11 — вулканические образования плиоценового возраста (преимущественно лавы среднего состава); 12 — вулканические и субвулканические образования миоцен-плиоценового возраста (преимущественно лавы и туфы среднего и основного состава); 13 — осадочные и вулканогенные образования (песчаники, туфопесчаники, алевролиты, лавы андезитов и базальтов и их туфы) миоценового возраста; 14 — осадочные образования (туфоалевролиты, туфопесчаники, песчаники, конгломераты, гравелиты, туфы) олигоценного возраста; 15 — кварцевые диориты, гранодиориты олигоценного возраста; 16 — осадочные образования (алевролиты, песчаники, конгломераты, угли) эоценового возраста; 17 — кремнистые, туфокремнистые породы, базальты, андезиты; 18 — границы между разновозрастными геологическими образованиями; 19 — кальдеры; 20 — разломы; 21 — разломы, скрытые под более молодыми образованиями; 22 — точки наблюдения; 23 — место отбора образца базальта К-15-16. Рисунок составлен с использованием информации из работ [Огородов и др., 1972; Действующие вулканы..., 1991; Перепелов, 2014].

реальный объем получаемых достоверных данных по составу включений в одном минерале изученного образца обычно не превышает около 20 анализов.

Похожая ситуация устанавливается и для минералов. В частности, исследования эффузивов, проведенные в том числе и нами [Добрецов и др., 2016], показали весьма высокую информативность составов амфиболов в случае определения *PT*-параметров магматических систем. При этом, в отличие от гомогенизированных расплавных включений, экспериментальные исследования в данном случае не требуются и поэтому по минералам можно получить гораздо больший объем данных. В целом при изучении магматизма вулканов Уксичан и Ичинский основное внимание уделялось образцам эффузивов, содержащим расплавные включения и амфиболы, а также клинопироксены. При этом мы не претендуем на создание всеобъемлющей модели эволюции магматизма рассмотренных вулканов, но результаты изучения расплавных включений и минералов представляют собой достаточно представительную и достоверную информацию о физико-химических параметрах магматических вулканогенных систем, которую получить другими методами практически невозможно.

В целом отмеченный методический подход, включающий изучение расплавных включений и таких индикаторных минералов, как амфиболы, послужил основой выбора образцов для выяснения условий магматизма вулканов Уксичан и Ичинский.

В частности, для влк. Уксичан наиболее представительная информация по расплавным включениям и минералам была получена в ходе детальных исследований образца базальта (К-15-16, см. рис. 3), отобранного [Перепелов, 2014, см. рис. 2.10], [Давыдова, 2014, см. рис. 2.1, 2.2] из среднеплиоценовой постройки, сложенной эффузивами стратовулкана, послужившего основанием вулканического центра Уксичан.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе изучения собранных на вулканах Уксичан и Ичинский образцов были просмотрены шлифы для выяснения петрографических особенностей и определения минерального состава пород. Химические составы пород, минералов и расплавных включений установлены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) и в Институте геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Петрохимические составы эффузивов были определены с помощью силикатного рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation. Для получения более представительных выводов дополнительно использована петрохимическая информация других исследователей, находящаяся в базе геохимических данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>) и в работе [Давыдова, 2014].

Составы минералов (изучены исключительно вкрапленники, а данные по микрокристаллам основной массы взяты из опубликованных материалов) эффузивных пород вулканов Уксичан и Ичинский были проанализированы на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Пределы обнаружения (мас. %) компонентов этим методом следующие:  $\text{SiO}_2$  — 0.007,  $\text{TiO}_2$  — 0.032,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 0.011,  $\text{FeO}$  — 0.019,  $\text{MnO}$  — 0.034,  $\text{MgO}$  — 0.011,  $\text{CaO}$  — 0.008,  $\text{Na}_2\text{O}$  — 0.017,  $\text{K}_2\text{O}$  — 0.009. Стандартами при анализе на микрозонде послужили: ортоклаз (Or), диопсид (Di) и гранат (O-145). Использованы также опубликованные данные по составам минералов из эффузивов вулканов Уксичан [Давыдова, 2014] и Ичинский [Добрецов и др., 2016].

Исследования расплавных включений выполнены в лаборатории геодинамики и магматизма ИГМ СО РАН. Эксперименты с включениями при высоких температурах проводились в микротермокамере с инертной средой [Соболев, Слуцкий, 1984] с использованием имеющихся методик [Симонов, 1993; Soboлев, Danyushevsky, 1994]. Необходимо отметить, что в ходе высокотемпературных экспериментов при закалке 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 и соответствующие по составу расплаву, из которого рос минерал. Анализ микрофаз в негретых включениях представляет собой чисто теоретический интерес, в связи с тем, что использовать их составы для реконструкции физико-химических параметров весьма затруднительно и не имеет смысла, так как закалочные стекла в прогретых и гомогенизированных включениях несут прямую информацию о свойствах минералообразующих расплавов. Следует подчеркнуть, что в статье используются исключительно данные по гомогенным стеклам прогретых гомогенизированных и экспериментально закаленных первичных расплавных включений, соответствующим по химическому составу реальному расплаву, из которого рос минерал. В случае природно-закаленных включений необходимо проводить расчеты для выяснения возможных характеристик минералообразующих расплавов.

Составы стекол прогретых в ходе экспериментов расплавных включений и содержащих их минералов-вкрапленников (клинопироксен, ортопироксен, плагиоклаз, а также часть амфиболов) определены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на электронном сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU [(Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd)] при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе электронного пучка 1.5 нА и живом времени набора спектров 20 с. При данных условиях анализа погрешность определения основных компонентов ( $C \geq 10$ —15 мас. %) не превышает 1 отн. %. Погрешность определения компонентов с концентрациями 1—10 мас. % лежит в диапазоне 2—6 отн. % и обычно не превышает 10 отн. %. При концентрациях вблизи предела обнаружения (0.2—0.3 мас. %) погрешность может достигать величины 20 отн. % [Лаврентьев и др., 2015].

Для выяснения физико-химических параметров расплавов при кристаллизации вкрапленников эффузивов рассмотренных вулканов использовалась последовательная система обработки полученных данных по расплавным включениям и минералам. Прежде всего, в результате высокотемпературных экспериментов в микрокамере определялись температуры гомогенизации включений, в большинстве случаев отвечающие температурам их захвата минералом и, соответственно, температурам его кристал-

лизации. В последующем анализировались химические составы стекол прогретых 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 физико-химические параметры (температуры, давления и составы расплавов) магматических систем, и они характеризуют в основном начало кристаллизации вкрапленников.

В то же время вкрапленники обычно обладают в целом сложной историей формирования с достаточно широкими диапазонами температур и давлений, о чем прямо свидетельствует часто наблюдаемая зональность фенокристаллов. В расшифровке этой истории может помочь использование минералогических термометров и барометров. Об этом свидетельствует информация об условиях кристаллизации эффузивов влк. Уксичан [Давыдова, 2014], полученная с помощью программы с применением термометров и барометров из работы [Putirka, 2008].

В нашем случае был использован целый ряд минералогических термометров и барометров, основанных на особенностях составов клинопироксенов и амфиболов [Перчук, 1980; Mercier, 1980; Johnson, Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; Putirka et al., 1996; Nimis, Taylor, 2000; Yavuz, 2007; Ridolfi, Renzulli, 2012].

Необходимо подчеркнуть, что все результаты клинопироксеновых термобарометров в обязательном порядке были протестированы в сравнении с *PT*-параметрами, полученными на основе данных по расплавным включениям. В дальнейшем использовались только те расчетные (по минералам) характеристики, которые согласуются с информацией по включениям.

Для расчета давлений и температур заключительных стадий магматических процессов были применены амфиболовые барометры [Johnson, Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; Yavuz, 2007] и термометры [Ridolfi, Renzulli, 2012]. Значительная часть этих барометров была успешно апробирована нами ранее [Добрецов и др., 2016, 2017б].

В целом следует отметить, что при выяснении физико-химических характеристик магматических систем проводились комплексные минералого-термобарогеохимические исследования с обязательным тестированием результатов независимыми методами. Во-первых, основой являлись экспериментальные исследования расплавных включений в минералах. Во-вторых, обязательно использовалось несколько термометров и барометров по разным минералам — клинопироксенам и амфиболам. В-третьих, данные минералогических термометров сравнивались с результатами термометрических экспериментов с расплавными включениями. В-четвертых, полученные с помощью расплавных включений и составов минералов *PT*-параметры, тестировались расчетным моделированием по таким программам, как PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и PLUTON [Лавренчук, 2004]. В-пятых, результаты определения температур и давлений в магматических системах рассмотренных вулканов сравнивались с независимой информацией предыдущих исследователей этих объектов, а также с сейсмотомографическими данными.

При подготовке этой статьи в дополнение к оригинальным данным использована также информация об условиях кристаллизации эффузивов влк. Уксичан [Давыдова, 2014], полученная с помощью программы КОМАГМАТ [Ariskin et al., 1993; Арискин, Бармина, 2000; Kimura, Ariskin, 2014] и с применением термометров и барометров из работы [Putirka, 2008].

## СТРОЕНИЕ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА СРЕДИННОГО ХРЕБТА

На рис. 1 приведена схема надсубдукционного магматизма Камчатки, на рис. 2 показана структурная позиция исследованных вулканических центров, а на рис. 3 — схема геологического строения вулканической зоны Срединного хребта Камчатки. В целом вулканический пояс Срединного хребта отчетливо делится на две почти равные части. Юго-западная часть шире северо-восточной и включает крупные плиоценовые вулканические постройки — Ичинская, Уксичан, Кетепана, Алней-Чашаконджа. Мы их рассмотрим ниже на примере вулканов Уксичан и Ичинский.

Позднеплиоцен-голоценовые базальтовые вулканы и конуса рассеяны по площади юго-западной части и только к северо-востоку от влк. Уксичан образуют обширное поле с десятью локальными центрами. В северо-восточной части четвертичные вулканы ( $Q_3$ — $Q_4$ ) образуют непрерывный узкий (20—30 км) пояс от влк. Алней-Чашаконджа до влк. Хувхойтун и севернее на протяжении 250 км на фоне преобладающих миоцен-олигоценых вулканических комплексов. Эти более древние вулканы, выде-

Таблица 1. Крупные вулканы Срединного хребта (1—3) и Ключевской группы (4)

Вулкан (абсолютная отметка, м)	Тип постройки	Размер основания постройки, км	Относи- тельная высота, м	Пло- щадь, км <sup>2</sup>	Индекс возраста	Объем вулканитов, км <sup>3</sup>				Серия магм	Преоб- ладающие породы
						всего	основ- ных	сред- них	кис- лых		
1 Уксичан (1685)	Щитообразный вулкан с каль- дерой	51×54	700	1850	N <sub>2</sub> -Q <sub>3</sub> -Q <sub>4</sub>	750	620 (83 %)	110 (15 %)	20 (2 %)	Дацит-ба- зальтовая	Андезиба- зальты
2 Алней-Ча- шаконджа (2581)	Вулканический массив	27×30	1800	800	N <sub>2</sub> -Q <sub>4</sub>	600	490 (82 %)	90 (15 %)	20 (3 %)	Базальто- вая	Базальты
3 Ичинский (3621)	Конусовидный стратовулкан	25×30	2800	560	Q <sub>3</sub> -Q <sub>4</sub>	450	300 (67 %)	80 (18 %)	70 (15 %)	Риолит- дацит-ба- зальтовая	Андезиба- зальты
4 Шивелуч (3283)	Андезитовый вулканический массив	30×45	2900	2900	Q <sub>3</sub> -Q <sub>4</sub>	1100	200 (18 %)	900 (82 %)	0	Андезито- вая	Андезиты

Примечание. Таблица составлена на основе материалов из работ [Кожемяка, 1995, 2001; Давыдова, 2014].

ляемые нередко как алнейская серия, в юго-западной части обнажаются лишь фрагментарно, главным образом к югу от Ичинского вулкана и к юго-востоку от влк. Уксичан.

Третьей особенностью юго-западной части Срединного хребта является его наложение на коллизионную зону с гранитогнейсовыми куполами, которая показана в полном виде на рис. 1 на продолжении вулканического пояса. В самом северном гранитогнейсовом куполе в центре находится дацитовая кальдера влк. Хангар. В юго-восточной части вулканического пояса нет гнейсов фундамента, но много небольших интрузий диоритов — плагиогранитов, аналогичных гранитоидам в гранитогнейсовых куполах, а в влк. Уксичан обнаружены ксенолиты гнейсов [Давыдова, 2014].

**Вулкан Уксичан** — один из крупнейших вулканов Камчатки. По площади и объему эффузивов он уступает влк. Шивелуч и заметно превышает другие крупные вулканы Срединного хребта — Алней-Чашаконджа и Ичинский (табл. 1). Этот вулкан представляет собой сложное многоэтапное формирование с сильноэродированным основанием, более молодым внутрикальдерным дацитовым куполом и четвертичными базальтовыми вулканами, на севере полностью перекрывающими плиоценовые вулканиты.

В эволюции влк. Уксичан на раннем этапе исследований выделялись первая миоцен-плиоценовая стадия формирования фундамента (эффузивно-терригенная и эффузивно-пирокластическая толща); средний этап образования — стратовулкан, сложенный базальтами, андезитами, реже трахиандезитами и трахитами; на поздних этапах формировалась экструзия дацитов и посткальдерные щелочные базальты [Огородов и др., 1972]. По данным [Стефанов, Широкий, 1980], плиоценовый этап (1) формирования фундамента включает андезиты, дациты, игнимбриты, туфы среднекислого состава; плиоценовую стадию (2) формирования стратовулкана (андезибазальты, пемзовые туфы и игнимбриты) и заложение кальдеры; четвертичную стадию (3) формирования щитовой постройки с дальнейшим ростом купола и дифференцированным проседанием кальдеры. Периферийные купола, формирующиеся на этой стадии, сложены более щелочными трахидацитами и трахириолитами и датируются средним—поздним плейстоценом. Заключительная стадия (4) (поздний плейстоцен—голоцен) — базальтовые лавовые постройки и шлаковые конусы.

По последним данным [Перепелов и др., 2006; Давыдова, 2014; Перепелов, 2014], вулканический центр Уксичан прошел стадию развития фундамента и четыре стадии формирования вулканической постройки: а) стадия стратовулкана; б) стадия щитового вулкана; в) стадия кальдеровулкана; г) посткальдерная стадия формирования андезит-андезибазальт-базальтовых щитовых вулканов с собственными названиями (Чингейнгейн, Эбев-Бунаня и др.) и моногенных шлаковых конусов с лавовыми потоками субщелочных базальтов, реже андезибазальтов.

Имеющиеся изотопные датировки дают узкий интервал 3.28—3.60 млн лет (средний плиоцен), включая K-Ar дату 3.6 млн лет [Перепелов и др., 2006], Ar-Ar даты  $3.56 \pm 0.05$  и  $3.34 \pm 0.07$  млн лет [Bindeman et al., 2010] и U-Pb дату  $3.28 \pm 0.04$  млн лет [Костицын, Аносова, 2013].

**Ичинский вулкан** считается одним из двух активных в настоящее время вулканов в Срединном хребте [Мелекесцев и др., 2001; Перепелов, 2014]. Для него характерно сложное чередование в пространстве и во времени базальтов, андезитов и дацитов-риолитов. Кроме того, на Ичинском вулкане отмечается большое разнообразие (по составу и строению) вулканических куполов и даек.

Последние этапы эруптивной активности влк. Ичинский приурочены к голоцену [Певзнер, 2004], представлены грубыми вулканическими песками и несортированными пирокластическими отложениями. По составу пирокластита отвечает андезитам и дацитам известково-щелочной серии, обладает умеренной магнезиальностью и относится к типичным породам островных дуг.

В голоцене эксплозивно-эффузивная активность Ичинского вулкана разделяется на два периода: ранне- и позднеголоценовый, между которыми около 2500 лет не было извержений. Раннеголоценовый период начинается серией умеренных извержений, представленных в основном тефрой. Максимальный всплеск активности вулкана происходил около 6500 лет назад. Разрезы этого возраста насыщены обломочным материалом. Завершается период ростом крупной андезидацитово-экструзии. Позднеголоценовый период начался около 4200 лет назад. Для него характерно чередование извержений, представленных пирокластическими потоками. Последнее зафиксированное извержение Ичинского вулкана — мощный лавовый поток дацитового состава, излившийся на юго-западном склоне в 1740 г.

В целом на основе имеющейся схемы [Кутыев, 1975] реконструируется следующая последовательность вулканических стадий на влк. Ичинский:

1) оливиновые базальты и купола оливиновых базальтов с кратерами диаметром до 200 м, слагающие основание вулкана; 2) субщелочные базальты и андезибазальтовые потоки в северной части вулкана; 3) многофазовые купола амфиболовых дацитов и риодацитов, в том числе купол Гигилен в северо-восточной части вулкана; 4) андезиты (с переходами в андезибазальты и андезидациты), слагающие основную часть конуса, частично закрытого ледниками; 5) покровы дацитов длиной до 5—6 км, начинающиеся куполами риодацитов на сохранившейся фрагментарно кальдере вулкана; 6) субширотные и радиальные дайки кислого состава, сформировавшиеся преимущественно во время последней стадии.

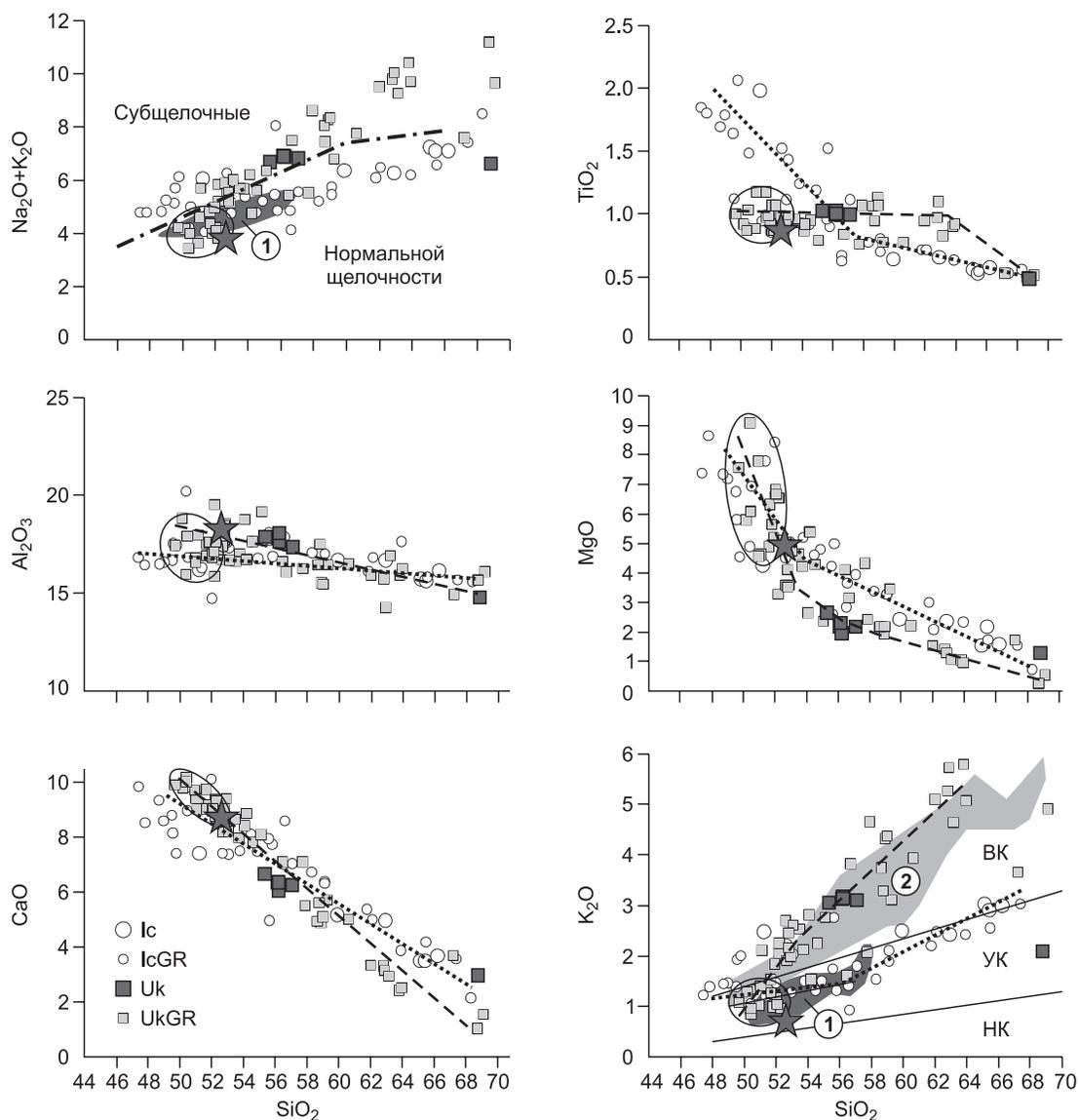
### ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД

На основе новых данных (табл. 2) и с учетом опубликованной информации были рассмотрены некоторые особенности петрохимии эффузивных пород вулканов Уксичан и Ичинский. Петрохимический анализ показал существенные различия в составах эффузивов рассмотренных вулканов. В частности, базальты Ичинского вулкана принадлежат к субщелочной серии в отличие от базальтов Уксичана, обладающих нормальной щелочностью (рис. 4) и относящихся к толеитам. С андезитами обратная ситуация: на Ичинском вулкане они нормальной щелочности и известково-щелочные, а на Уксичане преобладают субщелочные. Видны также отличия по распределению титана и калия. На диаграмме  $TiO_2-SiO_2$  (см. рис. 4) породы влк. Уксичан характеризуются фактически постоянными умеренными содержаниями (до 1.2 мас. %) титана. В то же время для базальтов Ичинского вулкана присущи более значительные количества  $TiO_2$  (до 2.06 мас. %) и заметное снижение его содержания (до 0.5 мас. %) при росте  $SiO_2$ . В случае  $K_2O$  ситуация обратная — эффузивы влк. Уксичан явно обогащены калием

Таблица 2. Представительные оригинальные анализы (мас. %) эффузивных пород вулканов Уксичан и Ичинский

№ п/п	№ образца	Порода	$SiO_2$	$TiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	MnO	MgO	CaO	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$	П.п.п.	Сумма
1	U-1	Андезибазальт	56.15	1.00	17.80	8.10	0.15	2.19	6.34	3.80	3.12	0.51	0.22	99.37
2	U-2	Андезит	57.11	0.99	17.32	7.98	0.17	2.19	6.22	3.72	3.11	0.52	0.17	99.49
3	U-3	Андезибазальт	56.23	1.02	17.61	8.08	0.20	1.94	6.02	3.72	3.17	0.52	0.56	99.08
4	U-4	»	55.34	1.02	17.88	8.12	0.15	2.65	6.64	3.62	3.05	0.50	0.16	99.14
5	U-5	»	56.21	1.00	18.06	8.01	0.14	2.31	6.34	3.77	3.13	0.50	0.26	99.73
6	K-15-16	Базальт	52.65	0.86	18.27	9.78	0.16	4.96	8.71	3.12	0.69	0.16	0.33	99.71
7	K-20-16	Дацит	68.81	0.49	14.78	3.47	0.10	1.28	2.95	4.53	2.08	0.10	0.66	99.26
8	K-2B-16	»	65.12	0.55	15.69	4.12	0.09	1.55	3.49	4.22	3.02	0.17	0.89	98.92
9	K-3A-16	»	65.43	0.53	15.64	4.06	0.08	2.17	3.49	4.19	2.90	0.18	0.22	98.89
10	1405	Андезит	59.91	0.64	16.66	6.00	0.13	2.44	5.15	3.88	2.49	0.28	1.53	99.10
11	1402	Дацит	66.23	0.57	16.13	4.42	0.09	1.56	3.65	4.10	3.00	0.19	0.12	100.06
12	1401	Базальт	51.23	1.98	16.18	12.03	0.17	4.26	7.39	3.59	2.48	0.72	-0.72	99.32
13	1403	Андезит	62.92	0.66	16.69	5.52	0.10	2.36	4.94	3.84	2.42	0.22	0.10	99.75
14	6A(1402)	»	66.61	0.52	15.81	4.07	0.08	1.49	3.38	4.11	3.12	0.17	0.27	99.62

Примечание. 1—7 — породы влк. Уксичан; 8—14 — породы влк. Ичинский.



**Рис. 4. Составы эффузивных пород (мас. %) вулканов Укичан и Ичинский.**

Оригинальные данные авторов по составу пород вулканов Ичинский (Ic) и Укичан (Uk), анализы эффузивных пород вулканов Ичинский (IcGR) и Укичан (UkGR) из базы геохимических данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>) и из работы [Давыдова, 2014]. Сплошной линией околнурено поле умеренно калиевых базальтов влк. Укичан, построенное на основе данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>) и из работы [Давыдова, 2014]. Звездочкой обозначен состав детально изученного образца базальта (K-15-16) влк. Укичан. Поля пород: 1 — умеренно калиевые базальты и андезитобазальты стратовулкана и щитового влк. Укичан [Давыдова, 2014]; 2 — высококалиевые породы влк. Укичан [Антипин и др., 1987; Перепелов, 2014]. Серии пород: НК — низкокалиевые, УК — умеренно калиевые, BK — высококалиевые [Петрографический кодекс..., 2009]. Линии: штрихпунктирная — разделение субщелочных и с нормальной щелочностью серий пород; штриховая — тренд изменения составов пород влк. Укичан; пунктирная — тренд эффузивов влк. Ичинский. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием информации из работ [Магматические..., 1983, 1987].

( $\geq 2$  мас. %, начиная с  $\text{SiO}_2 = 52$  мас. %) до 5.8 мас. % (при  $\text{SiO}_2 = 64$  мас. %) по сравнению с породами Ичинского — до 3.03 мас. % (при  $\text{SiO}_2 = 68$  мас. %). В общем на рис. 4 эффузивы Укичана разделяются на умеренно калиевые и высококалиевые, что согласуется с опубликованной ранее информацией о том, что магматические породы в районе этого вулкана принадлежат к разным петрогеохимическим сериям: умеренно калиевые, высококалиевые и шшонит-латитовые [Перепелов, 2014]. При этом детально изученный образец базальта (K-15-16) по всем петрохимическим компонентам относится к умеренно калиевым базальтам влк. Укичан и фактически располагается в полях умеренно калиевых базальтов и андезитобазальтов стратовулкана и щитового влк. Укичан (см. рис. 4).

В целом петрохимический анализ показал, что магматизм изученных вулканов обладает как общими чертами, отражающимися в закономерной эволюции составов пород (в частности, широкие вариации по кремнезему, падение магния и кальция на фоне роста SiO<sub>2</sub>, см. рис. 4), так и отличиями по суммарной щелочности и по содержаниям TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O. При этом наибольшие различия наблюдаются по содержанию титана (с максимумом для Ичинского вулкана) и калия (максимальное накопление с ростом SiO<sub>2</sub> для влк. Уксичан).

### СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ ИЗ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД

Нами исследовались составы клинопироксенов, ортопироксенов, амфиболов и плагиоклазов из эффузивов вулканов Уксичан и Ичинский. Оригинальные анализы минералов приведены в таблицах 3—6. Необходимо отметить, что новые данные были получены для ортопироксенов и амфиболов из эффузивов обоих вулканов. В случае клинопироксенов и плагиоклазов новую информацию удалось получить только для влк. Уксичан. Для наиболее полного выяснения особенностей состава минералов из эффузивов вулканов Уксичан и Ичинский использовались также ранее опубликованные нами [Добрецов и др., 2016] и другими исследователями [Давыдова, 2014] данные.

**Клинопироксены** (как вкрапленники, так и микрокристаллы основной массы) из базальтов влк. Уксичан по соотношению миналов (En—Wo—Fs) относятся в большинстве случаев к авгитам (рис. 5). Вкрапленники **ортопироксена** из базальтов влк. Уксичан по соотношению миналов (En—Wo—Fs) варьируют главным образом в последовательности: бронзит—гиперстен. Близкие изменения составов отмечаются для ортопироксенов из основной массы базальтов. При этом часть микрокристаллов основной массы обогащена Wo компонентом и принадлежит к магнизиальным пижонитам. В целом большинство данных (как по клино-, так и ортопироксенам из базальтов) располагается между изотермами 1100 и 1200 °С (см. рис. 5).

Таблица 3. Представительные оригинальные анализы (мас. %) клинопироксенов из эффузивов влк. Уксичан

№ п/п	№ и точка анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Mg#
1	51 к	51.41	0.44	2.93	0.18	8.66	0.24	15.40	19.99	0.27	0.01	99.53	76.01
2	52 пр	51.59	0.52	2.67	0.02	9.09	0.38	14.98	20.00	0.30	0.00	99.56	74.60
3	53 пр	51.59	0.49	2.47	0.00	9.06	0.37	15.18	19.86	0.28	0.00	99.30	74.91
4	54 пр	51.74	0.47	2.36	0.00	8.91	0.34	15.25	20.04	0.29	0.00	99.40	75.31
5	55 ц	51.88	0.47	2.34	0.00	9.02	0.34	15.19	20.03	0.30	0.00	99.56	75.01
6	56 к	51.10	0.52	2.08	0.01	10.34	0.34	15.12	19.30	0.30	0.00	99.11	72.27
7	57 пр	51.99	0.50	1.95	0.00	10.12	0.35	14.72	19.54	0.31	0.00	99.47	72.16
8	58 пр	51.51	0.52	2.01	0.04	9.73	0.35	14.59	19.59	0.32	0.00	98.67	72.77
9	59 пр	51.39	0.54	2.10	0.02	10.12	0.38	14.66	19.72	0.30	0.00	99.23	72.08
10	60 ц	51.10	0.55	2.03	0.00	9.94	0.38	14.69	20.14	0.36	0.00	99.18	72.48
11	61 к	52.64	0.46	1.67	0.04	9.66	0.39	15.30	19.88	0.34	0.00	100.38	73.84
12	62 пр	52.38	0.47	1.79	0.00	9.43	0.44	14.83	19.89	0.32	0.00	99.55	73.70
13	63 пр	51.99	0.47	1.73	0.00	9.64	0.43	14.87	19.86	0.33	0.00	99.32	73.32
14	64 пр	51.82	0.48	1.70	0.00	9.57	0.42	14.85	19.90	0.32	0.00	99.06	73.44
15	65 пр	52.22	0.43	1.57	0.02	9.55	0.40	14.93	19.88	0.29	0.00	99.29	73.59
16	66 ц	51.85	0.49	1.86	0.02	9.67	0.39	14.87	19.86	0.29	0.00	99.31	73.26
17	67 к	51.39	0.46	2.85	0.14	8.27	0.19	15.23	19.64	0.24	0.00	98.41	76.64
18	68 пр	51.83	0.48	1.76	0.03	9.59	0.36	15.22	18.98	0.31	0.00	98.56	73.88
19	69 пр	52.32	0.43	2.09	0.04	9.12	0.32	14.99	19.88	0.29	0.00	99.48	74.55
20	70 ц	51.31	0.48	1.72	0.02	9.68	0.35	14.98	19.26	0.31	0.00	98.11	73.39
21	71 ц	51.17	0.50	1.94	0.02	10.09	0.33	14.98	19.73	0.31	0.00	99.07	72.57
22	72 пр	51.05	0.51	2.02	0.01	10.30	0.32	14.93	19.62	0.35	0.01	99.12	72.09
23	73 пр	51.24	0.50	2.08	0.02	10.54	0.32	15.17	19.12	0.33	0.00	99.33	71.95
24	74 к	51.48	0.50	2.48	0.01	9.95	0.29	15.00	19.01	0.31	0.01	99.03	72.87

Примечание. Вкрапленники клинопироксена из базальтов влк. Уксичан (обр. К-15-16). Здесь и далее: точка анализа вкрапленника: ц — центр, пр — промежуточная зона, к — край. Mg# = Mg·100/(Mg + Fe), ф. ед.

Таблица 4.

## Представительные оригинальные анализы (мас. %) ортопироксенов из эффузивов вулканов Уксичан и Ичинский

№ п/п	№ и точка анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Mg#
1	37 к	53.37	0.27	1.38	0.00	17.18	0.60	25.65	1.69	0.02	0.00	100.17	72.68
2	38 пр	54.24	0.25	1.03	0.02	18.07	0.60	25.08	1.55	0.01	0.00	100.86	71.21
3	39 пр	54.15	0.19	0.86	0.02	17.24	0.65	25.89	1.64	0.03	0.00	100.67	72.80
4	40 пр	54.58	0.18	0.76	0.03	16.52	0.64	25.94	1.71	0.02	0.00	100.38	73.67
5	41 ц	53.93	0.24	1.15	0.01	17.67	0.66	25.25	1.55	0.02	0.00	100.48	71.80
6	42 к	54.11	0.22	1.31	0.00	16.28	0.49	25.76	1.60	0.04	0.00	99.81	73.82
7	43 ц	53.84	0.22	1.21	0.00	16.92	0.49	25.93	1.60	0.04	0.00	100.26	73.20
8	44 к	53.46	0.22	1.45	0.00	16.77	0.50	25.99	1.56	0.02	0.00	99.97	73.42
9	45 пр	54.73	0.29	1.52	0.06	12.07	0.45	28.95	1.95	0.04	0.01	100.05	81.04
10	46 ц	55.05	0.23	1.31	0.04	13.10	0.50	28.05	1.89	0.04	0.00	100.22	79.23
11	47 к	54.65	0.29	1.42	0.04	13.79	0.45	27.79	1.88	0.04	0.01	100.35	78.22
12	48 пр	55.11	0.24	1.02	0.04	11.77	0.63	29.30	1.87	0.02	0.00	100.01	81.60
13	49 пр	53.64	0.28	1.81	0.03	14.84	0.42	26.57	1.95	0.03	0.00	99.57	76.14
14	50 пр	53.83	0.28	1.81	0.04	15.71	0.41	26.46	1.82	0.03	0.00	100.39	75.01
15	85 пр	54.20	0.15	0.55	0.08	19.75	1.87	23.56	0.83	0.02	0.00	101.00	68.01
16	86 пр	54.74	0.10	0.38	0.10	19.07	1.88	23.47	0.73	0.01	0.00	100.46	68.68
17	87 к	54.21	0.12	0.60	0.11	18.96	1.72	23.94	0.90	0.03	0.00	100.58	69.23
18	88 ц	53.42	0.13	0.80	0.02	18.95	1.81	23.72	0.67	0.02	0.00	99.54	69.05
19	111 пр	53.81	0.09	0.39	0.00	20.15	1.59	23.13	0.67	0.01	0.00	99.84	67.17
20	112 пр	54.03	0.11	0.41	0.01	19.13	1.22	23.55	0.91	0.01	0.00	99.37	68.69
21	113 пр	53.61	0.09	0.33	0.00	21.01	1.75	22.49	0.65	0.01	0.00	99.93	65.61
22	114 пр	53.54	0.08	0.35	0.04	20.73	1.78	23.15	0.63	0.03	0.01	100.33	66.56
23	115 пр	54.00	0.09	0.31	0.03	20.45	1.80	22.62	0.64	0.03	0.01	99.98	66.34
24	122 к	54.19	0.09	0.30	0.02	19.09	1.18	23.98	0.80	0.03	0.00	99.68	69.12
25	123 пр	53.33	0.14	0.48	0.01	20.61	1.59	23.09	0.81	0.02	0.00	100.09	66.63
26	125 ц	53.63	0.08	0.28	0.01	19.01	1.19	23.60	0.74	0.00	0.00	98.53	68.87
27	126 к	53.88	0.13	0.57	0.00	19.35	1.18	23.66	0.88	0.02	0.00	99.68	68.54
28	127 ц	53.74	0.11	0.59	0.03	19.49	1.20	23.85	0.85	0.03	0.00	99.90	68.56
29	128 к	53.62	0.10	0.42	0.01	20.49	1.47	23.40	0.73	0.02	0.00	100.25	67.05

Примечание. 1—18 – вкрапленники ортопироксена из базальтов (1—14, обр. К-15-16) и дацитов (15—18, обр. К-20-16) влк. Уксичан; 19—29 (обр. К-3А-16) – ортопироксены из дацитов влк. Ичинский.

По соотношениям Al<sup>IV</sup>—Ca и Mg#—Ca (рис. 6) составы ортопироксена и клинопироксена из базальтов влк. Уксичан заметно изменяются. При этом пироксены вкрапленников и микрокристаллы из основной массы породы обладают сопоставимыми вариациями значений компонентов. В общем клинопироксены показывают закономерные изменения своих составов с увеличением содержания алюминия

Рис. 5. Составы пироксенов из базальтов влк. Уксичан.

1, 3 — вкрапленники пироксенов из базальтов (1 — по [Давыдова, 2014], 3 — данные авторов); 2 — пироксены основной массы базальтов, по [Давыдова, 2014]. Изотермы приведены согласно [Давыдова, 2014]. Поля составов пироксенов [Годовиков, 1975]: 1 — диопсид, 2 — салит, 3 — ферросалит, 4 — эндиопсид, 5 — авгит, 6 — ферроавгит, 7 — субкальциевый авгит, 8 — субкальциевый ферроавгит, 9 — магниальный пижонит, 10 — промежуточный пижонит, 11 — энстатит, 12 — бронзит, 13 — гиперстен.

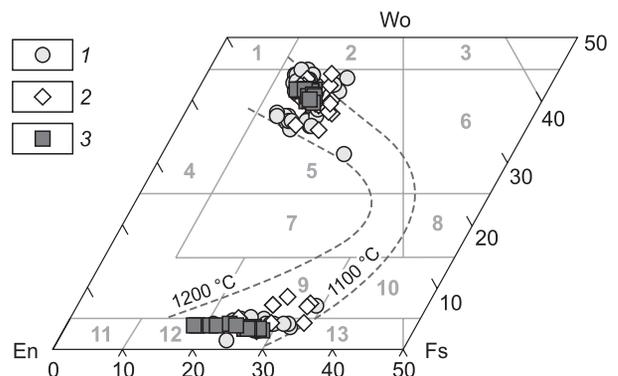


Таблица 5.

**Представительные оригинальные анализы (мас. %) амфиболов  
из эффузивов вулканов Уксичан и Ичинский**

№ п/п	№ и точка анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Al <sup>IV</sup>
1	75 к	49.09	1.50	6.13	11.47	0.57	16.17	10.61	1.55	0.22	97.31	1.02
2	76 пр	48.33	1.52	6.20	11.65	0.59	16.05	10.66	1.58	0.22	96.80	1.04
3	79 к	48.65	1.48	6.50	11.48	0.61	15.90	10.58	1.62	0.22	97.04	1.07
4	80 пр	48.14	1.60	6.70	11.81	0.62	15.55	10.72	1.68	0.23	97.05	1.11
5	82 пр	48.80	1.39	6.25	11.77	0.66	15.86	10.79	1.54	0.26	97.32	1.05
6	83 ц	48.88	1.41	6.15	11.77	0.72	15.85	10.69	1.55	0.21	97.23	1.03
7	89 к	48.10	1.55	6.59	11.83	0.62	15.57	10.71	1.63	0.23	96.83	1.11
8	90 пр	48.29	1.59	6.45	11.57	0.61	15.74	10.86	1.59	0.22	96.92	1.08
9	91 пр	48.82	1.52	6.16	11.67	0.61	15.88	10.78	1.59	0.21	97.24	1.04
10	92 ц	48.35	1.58	6.32	11.74	0.61	15.99	10.74	1.61	0.22	97.16	1.06
11	93 к	46.80	1.80	6.97	11.87	0.69	15.35	10.67	1.76	0.25	96.16	1.18
12	94 пр	49.01	1.44	6.03	11.29	0.60	16.08	10.69	1.50	0.19	96.83	1.01
13	96 пр	47.31	1.92	7.52	12.01	0.57	14.91	10.75	1.85	0.26	97.10	1.20
14	97 ц	49.74	1.47	6.14	11.22	0.62	16.19	10.58	1.59	0.20	97.75	0.98
15	98 к	47.80	1.77	7.01	12.09	0.58	15.50	10.94	1.72	0.27	97.68	1.18
16	99 пр	48.21	1.58	6.40	11.48	0.58	15.67	10.64	1.64	0.22	96.42	1.07
17	100 пр	48.35	1.64	6.44	11.83	0.60	15.89	10.77	1.68	0.22	97.42	1.08
18	101 пр	47.68	1.67	6.65	11.86	0.59	15.80	10.58	1.74	0.25	96.82	1.12
19	102 ц	47.92	1.69	6.51	11.73	0.60	15.77	10.85	1.69	0.23	96.99	1.10
20	103 к	49.02	1.52	5.77	11.46	0.47	15.94	10.96	1.39	0.42	96.95	0.97
21	106 к	48.91	1.39	5.89	11.63	0.51	16.03	10.79	1.43	0.40	96.98	0.99
22	107 пр	48.87	1.40	6.00	11.79	0.50	15.98	10.89	1.45	0.41	97.29	1.01
23	108 пр	48.03	1.63	6.52	12.04	0.55	15.21	10.90	1.52	0.47	96.87	1.07
24	109 пр	47.00	1.91	7.18	12.71	0.50	14.69	11.02	1.64	0.55	97.20	1.20
25	110 ц	47.23	1.80	7.17	11.92	0.40	14.94	10.53	1.65	0.53	96.17	1.17
26	117 к	48.09	1.50	5.80	11.66	0.46	16.00	10.86	1.47	0.41	96.24	0.99
27	119 пр	48.34	1.32	5.13	11.46	0.44	16.76	10.95	1.36	0.38	96.14	0.89
28	121 ц	46.64	1.84	6.79	11.64	0.34	15.73	10.83	1.72	0.49	96.02	1.16
29	129 к	48.56	1.33	5.59	11.45	0.55	15.67	10.65	1.33	0.40	95.54	0.95
30	130 пр	49.39	1.28	5.28	11.55	0.56	15.93	10.82	1.24	0.37	96.42	0.89
31	131 пр	45.99	2.01	7.83	13.22	0.53	14.04	10.89	1.80	0.59	96.89	1.29
32	132 пр	48.05	1.65	6.69	12.39	0.54	15.22	10.78	1.57	0.44	97.32	1.11
33	133 пр	47.27	1.86	6.93	12.27	0.49	14.85	10.70	1.63	0.48	96.49	1.15
34	134 ц	47.19	1.99	7.22	12.36	0.50	14.74	10.67	1.69	0.50	96.85	1.18
35	142 к	49.41	1.35	5.42	11.03	0.54	16.10	10.59	1.39	0.37	96.21	0.90
36	143 пр	46.08	2.27	7.74	11.88	0.39	14.70	11.00	1.89	0.61	96.56	1.28
37	144 ц	46.54	2.15	7.41	11.54	0.34	15.14	10.92	1.81	0.57	96.42	1.23
38	145 пр	46.89	1.99	7.16	11.20	0.39	15.24	10.87	1.76	0.54	96.04	1.17
39	146 пр	47.80	1.68	6.55	11.16	0.47	15.54	10.75	1.59	0.47	96.01	1.07
40	147 к	49.61	1.32	5.40	10.87	0.55	15.98	10.57	1.37	0.36	96.03	0.86
41	148 к	47.99	1.74	6.61	11.25	0.43	15.77	10.79	1.59	0.50	96.67	1.10
42	149 пр	46.18	2.21	7.66	11.94	0.41	14.82	10.88	1.84	0.61	96.54	1.28
43	150 пр	47.19	1.85	7.18	11.39	0.40	15.19	10.81	1.76	0.52	96.29	1.15
44	152 ц	44.53	2.42	8.97	12.23	0.41	13.92	10.70	2.06	0.72	95.95	1.44
45	153 к	48.24	1.65	6.11	11.18	0.47	16.36	10.51	1.67	0.41	96.60	1.03
46	154 пр	45.20	2.36	8.28	12.18	0.43	15.04	10.60	2.08	0.58	96.75	1.41
47	155 пр	45.64	2.34	8.05	12.53	0.53	14.90	10.69	2.08	0.60	97.36	1.37
48	156 пр	48.04	1.53	6.06	11.58	0.64	16.48	10.41	1.62	0.41	96.77	1.02
49	157 ц	47.95	1.60	6.22	11.22	0.47	16.57	10.49	1.69	0.43	96.64	1.05
50	160 к	45.69	2.18	8.20	12.18	0.45	14.47	10.83	1.99	0.48	96.47	1.34
51	161 пр	48.02	1.66	6.39	11.17	0.44	15.70	10.76	1.60	0.42	96.16	1.06
52	162 пр	44.71	2.64	8.89	11.94	0.35	14.36	10.90	2.13	0.49	96.41	1.46
53	164 ц	44.24	2.50	8.89	12.57	0.43	13.95	10.74	2.16	0.54	96.02	1.49
54	166 к	47.14	1.94	7.03	11.78	0.50	14.97	10.90	1.77	0.51	96.54	1.15
55	167 ц	47.11	1.89	7.06	11.69	0.50	15.34	10.88	1.80	0.55	96.82	1.19

Примечание. 1-20 — вкрапленники амфибола из дацита влк. Уксичан (обр. К-20-16); 21-55 — амфиболы из дацита влк. Ичинский (21-34 – обр. К-3А-16, 35-55 — обр. К-2В-16). Al<sup>IV</sup> — алюминий в четверной координации, ф. ед.

Таблица 6. Представительные оригинальные анализы (мас. %) вкрапленников плагиоклаза из базальтов влк. Уксихан

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Ап
1	6	48.56	32.25	0.75	15.74	2.70	0.10	100.10	75.87
2	6а	52.28	29.55	0.86	12.68	4.43	0.20	100.00	60.57
3	8	52.23	29.78	0.88	12.99	3.92	0.20	100.00	63.92
4	9	47.98	32.41	0.93	16.31	2.37	0.10	100.10	78.72
5	10	47.20	33.16	0.74	16.65	2.16	0.09	100.00	80.57
6	11а	52.08	29.80	0.91	12.77	4.25	0.19	100.00	61.73
7	11b	50.56	30.90	0.69	13.93	3.78	0.15	100.01	66.50

Примечание. Ап — ф. ед. Точка анализа вкрапленника — рядом (на расстоянии 10—20 мкм) с расплавленными включениями, независимо от их расположения в кристалле.

и значений магниальности на фоне роста кальция, что хорошо согласуется с закономерностями изменения составов эффузивов влк. Уксихан (см. рис. 4). Для ортопироксенов можно отметить обратную тенденцию — с уменьшением магниальности и падением алюминия с ростом кальция при переходе от фенокристаллов к микрокристаллам основной массы (см. рис. 6).

**Оливины** из эффузивов влк. Уксихан закономерно изменяют свой состав в зависимости от особенностей кристаллизации. В частности, по соотношению MnO—Fo и CaO—Fo в целом прослеживается рост содержания марганца и кальция при падении форстеритового компонента в последовательной смене: центр фенокристалла — край вкрапленника — микрокристаллы основной массы (рис. 7). Самыми магниальными являются центры вкрапленников, среди которых можно выделить две группы: Fo = 82—76 и Fo = 75—60 ф. ед. Края вкрапленников характеризуются более низкими значениями форстеритового компонента (главным образом Fo = 67—61 ф. ед.). Минимум Fo (до 52 ф. ед.) установлен для микрокристаллов основной массы. По содержанию марганца и кальция все рассмотренные оливины разбиваются на две группы, в которых фактически соблюдаются те же самые общие закономерности — рост содержания марганца и кальция при падении форстеритового компонента в последовательной смене: центр фенокристалла — край вкрапленника — микрокристаллы основной массы (см. рис. 7). Таким образом, в составе оливина отражается смена условий его кристаллизации от вкрапленников до микрокристаллов основной массы.

**Амфиболы** были изучены в дацитах и латитах влк. Уксихан, а также в дацитах и андезитах Ичинского вулкана. По своему составу амфиболы из дацитов обоих вулканов относятся к магниогорнблендитам и соответствуют амфиболам из пород известково-щелочных серий. В то же время амфиболы из андезитов и латитов являются магниогастингситами, располагаясь также в известково-щелочном поле (рис. 8). Устанавливаются разные тренды изменения составов амфиболов для рассмотренных вулканов.

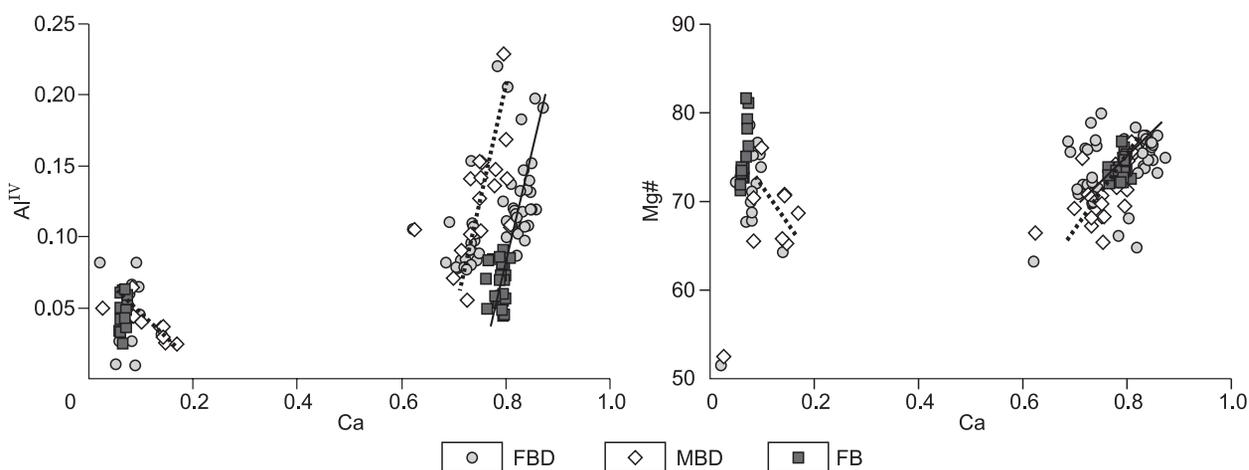
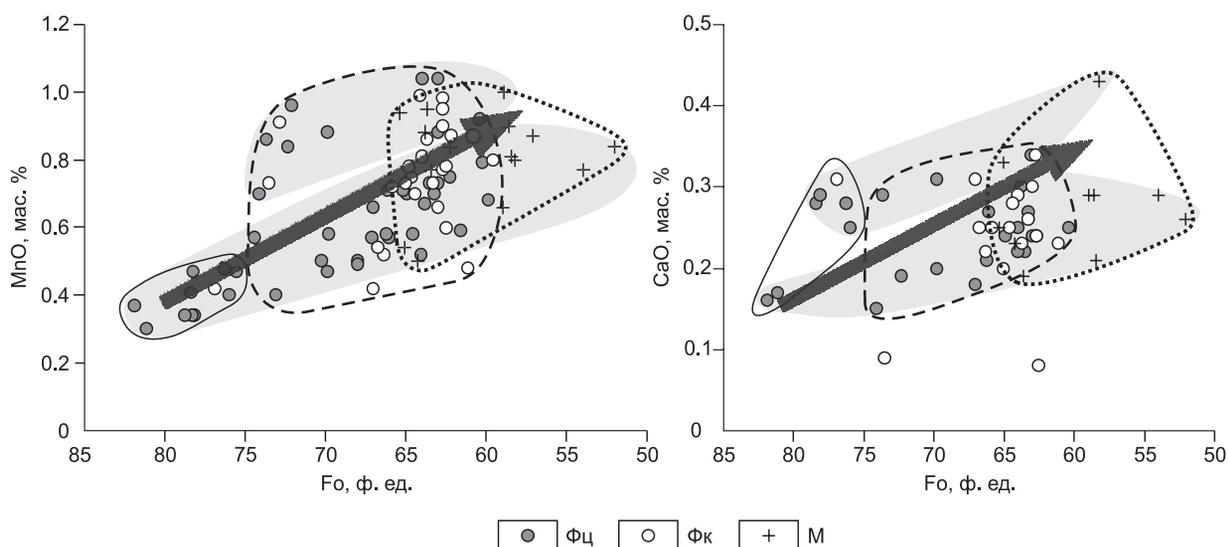


Рис. 6. Соотношения Al<sup>IV</sup>—Ca и Mg#—Ca (ф. ед.) в пироксенах из базальтов влк. Уксихан.

FBD, MBD — данные по базальтам из работы [Давыдова, 2014]: фенокристаллы (FBD) и пироксены из основной массы (MBD); FB — данные авторов по фенокристаллам из базальтов. Тренды изменения составов пироксенов: фенокристаллы (сплошная линия), пироксены из основной массы (пунктирная линия). Mg# = Mg·100/(Mg + Fe), ф. ед.



**Рис. 7. Соотношения MnO—Fo и CaO—Fo в оливинах из эффузивов влк. Уксичан.**

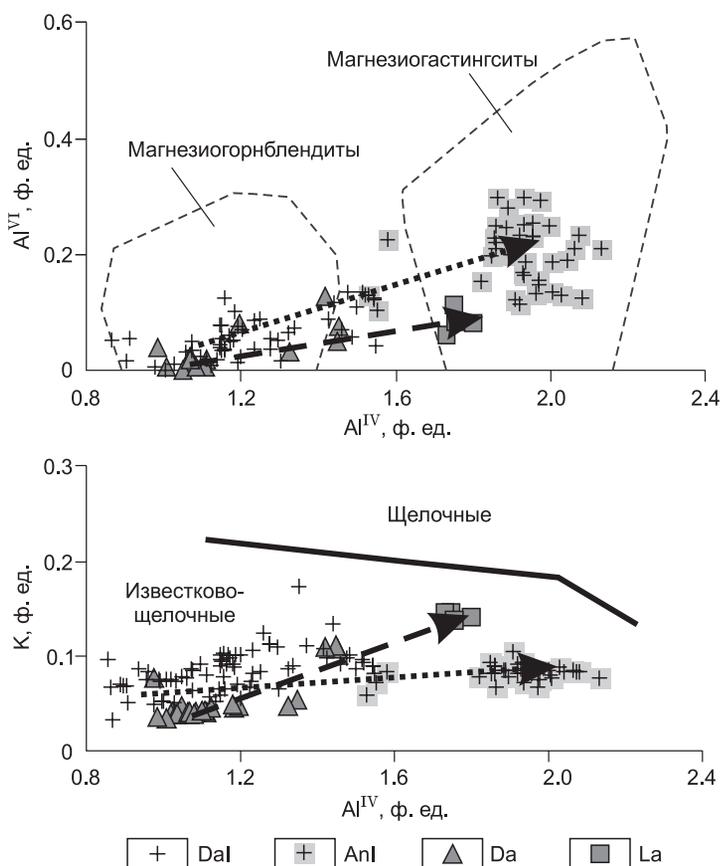
Фц, Фк, М — данные из работы [Давыдова, 2014]: фенокристаллы — центр (Фц) и край (Фк); оливины из основной массы (М). Сплошная линия — примитивная (ранняя) группа; штриховая — поздние минералы; пунктирная — микрокристаллы из основной массы. Серым цветом выделены группы оливинов, различающиеся по содержанию марганца и кальция. Стрелками показаны средние тренды изменения составов оливинов на фоне падения значений форстеритового компонента.

В частности, для Ичинского характерны повышенные значения  $Al^{VI}$ , в то время как содержание калия практически не меняется на фоне роста  $Al^{IV}$ , в отличие от влк. Уксичан, в амфиболах которого идет явное накопление калия (см. рис. 8).

**Плагиоклазы** из базальтов влк. Уксичан наиболее детально изучались в ходе исследования расплавных включений. В таблице 6 представлены составы полевых шпатов, проанализированные рядом с расплавными включениями. По содержанию анортитового компонента (60–81 An) плагиоклаз, содержащий включения, соответствует лабрадору и битовниту.

Часть информации об условиях эволюции магматических систем была получена в результате исследования особенностей изменения составов от центра к краю вкрапленников из эффузивов вулканов Уксичан и Ичинский.

**Клинопироксен** по зонам роста изучен только для базальтов влк. Уксичан. Устанавливаются три основных типа эволюции составов фенокристаллов клинопироксенов от центра к краю: а) в целом нейтральная ситуация с небольшим ростом магнезиальности и незначительным



**Рис. 8. Составы амфиболов из эффузивов вулканов Уксичан и Ичинский.**

Амфиболы из дацитов (DaI) и андезитов (AnI) влк. Ичинский; амфиболы из дацитов (Da) и латитов (La) влк. Уксичан. Показаны тренды изменения составов амфиболов вулканов Ичинского (пунктирная линия) и Уксичан (штриховая линия). Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием информации по составам минералов из работ [Давыдова, 2014; Добрецов и др., 2016].

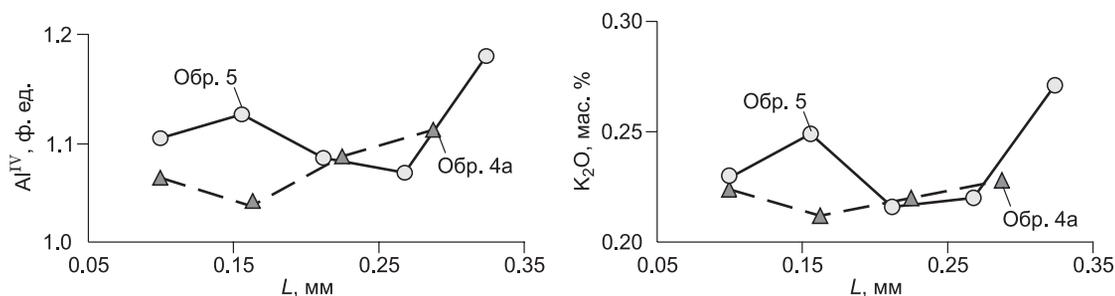


Рис. 9. Изменение состава вкрапленников амфибола из дацитов влк. Укисчан.

$L$  — расстояние точки анализа от центра вкрапленника.

падением  $TiO_2$ ; б) в основном падение  $Mg\#$  и рост титана с резким изменением поведения элементов на обратное в краевой зоне; в) отчетливый рост магнезиальности минерала с падением титана. Первый случай отвечает достаточно стабильным условиям кристаллизации без заметных флуктуаций  $PTX$ -параметров. Вторая ситуация близка к стандартному процессу фракционирования в замкнутой камере с накоплением в остаточных магмах титана, которая на заключительном этапе резко сменилась кристаллизацией клинопироксена из более магнезиального расплава. Третий случай показывает постоянный рост магнезиальности и падение титана в течение практически всей истории вкрапленника с резкой сменой на заключительной стадии. Эти особенности могут свидетельствовать о связи разноуровневых камер с постоянным поступлением более примитивных глубинных магм и закрытием системы на заключительном этапе, приводящем к фракционированию расплавов с падением  $Mg\#$  и ростом титана (см. ниже).

Вкрапленники ортопироксена в базальтах влк. Укисчан обычно очень мелкие и изменены в гораздо большей степени, чем фенокристаллы клинопироксена. Редко удается рассмотреть состав по разрезу от центра к краю кристалла. Все же было установлено, что, несмотря на заметные вариации магнезиальности, графики орто- и клинопироксенов принципиально близки между собой. Вначале пироксен рос из расплава, в котором происходило в целом определенное падение содержания магния и рост титана. На заключительной стадии (кристаллизация краевых зон) происходило (как и в случае клинопироксена) резкое повышение магнезиальности и падение титана, что связывается, скорее всего, с поступлением порции глубинного и более примитивного расплава.

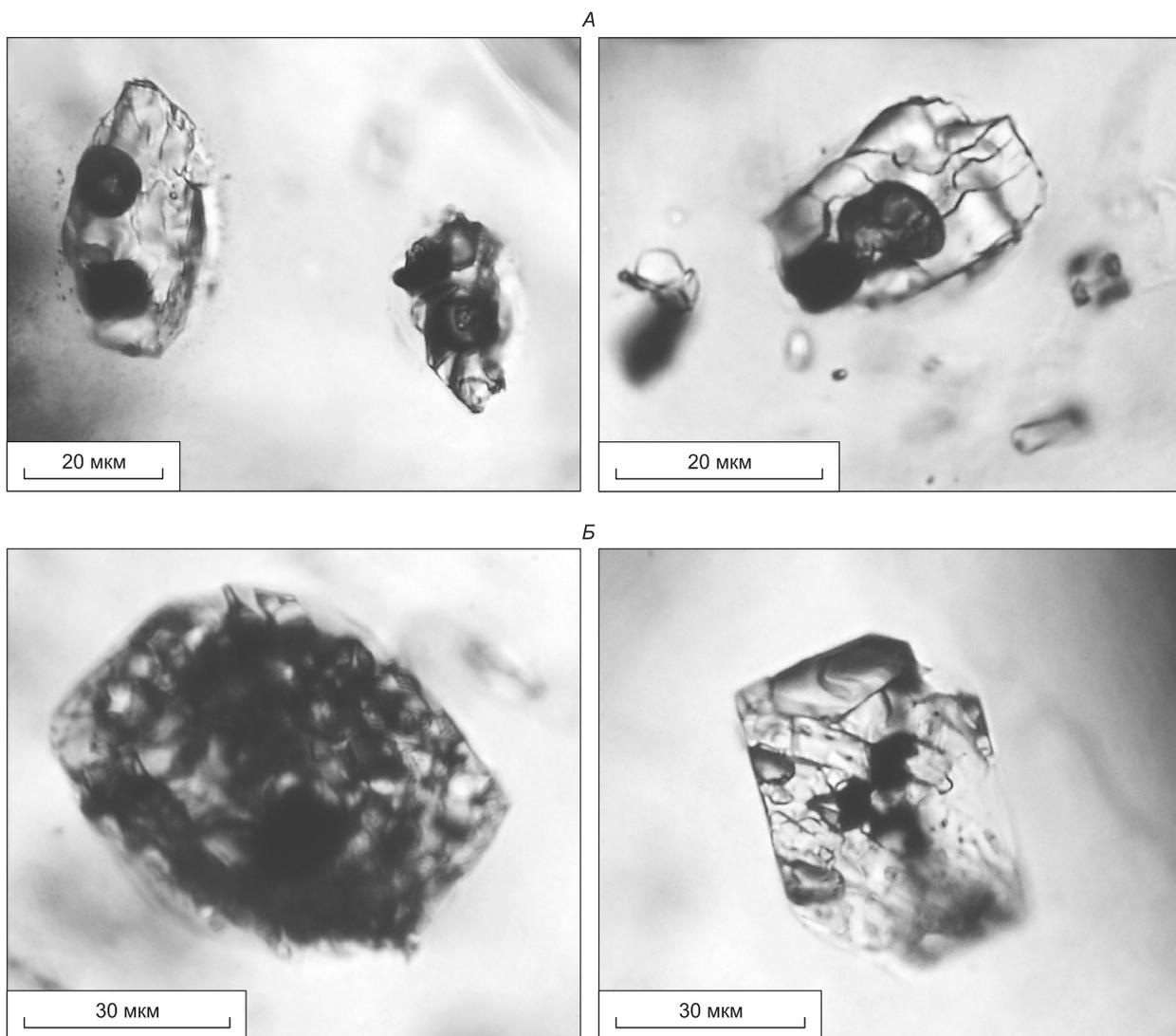
Амфиболы влк. Укисчан были изучены главным образом из дацитов. Исследования показали, что составы амфиболов изменяются от центра к краю достаточно равномерно. В частности, преобладает некоторое увеличение алюминия при практически постоянном калии. В других случаях компоненты сначала растут, а затем устойчиво снижаются, резко увеличиваясь во внешних зонах на заключительном этапе кристаллизации (рис. 9).

#### РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МИНЕРАЛАХ ИЗ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОД

Данные по расплавленным включениям в минералах из пород Ичинского вулкана опубликованы нами ранее [Добрецов и др., 2016; Симонов, Котляров, 2016]. Новые результаты были получены при исследовании расплавленных включений в клинопироксене, плагиоклазе и в ортопироксене из базальтов, представляющих среднеплиоценовые постройки стратовулкана, послужившего основанием вулканического центра Укисчан.

Первичные расплавные включения (размерами 10—35 мкм) в клинопироксене (рис. 10, А) располагаются обычно по зонам роста. Объемные округлые включения содержат несколько хорошо различающихся светлых и темных фаз, а также флюидный пузырек. Эксперименты в микротермокамере показали, что гомогенным содержимое включений в клинопироксене становится в диапазоне температур 1190—1215 °С. После прогрева и закалки включения содержат гомогенное светлое стекло и флюидный пузырек (рис. 11, А).

Первичные расплавные включения (до 60—100 мкм) в плагиоклазе располагаются равномерно, ориентируясь параллельно граням кристалла. Включения часто обладают правильными удлиненно-прямоугольными формами и содержат многочисленные фазы, среди которых различаются клинопироксены, плагиоклазы, рудные микрокристаллы и флюидные пузырьки (см. рис. 10, Б). Экспериментальные исследования свидетельствуют о более широком диапазоне температур гомогенизации включений в плагиоклазе — 1175—1240 °С. После высокотемпературных экспериментов и закалки включения в пла-



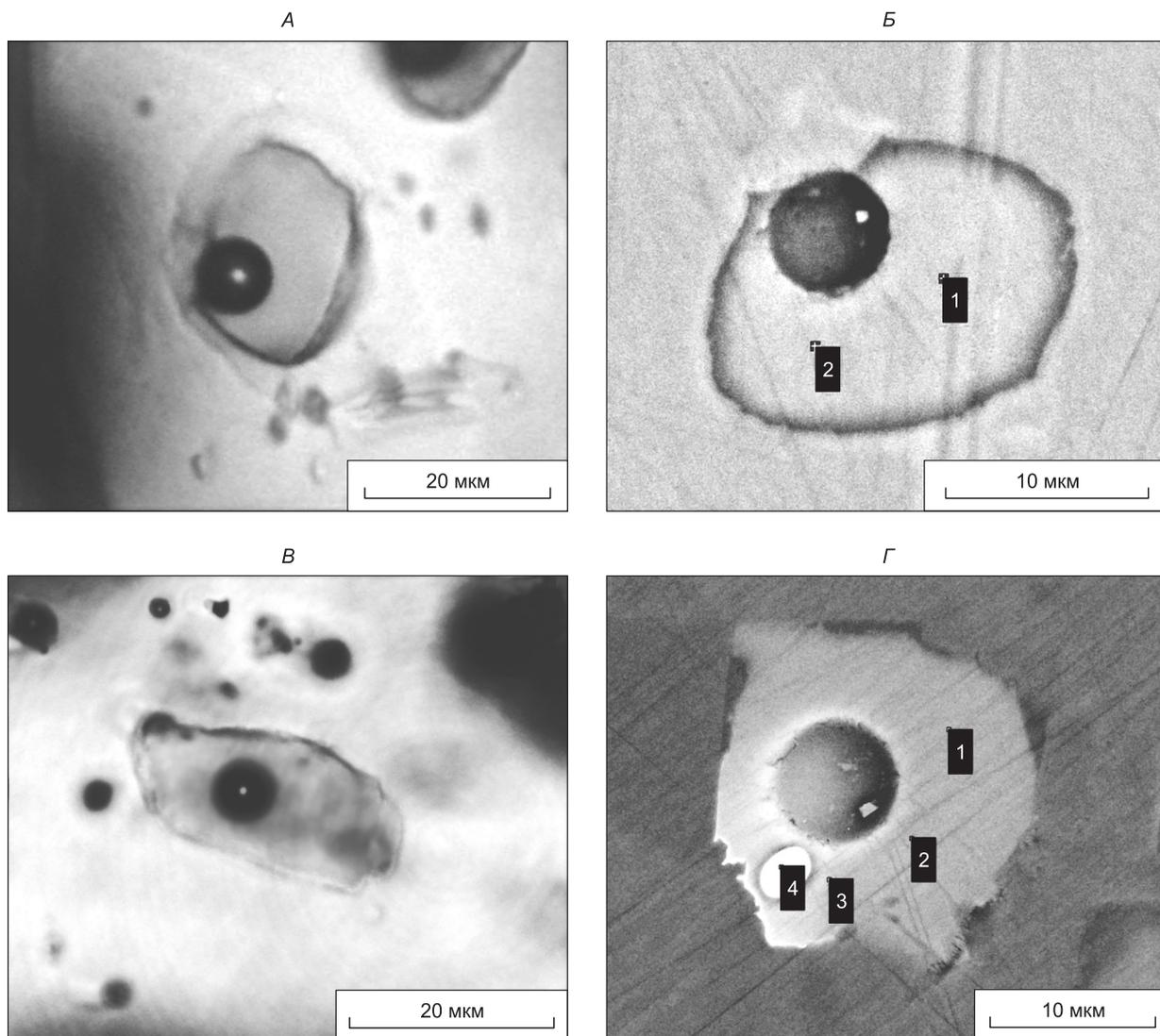
**Рис. 10. Фотографии первичных расплавных включений в клинопироксене (А) и в плагиоклазе (Б) из базальта влк. Уксичан.**

гиоклазе (так же, как и включения в клинопироксене) заполнены светлым гомогенным стеклом с небольшим флюидным пузырьком (см. рис. 11, Б).

Расплавные включения (до 25 мкм) в **ортопироксене** встречаются гораздо реже, чем включения в клинопироксене и плагиоклазе. Они обычно располагаются по зонам роста и содержат несколько фаз. Температуры гомогенизации включений составляют 1180—1225 °С, показывая фактически промежуточные значения между включениями в клинопироксене и в плагиоклазе.

Анализ гомогенных стекол прогретых и гомогенизированных включений в минералах из базальтов (табл. 7) позволил выяснить особенности составов расплавов, из которых кристаллизовались рассмотренные породы влк. Уксичан. По соотношению  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{—SiO}_2$  практически все данные по включениям относятся к серии с нормальной щелочностью, так же как и сам изученный образец базальта (К-15-16). Подавляющее большинство расплавных включений по содержанию  $\text{SiO}_2$  (47.8—56.8 мас. %) соответствует базальтам и андезитобазальтам. При этом включения в клинопироксене (с  $\text{MgO} = 6.8\text{—}9.3$  мас. %) относятся к высокомагнезиальным базальтам и андезитобазальтам.

При сравнении составов пород (см. табл. 2) и прогретых расплавных включений (см. табл. 7) хорошо видно, что содержания  $\text{K}_2\text{O}$  в образце базальта (0.69 мас. %) и во включениях из минералов этой пробы (преобладают значения 0.5—0.9 мас. %) весьма близки. То же самое и по соотношению  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{—SiO}_2$ —базальт и включения относятся к серии с нормальной щелочностью. В то же время влк. Уксичан характеризуется высококалиевой спецификой. Объяснением низкокалиевых составов ба-



**Рис. 11. Фотографии прогретых (гомогенизированных) и закаленных первичных расплавных включений с гомогенным стеклом в клинопироксене (А, Б) и в плагиоклазе (Б, Г) из базальта влк. Уксичан.**

Б, Г — вид в сканирующем электронном микроскопе (цифрами обозначены точки анализов состава стекол (1, 2, 3) и рудной «капли» (4), содержащей 75 мас. % FeO и 20 мас. % TiO<sub>2</sub>).

зальта и находящихся в его минералах включений может быть то, что изученный обр. К-15-16 отобран из среднеплиоценовой постройки, сложенной эффузивами стратовулкана Уксичан, послужившего основанием для последующих вулканических построек с высококалиевым магматизмом.

На вариационных петрохимических диаграммах включения в плагиоклазе для большинства элементов во многом совпадают с данными по эффузивным породам влк. Уксичан, показывая падение содержания титана, магния, кальция и рост натрия на фоне накопления SiO<sub>2</sub>. На диаграмме K<sub>2</sub>O—SiO<sub>2</sub> включения в плагиоклазе и в клинопироксене образуют фактически единый тренд в области умеренно калиевых пород, начинающийся от составов базальтов (в том числе и детально изученного обр. К-15-16) влк. Уксичан, показывая возможный путь эволюции расплавов на этапе формирования среднеплиоценовых построек стратовулкана, послужившего основанием вулканического центра Уксичан (рис. 12).

Включения в клинопироксене, совпадая в целом с данными по включениям в плагиоклазе по кремнезему, титану и кальцию, заметно отличаются от них повышенными значениями магния и пониженными натрия (см. рис. 12). Необходимо отметить, что практически на всех диаграммах этого рисунка намечается по два параллельных тренда, прослеживающих общие закономерности. Один тренд близок к верхней границе полей эффузивных пород вулканов Уксичан и Ичинский, а другой — тяготеет к ниж-

Таблица 7.

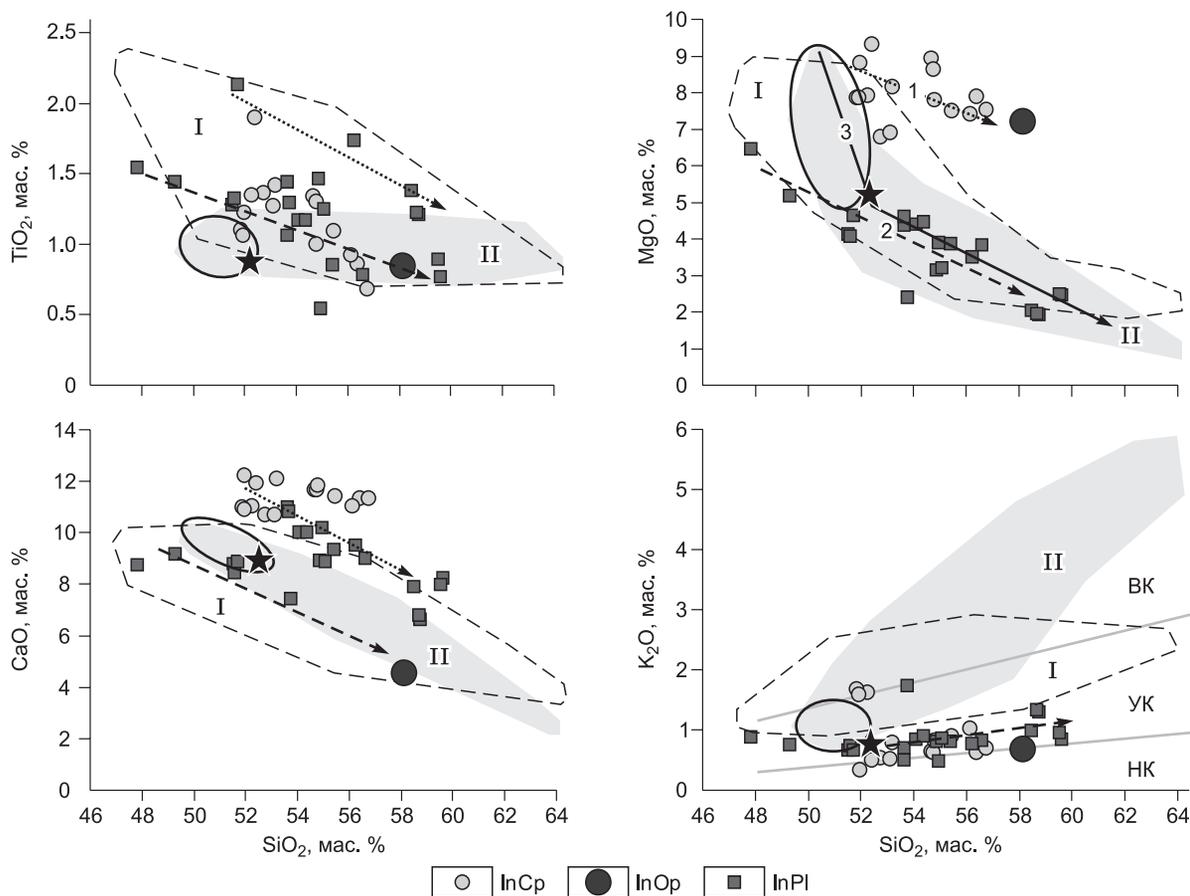
**Представительные анализы (мас. %) прогретых расплавных включений  
в минералах из базальтов влк. Уксичан**

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Сумма	T <sub>гом</sub> , °С
1	1a_3	52.74	1.36	10.21	12.47	0.42	6.79	10.70	2.59	0.53	н.о.	97.81	1215
2	1a_4	53.11	1.27	10.22	12.33	0.32	6.89	10.67	2.69	0.51	»	98.01	1215
3	2_1	54.66	1.34	7.87	10.73	0.34	8.94	11.67	1.81	0.64	»	98.00	1205
4	2_2	54.77	1.30	7.80	11.03	0.28	8.64	11.65	1.93	0.62	»	98.02	1205
5	2_3	52.42	1.90	7.21	12.74	0.28	9.31	11.94	1.71	0.49	»	98.00	1205
6	2_4	51.97	1.22	7.75	13.92	0.34	8.82	12.22	1.43	0.33	»	98.00	1205
7	3_3	56.40	0.86	8.91	9.53	0.28	7.89	11.33	2.19	0.61	»	98.00	1210
8	3_4	56.77	0.68	8.53	8.95	0.39	7.52	11.32	2.47	0.70	»	97.33	1210
9	5_1	52.26	1.35	7.70	14.34	0.35	7.92	11.03	1.43	1.61	»	97.99	1190
10	5_2	51.87	1.10	8.15	14.68	0.30	7.84	10.98	1.39	1.67	»	97.98	1190
11	5_3	51.95	1.06	7.82	14.93	0.25	7.85	10.89	1.44	1.59	0.16	97.94	1190
12	5a_1	56.14	0.92	10.14	8.83	0.34	7.41	11.04	2.17	1.01	н.о.	98.00	1190
13	5a_2	55.47	1.09	10.15	9.10	0.22	7.48	11.42	2.17	0.90	»	98.00	1190
14	5a_3	54.78	1.00	10.03	9.41	0.21	7.79	11.84	2.11	0.82	»	97.99	1190
15	4_5	58.14	0.84	7.83	16.60	0.37	7.19	4.56	1.73	0.68	»	97.94	1225
16	6_2	59.53	0.89	16.49	6.87	н.о.	2.48	7.99	4.60	0.94	0.21	100.00	1205
17	8_1	54.09	1.17	16.65	9.05	0.19	4.40	10.02	3.45	0.83	0.16	100.01	1175
18	8_2	54.39	1.17	16.69	8.92	н.о.	4.45	10.03	3.47	0.89	н.о.	100.01	1175
19	9_1	51.54	1.28	19.21	10.10	»	4.12	8.78	3.98	0.65	0.35	100.01	1210
20	9_2	51.60	1.32	19.30	10.15	0.28	4.06	8.44	3.85	0.73	0.26	99.99	1210
21	9_3	47.83	1.54	16.66	12.91	0.29	6.46	8.73	2.45	0.87	0.28	98.02	1210
22	9_4	49.31	1.44	17.78	10.98	0.19	5.16	9.16	3.03	0.74	0.21	98.00	1210
23	10_1	55.42	0.85	15.61	8.63	0.17	3.85	9.34	4.48	0.80	0.40	99.55	1220
24	10_2	56.61	0.78	15.54	8.21	0.20	3.81	9.01	4.46	0.82	0.30	99.74	1220
25	10_3	56.24	1.73	15.73	8.91	0.17	3.50	9.49	3.27	0.76	0.21	100.01	1220
26	11a_1	58.77	1.21	18.73	5.25	н.о.	1.90	6.62	4.93	1.29	0.46	99.16	1200
27	11a_2	58.70	1.22	19.20	5.29	»	1.94	6.80	4.82	1.32	0.23	99.52	1200
28	11b_1	54.89	1.46	17.36	8.89	0.00	3.14	8.92	4.32	0.80	0.21	99.99	1200
29	11b_2	55.07	1.25	17.59	8.64	н.о.	3.18	8.86	4.27	0.86	0.29	100.01	1200
30	11b_3	54.97	0.54	17.39	7.44	0.12	3.89	10.19	4.70	0.48	0.26	99.98	1200
31	11b_4	53.67	1.44	16.40	7.79	н.о.	4.61	10.81	4.21	0.50	0.21	99.64	1200
32	11b_5	53.76	1.29	18.85	9.59	0.20	2.39	7.44	4.52	1.73	н.о.	99.77	1200
33	10_4	51.72	2.13	15.62	9.47	0.39	4.63	8.87	4.62	0.65	0.63	98.73	1240

Примечание. Приведены анализы гомогенных стекол, заполняющих весь (кроме газового пузырька) объем прогретых гомогенизированных и закаленных первичных расплавных включений в клинопироксене (1-14), в ортопироксене (15) и в плагиоклазе (16-33) из базальтов влк. Уксичан (обр. К-15-16). T<sub>гом</sub> – температура гомогенизации включения. н.о. – не определялось.

ней. В общем расплавные включения в минералах изученного базальта, с одной стороны, согласуются с данными по эволюции составов пород влк. Уксичан (особенно это касается относительно низкотитанистых включений в плагиоклазе, располагающихся в полях эффузивов), а с другой, — устанавливается вполне самостоятельное поведение включений в клинопироксене. Скорее всего, это обусловлено двойственным положением рассмотренных базальтов, представляющих наиболее ранние комплексы основания, но, несомненно, генетически связанных с другими (последующими) эффузивными сериями влк. Уксичан.

Наблюдаемые определенные отличия составов стекол прогретых включений в плагиоклазе и в клинопироксене находят свое объяснение на диаграмме Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—FeO/MgO (рис. 13). Здесь мы видим, что кристаллизация этих двух минералов связана с различными магматическими процессами. В частности, плагиоклаз формируется из фракционирующих остаточных расплавов, в которых растут значения FeO/



**Рис. 12. Вариационные петрохимические диаграммы (мас. %) для прогретых гомогенизированных расплавных включений в минералах из базальта влк. Уксичан.**

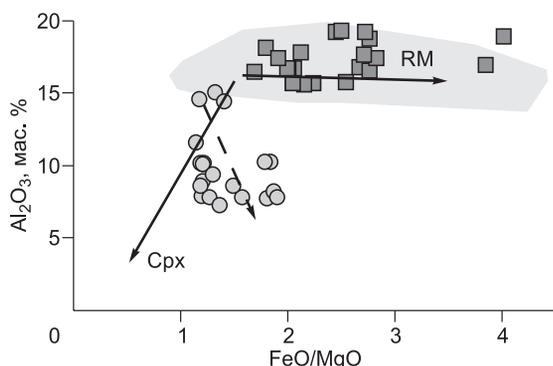
InCp, InOp, InPl — гомогенные стекла, заполняющие весь объем (кроме газового пузырька) прогретых и гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене (InCp), ортопироксене (InOp) и плагиоклазе (InPl). Сплошной линией околонуто поле умеренно калиевых базальтов влк. Уксичан, построенное на основе данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>) и из работы [Давыдова, 2014]. Звездочкой обозначен состав детально изученного образца базальта (K-15-16) влк. Уксичан, показаны поля составов эффузивных пород вулканов Ичинский (I) и Уксичан (II). Анализы эффузивных пород вулканов Ичинский и Уксичан из базы геохимических данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>) и из работы [Давыдова, 2014]. Тренды эволюции составов включений: с максимальными (пунктирная линия) и минимальными (штриховая) значениями компонентов. 1, 2, 3 — тренды эволюции расплавов. Серии пород: НК — низкокалиевые, УК — умеренно калиевые, BK — высококалиевые [Петрографический кодекс..., 2009].

MgO и точки составов располагаются в поле эффузивов влк. Уксичан. В то же время клинопироксен связан с трендом пироксеновых кумулятов — резкое падение  $Al_2O_3$  при фактически стабильной железиности (рис. 13). Сами пироксеновые кумуляты в данном случае не обнаружены, но расположение точек составов включений в ассоциации с этим трендом свидетельствует о подготовленности расплава к кристаллизации клинопироксенов, что и происходило в реальности.

В случае включений в ортопироксене составы гомогенных стекол удалось проанализировать только в единичных случаях. Полученные данные свидетельствуют о кристаллизации ортопироксена из известково-щелочных расплавов нормальной щелочности, близких по составу к магнезиальным андезит-базальтам (см. рис. 12).

В целом данные по расплавным включениям свидетельствуют о возможности значительных вариаций составов расплавов. На диаграмме MgO—SiO<sub>2</sub> тренд 1 (для базальтовых и андезитбазальтовых расплавов, до 57 мас. % SiO<sub>2</sub>) прослеживается составами расплавных включений в клинопироксене, тренд 2 (для базальт-андезитовых расплавов, до 60 мас. % SiO<sub>2</sub>) фиксируется расплавными включениями в плагиоклазе, тренд 3 (для базальт-дацитовых расплавов, до 64,5 мас. % SiO<sub>2</sub>) трассируется составами пород и расплавных включений в плагиоклазе и части включений в клинопироксене (см. рис. 12).

В заключении раздела про расплавные включения необходимо отметить, что сравнительный анализ с составами эффузивов (выступающий в качестве теста на достоверность) показал, что по большин-



**Рис. 13.** Диаграмма  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—FeO/MgO}$  для прогретых гомогенизированных расплавных включений в минералах из базальта влк. Уксичан.

Усл. обозн. см. на рис. 12. Поле составов эффузивных пород влк. Уксичан отмечено серым цветом, по GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>) и данным [Давыдова, 2014]. Показаны тренды: клинопироксеновых кумулятов (Cpx) и остаточных расплавов (RM). Штриховая линия — тренд для включений в клинопироксенах. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием информации из работ [Золотухин и др., 2003; Симонов и др., 2010, 2016].

ству петрохимических компонентов расплавные включения в плагиоклазе (с преобладающими умеренными содержаниями титана до 1.5 мас. %) совпадают с данными по породам (см. рис. 12, 13) и, соответственно, характеризуют особенности магматических систем влк. Уксичан и основные черты их эволюции.

### КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ РАСПЛАВОВ В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КАМЕРАХ

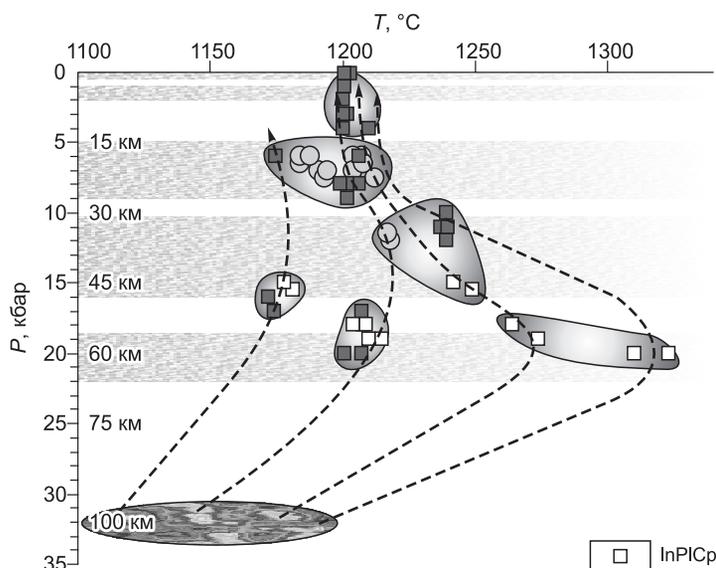
Основой для выяснения физико-химических параметров магматических систем в промежуточных камерах вулканов Уксичан и Ичинский послужили результаты исследований первичных расплавных включений в минералах. Для детализации условий кристаллизации минералов, особенно на заключительных низкотемпературных стадиях эволюции расплавов, использованы минеральные термобарометры. При этом, как было подчеркнуто в разделе «Методы исследования», результаты клинопироксеновых термобарометров тестировались данными, полученными при исследовании расплавных включений. В целом расчетное моделирование на основе данных по расплавным включениям (а также по составам пироксенов и амфиболов) позволило не только установить параметры минералообразующих процессов, но и рассмотреть особенности эволюции магматических систем при их подъеме и кристаллизации минералов в промежуточных камерах.

Расчеты по программе PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] на основе оригинальной информации по расплавным включениям (экспериментальные данные по температурам гомогенизации + составы гомогенизированных стекол прогретых, гомогенизированных и закаленных включений) дали возможность оценить давления при ликвидусной кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов в базальтах влк. Уксичан.

В результате было выяснено, что минералы рассмотренных базальтов кристаллизовались на четырех глубинных уровнях: около 60, 45—30, 27—18 и от 12 км до близповерхностных условий (рис. 14). Эти четыре промежуточные камеры вполне согласуются с сейсмическими данными о распределении зон накопления (резервуаров) магмы на глубине под другими вулканами Камчатки (рис. 15). Причем все установленные нами для Уксичана очаги (как относительно глубинные — около 60 км, так и близпо-

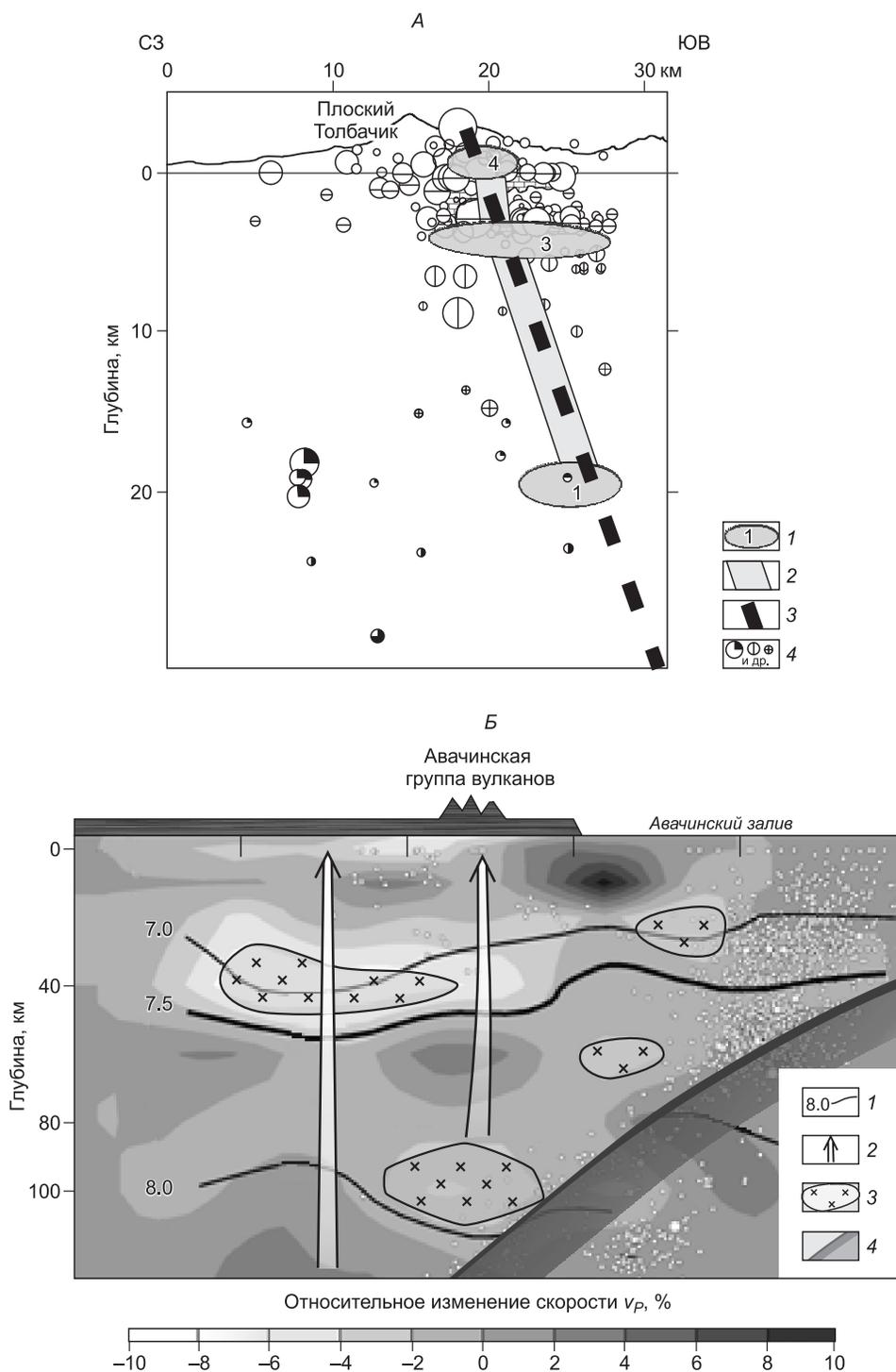
**Рис. 14.** Соотношение *PT*-параметров ликвидусной кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов из базальта влк. Уксичан (данные по прогретым расплавным включениям).

InPcP — параметры кристаллизации клинопироксенов, сингенетических плагиоклазов. Остальные усл. обозн. см. на рис. 12. Серыми полосами показаны уровни глубин расположения промежуточных магматических резервуаров под вулканами Толбачик и Авачинский, установленные по сейсмическим данным [Гонтовая и др., 2010; Добрецов и др., 2016, 2017б] (см. рис. 15). На глубине около 100 км обозначена предполагаемая область генерации исходных расплавов. Штриховыми линиями показаны пути эволюции расплавов через промежуточные магматические камеры под влк. Уксичан.



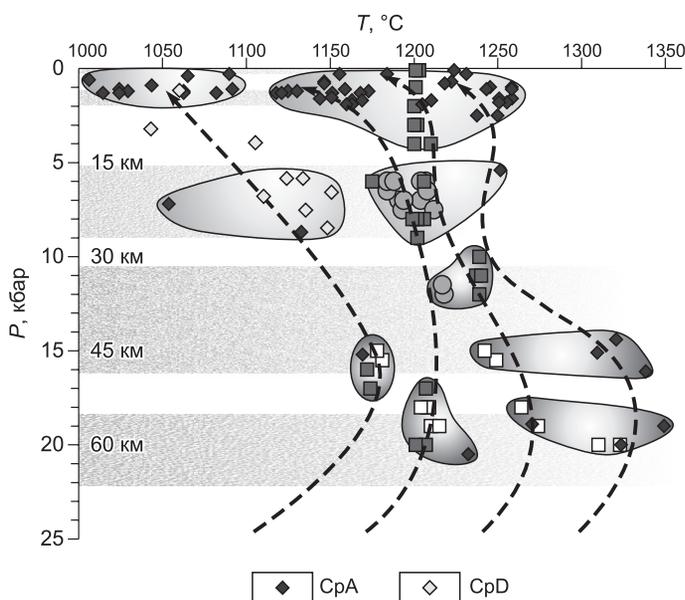
верхностные — менее 10 км) имеют свои аналоги (установленные сейсмикой) для вулканов Толбачик и Авачинский.

Расчеты на основе данных по расплавленным включениям показали также, что в случае наиболее глубоинной камеры влк. Уксичан устанавливаются максимальные температуры кристаллизации — до



**Рис. 15.** Расположение промежуточных магматических очагов под вулканами Толбачик и Авачинский, согласно сейсмическим данным [Гонтовая и др., 2010; Добрецов и др., 2016, 20176].

*А* — данные по влк. Толбачик: 1 — зоны накопления (резервуары) магмы; 2 — зоны подъема магмы; 3 — глубинный разлом; 4 — гипоцентры землетрясений различной глубины и интенсивности. *Б* — данные по Авачинскому вулкану: 1 — изолинии значений скорости  $v_p$  (км/с); 2 — пути миграции расплавов; 3 — промежуточные очаги; 4 — предполагаемое положение верхней границы погружающейся плиты.



**Рис. 16. Кристаллизация клинопироксенов и плагиоклазов из базальтов в промежуточных камерах влк. Уксичан (данные по расплавленным включениям и по минералам).**

СрА — данные, полученные авторами по клинопироксеновым барометрам (см. раздел «Методы исследования») с использованием оригинальных анализов и анализов из работы [Давыдова, 2014]; СрD — рассчитанные ранее параметры кристаллизации клинопироксенов из табл. 5.2 в работе [Давыдова, 2014]. Остальные усл. обозн. см. на рис. 12, 14.

характеристик расплавов при их подъеме к поверхности. Для наиболее высокотемпературных магм характерно нагревание до 1320 °С при подъеме к 60 км и далее последовательное понижение температуры с продвижением магмы вверх (1320—(1240—1215)—(1210—1175) °С) и резкий подъем (с глубин примерно 15 км) расплавов с устойчиво высокими параметрами — 1210—1200 °С. Для расплавов с более низкими температурами на глубине устанавливается другой путь движения — быстрый подъем с сохранением в основном глубинных температур (см. рис. 14).

Следует предположить, что исходные расплавы возникали вблизи верхней границы субдуцирующей плиты, т. е. около 100 км (см. рис. 15) [Добрецов и др., 2001, 2015] при температуре не более 1100—1200 °С. В интервале 100—60 км они нагревались с разной степенью интенсивности и затем остывали в ходе различных условий подъема в интервале 60—20 км и выше (см. рис. 14).

Данные по включениям свидетельствуют о характерных особенностях кристаллизации клинопироксенов и плагиоклазов в зависимости от глубины. Плагиоклазы образуются на всех четырех уровнях от 60 км до поверхности. Клинопироксены (судя по находящимся в них включениям) кристаллизуются в основном в камере на глубине 21—18 км, хотя, если учитывать расчеты, возможна их кристаллизация совместно с плагиоклазом и на более глубинных уровнях — 45—60 км (см. рис. 14).

Расчеты температур и давлений на основе составов клинопироксенов (см. раздел «Методы исследования») показали, что результаты не только хорошо согласуются с данными по расплавленным включениям, но и дополняют их. В частности, получил дополнительное обоснование относительно низкотемпературный путь эволюции расплавов при их подъеме, с убедительным подтверждением существования на глубине 27—18 км одной из основных промежуточных камер. Установлен также более широкий температурный диапазон кристаллизации клинопироксена в верхней близповерхностной камере (рис. 16).

В целом на основе данных по расплавленным включениям и клинопироксенам оказалось возможным выяснить *PT*-параметры эволюции эндогенных магм при их кристаллизации (с образованием клинопироксенов и плагиоклазов) по мере подъема через последовательную серию четырех промежуточных разноглубинных камер, начиная с глубин около 60 км и заканчивая фактически излиянием расплавов на поверхность (см. рис. 16). При этом необходимо отметить, что температуры кристаллизации в наиболее глубинных (60 км) условиях могли достигать 1320 °С и более. Эти характеристики хорошо согласуются с параметрами, приведенными в разделе «Обсуждение результатов».

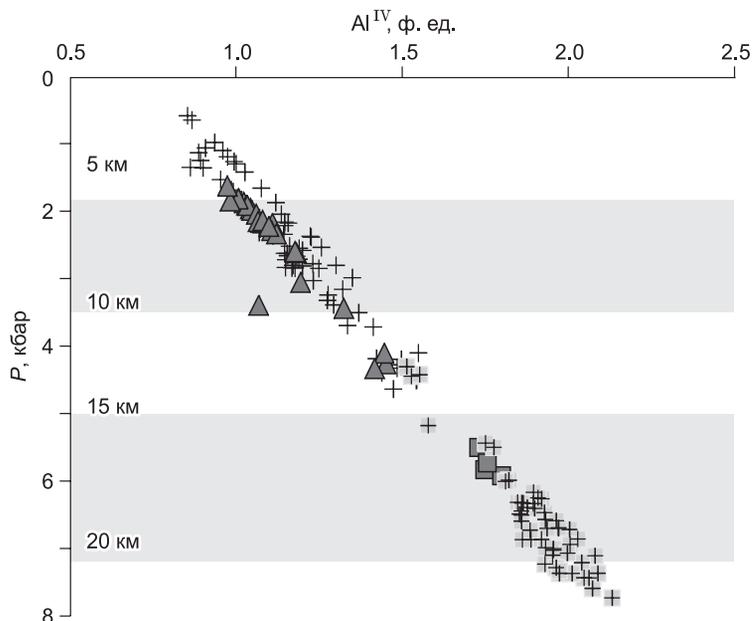
Как показали проведенные ранее исследования [Добрецов и др., 2016, 2017], важную и достоверную информацию о *PT*-параметрах в промежуточных камерах под вулканами Камчатки можно получить, используя амфиболовые термобарометры.

На основе данных по составам амфиболов с помощью набора минералогических барометров были рассчитаны давления образования латитов и дацитов влк. Уксичан, а также андезитов и дацитов Ичинского вулкана. При максимальных давлениях (5.5—7.5 кбар) кристаллизуются амфиболы андезитов (Ичинский) и латитов (Уксичан). Минимальные давления (1.0—3.4 кбар) минералообразующих процессов типичны для амфиболов из дацитов обоих вулканов. Между этими основными группами, совпадающими с данными и по другим вулканам Камчатки, располагается промежуточная (3.5—5.2 кбар), включающая амфиболы из дацитов и андезитов (рис. 17).

1320 °С (см. рис. 14). В то же время на глубинах 60—50 км возможны и более низкие температуры кристаллизации: 1215—1200 °С и около 1180 °С. Соответственно, устанавливаются различные пути эволюции *PT*-

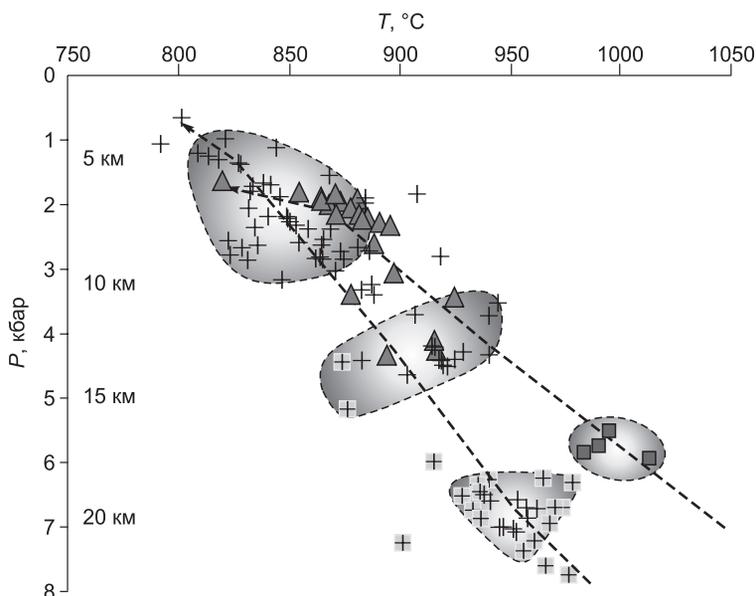
**Рис. 17. Соотношение параметров давления при кристаллизации амфиболов и содержания в них алюминия.**

Усл. обозн. см. на рис. 8. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием информации по составам минералов из работ [Давыдова, 2014; Добрецов и др., 2016]. Серым цветом отмечены интервалы давлений для амфиболов из эффузивов влк. Безымянный (Камчатка) [Turner et al., 2007].



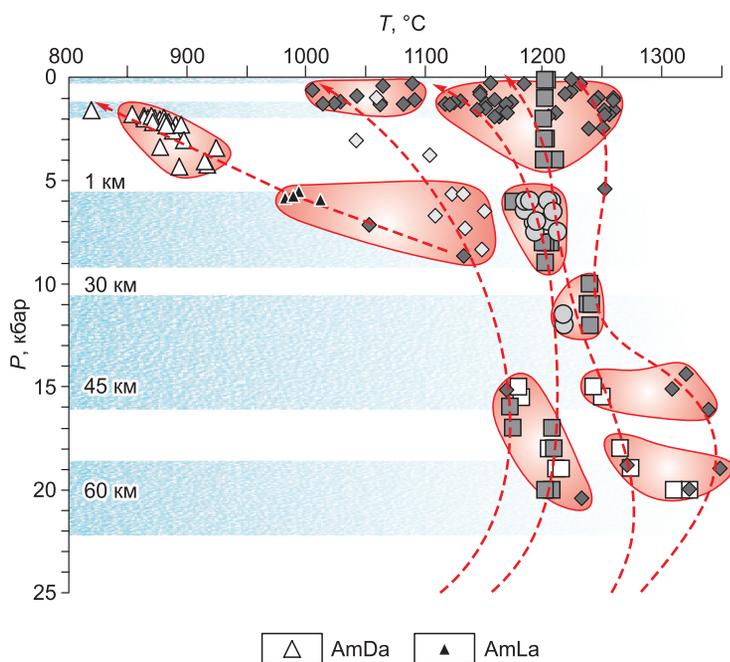
На основе представительных данных по составам амфиболов был проведен сравнительный анализ *PT*-параметров магматических систем вулканов Ичинский и Уксичан при подъеме магмы в верхние горизонты. На рис. 18 хорошо видно, что для обоих вулканов выделяются три основных уровня кристаллизации минералов. Образование амфиболов из андезитов Ичинского вулкана начиналось на глубинах 22.0—18.5 км при температурах 980—930 °С. На близких глубинах 18—16 км (но при заметно более высоких температурах — 1010—985 °С) кристаллизовались амфиболы из латитов влк. Уксичан. При подъеме на более высокий уровень (15.5—11.0 км) и при снижении температуры от 945 до 880 °С совместно кристаллизуются амфиболы из андезитов и дацитов обоих вулканов. На заключительной стадии (при снижении температур в диапазоне 900—810 °С и в ходе подъема расплавов с 10 до 3 км) кристаллизовались исключительно амфиболы из дацитов обоих вулканов. Таким образом, для вулканов Ичинский и Уксичан устанавливаются общие закономерности эволюции магматических систем среднего и кислого составов на их завершающей низкотемпературной стадии развития с формированием для обоих вулканов трех уровней кристаллизации в промежуточных камерах (см. рис. 18).

Сравнение результатов изучения расплавных включений и составов минералов (клинопироксены и амфиболы) позволило наиболее полно рассмотреть особенности магматических систем вулкана Уксичан. На рис. 19 отчетливо видны тренды изменения *PT*-параметров расплавов при их подъеме (с глубин примерно 60 км) и прохождении через несколько промежуточных камер, согласующихся в целом с сейсмическими данными по магматическим очагам под эталонными вулканами Камчатки. Тренды с максимальными температурами (судя по результатам исследования расплавных включений и составов минералов — до 1350—1320 °С на глубине около 60 км и до 1250—1180 °С в приповерхностных условиях) прослеживаются данными по расплавным включениям и пироксенам. Тренд с более низкими температурами (1230—1200 °С на глубине около 60 км и до 1120 °С в приповерхностных условиях) трассируется до глубины 18 км в основном расплавными включениями, а начиная с 4 км — данными по клинопироксенам.



**Рис. 18. Кристаллизация амфиболов из эффузивов в промежуточных камерах вулканов Ичинский и Уксичан.**

Усл. обозн. см. на рис. 8. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием информации по составам минералов из работ [Давыдова, 2014; Добрецов и др., 2016]. Штриховыми линиями показаны пути эволюции расплавов через промежуточные магматические камеры (в которых кристаллизовались амфиболы) под вулканами Уксичан и Ичинский.



**Рис. 19. Кристаллизация минералов из эффузивов в промежуточных камерах влк. Уксичан.**

AmDa, AmLa — данные, полученные по амфиболом из дацитов (AmDa) и латитов (AmLa). Остальные усл. обозн. см. на рис. 12, 14, 16. Полосами серого цвета показаны уровни глубин расположения промежуточных магматических камер (резервуаров, очагов) под вулканами Толбачик и Авачинский, установленные по сейсмическим данным [Гонтовая и др., 2010; Добрецов и др., 2016, 20176] (см. рис. 15). Штриховыми линиями показаны пути эволюции расплавов через промежуточные магматические камеры под влк. Уксичан.

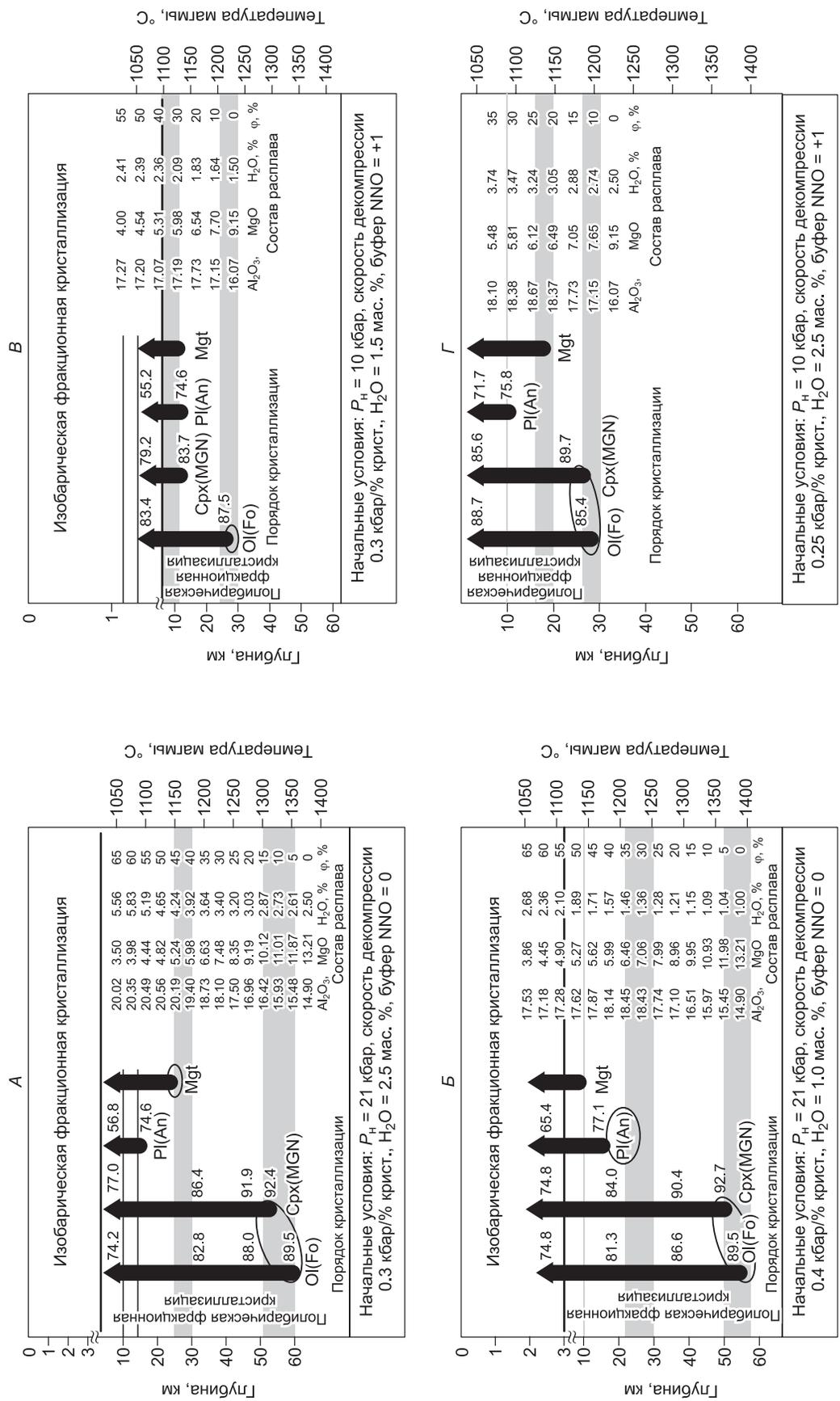
зуются клинопироксены, а при повышенных водных давлениях (6—2 кбар) на глубинах 18—6 км и при температурах 1050—820 °C формируются амфиболы (см. рис. 19).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование магматических систем влк. Уксичан, проведенное ранее М.Ю. Давыдовой [2014], основано на алгоритмах КОМАГМАТ, опубликованных в работах [Ariskin et al., 1993; Арискин, Бармина, 2000; Kimura, Ariskin, 2014], с использованием термометров и барометров для вулканических пород из работы [Putirka, 2008], максимально учитывающих магнезиальность оливина и частично клинопироксена, установленную для центральных частей фенокристаллов оливина и клинопироксена. Составы шпинели, ортопироксена, амфибола, краевые зоны и микрокристаллы оливина и клинопироксена не учитывались. Мы постараемся в дальнейшем использовать данные по этим минералам.

Плиоценовые лавы влк. Уксичан, по данным М.Ю. Давыдовой [2014], характеризуются максимальными рассчитанными давлениями и температурами в соответствии с методикой [Putirka, 2008]: в умеренно глиноземистых лавах по оливину — 10.2—7.6 кбар, 1152—1123 °C и клинопироксену — 8.4—5.7 кбар, 1148—1134 °C; для высокоглиноземистых вулканитов по оливину — 9.8—8.1 кбар, 1116—1074 °C и клинопироксену — 11—3.1 кбар, 1043—1060 °C. Для базальтов ареальных конусов по оливину получены 12 кбар, 1265 °C. Как видно из сравнения, на рис. 20 давления 10—12 кбар и температуры 1150—1200 °C соответствуют камерам в основании коры на глубине 25—30 км. Путем перебора расчетных кривых эволюции состава минералов и пород, для плиоценовых пород начальные условия приняты более глубинные — около 21 кбар, 1300—1400 °C, что соответствует, по нашим представлениям, реальным камерам на глубине 50—60 км, где максимально горячая перидотитовая мантия реагирует с поднимающимися андезитовыми расплавами и/или флюидами, равновесными с андезитовыми расплавами [Добрецов и др., 2015, 2016].

В целом полученные ранее параметры [Давыдова, 2014] магматических систем влк. Уксичан вполне согласуются с нашими данными. В частности, проведенные нами расчеты на основе оригинальных данных по расплавленным включениям свидетельствуют о том, что на наиболее глубоких уровнях (60—50 км) возможны высокие температуры кристаллизации минералов (1320 °C и более) эффузивов влк. Уксичан. С продвижением магмы вверх характерно последовательное понижение температуры: 1320 → 1240 → 1200 °C. Тренды с максимальными температурами (до 1350—1320 °C на глубине около 60 км и до 1250—1180 °C в приповерхностных условиях) прослеживаются данными по расплавленным включениям и по пироксенам. Более того, при нанесении данных по параметрам кристаллизации клинопироксенов вулканического центра Уксичан из табл. 5.2 [Давыдова, 2014] на рис. 16 и 19 выяснилось, что характеристики (PT), рассчитанные М.Ю. Давыдовой, располагаясь на установленных нами трендах эволюции расплавов при их подъеме в верхние горизонты, идеально совпадают по глубине (27—18 км) с одной из основных промежуточных камер (см. рис. 16, 19).



**Рис. 20. Результаты расчетов *P-T*-параметров магматических систем влк. Уксичан.**

Рисунок составлен на основе информации из работы [Давыдова, 2014]. *А* — высокоглиноземистые породы,  $N_2$ ; *Б* — умеренно глиноземистые породы,  $N_2$ ; *В* — поздние щитовые вулканические постройки,  $Q_3$ ; *Г* — аресальные конусы,  $Q_4$ .

Разное содержание  $H_2O$  в получаемом (начальном, по М.Ю. Давыдовой [2014]) расплаве (2.5  $H_2O$  в расплаве высокоглиноземистых пород и 1 %  $H_2O$  в расплаве умеренно глиноземистом, см. рис. 20) может соответствовать разным соотношениям реагирующих сред (субдукционный расплав—субдукционный флюид—матрица перидотитов) с высокой долей расплава и флюида в получаемых высокоглиноземистых расплавах и более низкой (т. е. заметное преобладание перидотитовой матрицы) в умеренно глиноземистых лавах.

Равновесные оливины в таких расплавах должны иметь магнезиальность 87—88 %, клинопироксены 92—93 %, но такие оливины и клинопироксены в исследованных М.Ю. Давыдовой [2014] образцах не обнаружены. Наиболее магнезиальные проанализированные оливины в вулканитах Уксичана в центральных частях фенокристаллов имеют содержание форстерита 78—82 %, что соответствует в модельных системах на рис. 20 равновесию на глубине 25—30 км (т.е. в промежуточных камерах в основании коры).

При этом магнезиальные оливины фенокристаллов (см. рис. 7) имеют низкие примеси CaO (0.2—0.35 мас. %) и MnO (0.3—0.5 мас. %), которые возрастают при падении значений форстеритового компонента ниже 70 %, где CaO в фенокристаллах и каймах возрастает до 0.4 мас. %, MnO до 1 мас. %, а в некоторых микрокристаллах и каймах CaO возрастает до 0.9 мас.%, что возможно в равновесии с Са-плагиоклазом при быстрой закалке.

Проанализированные Srх и Орх в вулканитах Уксичана варьируют в широких пределах по магнезиальности, содержанию CaO (Wo),  $TiO_2$  и  $Al_2O_3$ . В целом точки составов пироксенов располагаются между высокотемпературной (1200 °С) и более низкотемпературной (1100 °С) изотермами (см. рис. 5), причем с падением магнезиальности содержание Са в Орх растет, в Srх падает (см. рис. 6).

Составы базальтов и андезитобазальтов для щитовых вулканов  $Q_3$  и пород ареальных конусов  $Q_4$  образуют единый эволюционный тренд, поэтому на рис. 20, В и Г представлены сходные результаты, но для щитовых вулканов (В) преобладает изобарическая кристаллизационная дифференциация в камере на глубине 10—15 км при  $P$  около 5 кбар, с компрессионной кристаллизацией от 10 до 5 кбар, а для ареальных конусов — декомпрессионная кристаллизация от 10—19 кбар (30 км) до поверхности при исходном содержании  $H_2O$  2.5 мас. % и минимальной скорости декомпрессии 0.25 кбар на 1% кристаллизации. Конечные результаты близки с последовательной или одновременной кристаллизацией Srх, Mgt, Pl.

В этих базальтах, таким образом, не сохранилась глубинная стадия кристаллизации на 50—60 км, но она также должна присутствовать, так как иначе, чем реакцией субдукционных флюидов/расплавов с горячей надсубдукционной мантией большие однородные массы базальтов в зоне субдукции получить нельзя. Возможно, причина в том, что эти базальты на глубине 50 км были более высокотемпературными — около 1400—1450 °С, тогда как для глиноземистых базальтов стратовулкана Уксичан эта температура на той же глубине была 1350 °С. Это связано с тем, что зона субдукции и распределение температуры в надсубдукционной зоне в голоцене изменились.

Как было показано в разделе про петрохимические особенности пород, для вулкана Уксичан характерно аномальное по сравнению с Ичинским и другими вулканами накопление калия в эффузивах.

Проблемы происхождения высококальциевых базальтов в зонах субдукции обсуждались неоднократно [Nikogosian et al., 2010; Lee et al., 2014; Portnyagin et al., 2015; Simakin et al., 2015; Добрецов и др., 2017а; Толбачинское ..., 2017].

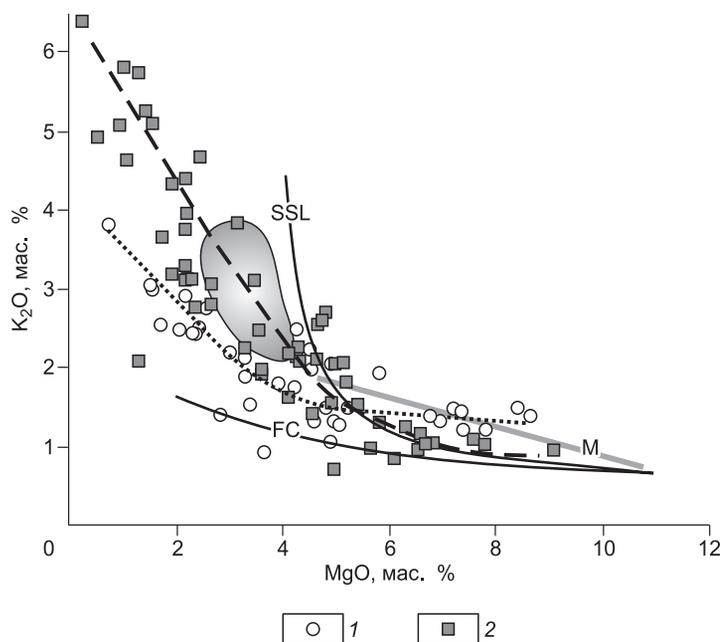
Широко известна шошонит-латитовая серия в задуговой части Южно-Американских Кордильер. В Италии зона субдукционных калиевых базальтов совпадает с зоной высокого  $CO_2$  в вулканических газах [Frezzotti et al., 2009]. На Камчатке высококальциевые базальты обсуждаются в составе Ключевской группы вулканов, в частности, в составе толбачинских извержений [Portnyagin et al., 2015; Добрецов и др., 2017а].

В извержениях влк. Толбачик высококальциевые базальты появляются только в серии высокоглиноземистых базальтов (НАВ), содержащих 4—6 мас. % MgO, где количество  $K_2O$  составляет 1.7—2.5 мас. %. Высоко-Mg базальты (НМВ), содержащие MgO >10 мас. %, не имеют высоких содержаний  $K_2O$  и являются по некоторым оценкам более глубинными, а серия НАВ представляет собой продукт кристаллизационной дифференциации магнезиальных базальтов [Луканин и др., 1980]. Для высококальциевых пород влк. Уксичан это маловероятно, так как на диаграммах  $K_2O—SiO_2$  (см. рис. 4) и  $K_2O—MgO$  (рис. 21) подобные серии показывают независимые тренды, так же как и в случае вулкана Толбачик [Portnyagin et al., 2015; Добрецов и др., 2017а, см. рис. 8, 10].

Для вулкана Толбачик в расплавных включениях из ранней генерации ксенокристов оливина с магнезиальностью 88 % обнаружен Са-Ti-Mg гранат (меланит) с содержанием пирропа 30 %, калиевый карбонат, стекло, газ [Simakin et al., 2015]. Давление по гранату соответствует 20—25 кбар, т.е. глубина 60—75 км — как раз условия глубинных камер с максимальной температурой из зоны взаимодействия водных андезитовых расплавов (или флюидов) с перидотитами мантии.

**Рис. 21. Особенности кристаллизации расплавов в магматических системах вулканов Ичинский (1) и Уксичан (2).**

Составы эффузивных пород вулканов Ичинский (пунктирный тренд) и Уксичан (штриховой тренд). Линии: FC — одноступенчатая фракционная кристаллизация, SSL — равновесная кристаллизация расплавов REFC (Recharge-Evacuation-Fractional Crystallization), M — смешение высокомагнезиальных и высокоглиноземистых расплавов (HMB+HAB mixing). Серым цветом показано поле расплавов REFC. Рисунок составлен с использованием информации из работ [Portnyagin et al., 2015; Добрецов и др., 2017a].



Стекло в рассмотренных включениях в раннем оливине соответствует калиевым андезибазальтам ( $\text{SiO}_2 = 55\text{—}58$ ,  $\text{MgO} = 1.4\text{—}3.5$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 2.5\text{—}6$  мас. %), как в плагиоклазе и клинопироксене ( $\text{SiO}_2 = 58$ ,  $\text{MgO} = 2.9$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 3.15$  мас. %), но в клинопироксенах присутствуют стекла состава трахиандезитов ( $\text{SiO}_2 = 60\text{—}64$ ,  $\text{MgO} = 0.6\text{—}1.2$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 3.0\text{—}4.5$  мас. %). По этим данным можно реставрировать реакцию трахиандезита с перидотитом (ранние Ol + Crx) с образованием K-HMB и андезибазальтов и восстановлением флюида до  $\text{CH}_4$ , CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{F}_2$  [Simakin et al., 2015], а затем реакции смешения и кристаллизационной дифференциации в малоглубинных камерах.

На рисунке 21 показана модель, сочетающая смешение высокомагнезиальных и высокоглиноземистых расплавов (HMB+HAB mixing) и кристаллизацию по схеме REFC (Recharge-Evacuation-Fractional Crystallization) в соответствии с работой [Lee et al., 2014], так называемая «открытая магматическая система», с многочисленными магматическими камерами, поступлениями и смешениями новых порций магм и неоднократной кристаллизационной дифференциацией [Portnyagin et al., 2015]. Хорошо видно, что тренд составов эффузивных пород влк. Уксичан при снижении MgO от 9 до 4.5 мас. % практически совпадает с линией SSL — равновесной кристаллизации расплавов REFC. В диапазоне MgO от 4.5 до 2.6 мас. % и  $\text{K}_2\text{O}$  от 2 до 3.6 мас. % он пересекает поле расплавов REFC. В целом эти данные убедительно свидетельствуют об открытости магматических систем влк. Уксичан и преобладании в них процессов собственно фракционирования. В то же время тренд эффузивных пород влк. Ичинский при снижении MgO от 8.5 до 5.0 мас. % фактически совпадает с линией смешения высокомагнезиальных и высокоглиноземистых расплавов (HMB + HAB mixing) и в дальнейшем (MgO до 2 мас. %) он проходит ниже данных по расплавам REFC, что говорит о специфике и отличии этих магматических систем от магматизма влк. Уксичан.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате изучения собранных на вулканах Уксичан и Ичинский материалов и с учетом имеющихся опубликованных данных получена новая информация о магматизме вулканов Уксичан и Ичинский в юго-западной части вулканического пояса Срединного хребта Камчатки.

2. Экспериментальные исследования расплавных включений свидетельствуют о близких температурах кристаллизации минералов, составляющих плиоценовые базальтовые породы влк. Уксичан: плагиоклаз —  $1240\text{—}1175$  °C, ортопироксен —  $1225\text{—}1180$  °C, клинопироксен —  $1215\text{—}1190$  °C.

3. Расчетное моделирование на основе данных по составам гомогенизированных включений показало, что минералы рассмотренных базальтов влк. Уксичан кристаллизовались на четырех глубинных уровнях: около 60, 45—30, 27—18 и от 12 км до близповерхностных условий. При этом впервые обосновано наличие глубинных магматических камер. Эти четыре промежуточные магматические камеры согласуются с сейсмическими данными о распределении зон накопления (резервуаров) магмы на глубине под другими вулканами Камчатки.

4. Расчеты на основе данных по включениям свидетельствуют о том, что на наиболее глубоких уровнях 60—50 км возможны разные температуры кристаллизации минералов (до  $1320$ ,  $1215\text{—}1200$  °C и около  $1180$  °C), связанные с различным температурным режимом мантии на этой глубине, и, соответственно, устанавливаются различные пути эволюции *PT*-характеристик расплавов при их подъеме к

поверхности. Для наиболее высокотемпературных магм, нагретых до 1320—1350 °С, на глубине около 60 км характерно в целом последовательное понижение температуры с продвижением магмы вверх (1320 → 1240 → 1200 °С). Для расплавов с более низкими исходными температурами устанавливается другой путь — быстрый подъем с сохранением глубинных или промежуточных температур. Последние выводы хорошо согласуются с тем, что при медленном движении вверх низкотемпературные глубинные магмы в большинстве случаев кристаллизуются и застывают, не достигая поверхности.

5. Сравнение результатов исследования расплавных включений, а также данных по клинопироксенам и амфиболам позволили установить в целом несколько трендов геодинамической эволюции магматических систем влк. Уксичан при подъеме расплавов и их прохождении через ряд промежуточных камер. Тренды с максимальными температурами (до 1350—1320 °С на глубине около 60 км и до 1250—1180 °С в приповерхностных условиях) прослеживаются данными по расплавным включениям и по пироксенам. Тренд с более низкими температурами (1230—1200 °С на глубине около 60 км и до 1120 °С в приповерхностных условиях) трассируется до глубины 18 км в основном расплавными включениями, а начиная с 4 км — данными по клинопироксенам. Наиболее низкотемпературный тренд (1180 °С около 50 км) на глубинах около 25 км распадается на два направления: при 1100—1000 °С (в приповерхностных условиях) кристаллизуются клинопироксены, а при повышенных давлениях (6—2 кбар) на глубинах 18—6 км и температурах 1050—820 °С образуются амфиболы.

6. На основе представительных данных по составам амфиболов для вулканов Уксичан и Ичинский устанавливаются общие закономерности эволюции магматических систем среднего и кислого составов с формированием для обоих вулканов трех уровней кристаллизации в промежуточных камерах. На глубинах 22.0—18.5 км (18—16 км) и при температурах 980—930 °С (1010—985 °С) кристаллизовались амфиболы соответственно андезитов Ичинского и латитов Уксичанского вулканов. При подъеме на более высокий уровень (15.5—11.0 км) и при снижении температуры от 945 до 880 °С совместно кристаллизуются амфиболы из андезитов и дацитов обоих вулканов. На заключительной стадии (при снижении температур в диапазоне 900—810 °С и в ходе подъема расплавов с 10 до 3 км) кристаллизовались исключительно амфиболы из дацитов обоих вулканов. Вероятно, это связано с разными механизмами подъема расплавов различного состава, что заслуживает дальнейших исследований.

Авторы работы выражают свою благодарность д.г.-м.н. А.Б. Перепелову (ИГХ СО РАН) и д.г.-м.н. А.Э. Изоху (ИГМ СО РАН) за многочисленные конструктивные замечания, которые помогли улучшить качество статьи.

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

## ЛИТЕРАТУРА

**Антипин В.С., Волынец О.Н., Перепелов А.Б., Патока М.Г., Успенский В.Н.** Геологические соотношения и геохимическая эволюция плиоцен-четвертичного известково-щелочного и субщелочного магматизма кальдеры Уксичан (Камчатка) // Геохимия магматических пород современных и древних активных зон. Новосибирск, Наука, 1987, с. 72—81.

**Арискин А.А., Бармина Г.С.** Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М., МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000, 363 с.

**Годовиков А.А.** Минералогия. М., Недра, 1975, 520 с.

**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.

**Давыдова М.Ю.** Происхождение и эволюция магм вулканического центра Уксичан (Срединный хребет Камчатки): Автореф. дис... к.г.-м.н. Владивосток, ТИГ ДВО РАН, 2014, 19 с.

**Действующие вулканы Камчатки.** Т. 1 / Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991, 302 с.

**Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.** Глубинная геодинамика. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 409 с.

**Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П.** Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (4), с. 469—499.

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

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

**Добрецов Н.Л., Гордеев Е.И., Кулаков И.Ю., Симонов В.А.** Зоны плавления в субдуцирующей плите и промежуточные камеры // Толбачинское трещинное извержение 2012—2013 гг. (ТТИ-50) / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2017а, с. 353—366.

**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, 2017б, т. 58 (5), с. 701—722.

**Золотухин В.В., Симонов В.А., Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Васильев Ю.Р.** Сравнительный анализ составов континентальных и океанических платобазальтов (данные по Сибирской платформе и плато Онтонг Джава) // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (12), с. 1335—1344.

**Жожемяка Н.Н.** Долгоживущие вулканические центры Камчатки: типы построек, длительность формирования, объем вулканитов, продуктивность, баланс вещества, тектоническое положение // Вулканология и сейсмология, 1995, № 6, с. 3—19.

**Жожемяка Н.Н.** Четвертичные полигенные вулканы Камчатки: масштабы вулканизма, баланс вещества, динамика интенсивности и продуктивности в отдельных типах построек, вулканических зонах и по региону в целом // Вулканология и сейсмология, 2001, № 5, с. 3—21.

**Костицын Ю., Аносова М.** U-Pb возраст экструзивных пород кальдеры Уксичан в Срединном хребте Камчатки // Геохимия, 2013, т. 51, № 2, с. 171—179.

**Кутыев Ф.Ш.** Об эволюции базальтоидов Камчатки // Вопросы магматизма и тектоники Дальнего Востока. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1975, с. 101—119.

**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.

**Лавренчук А.В.** Программа для расчета внутрикамерной дифференциации основной магмы «PLUTON» // Тезисы докладов Второй Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск, Редакционно-издательский центр Новосиб. ун-та, 2004, с. 105—106.

**Луканин О.А., Кадик А.А., Биггар Г.М., Федотов С.А.** Физико-химические условия кристаллизации базальтов Большого трещинного Толбачинского извержения 1975—1976 гг. // Вулканология и сейсмология, 1980, № 3, с. 16—50.

**Магматические горные породы** / Ред. О.А. Богатиков. Т. 1. М., Наука, 1983, 766 с.

**Магматические горные породы** / Ред. О.А. Богатиков. Т. 6. Эволюция магматизма в истории Земли. М., Наука, 1987, 438 с.

**Мелекесцев И.В., Брайцева О.В., Пономарева В.В.** Новый подход к определению понятия действующий вулкан // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский, ИВиГ ДВО РАН, 2001, с. 191—203.

**Огородов Н.В., Жожемяка Н.Н., Важеевская А.А., Огородова А.С.** Вулканы и четвертичный вулканизм Срединного хребта Камчатки. М., Наука, 1972, 191 с.

**Певзнер М.М.** Первые геологические данные о хронологии голоценовой эруптивной активности вулкана Ичинского (Срединный хребет, Камчатка) // ДАН, 2004, т. 395, № 4, с. 507—510.

**Перепелов А.Б.** Неоген-четвертичный шошонит-латитовый магматизм Срединного хребта Камчатки: вулкан Теклетнуп (геологическая эволюция, петрография, минералогия) // Вулканология и сейсмология, 2004, № 3, с. 12—30.

**Перепелов А.Б.** Неоген-четвертичный шошонит-латитовый магматизм Срединного хребта Камчатки: вулкан Теклетнуп (геохимия, петрология, геодинамическая позиция) // Вулканология и сейсмология, 2005, № 1, с. 22—36.

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

**Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Иванов А.В., Философов Т.М.** Базаниты горы Хухч — первые минералого-геохимические данные по внутриплитному щелочному магматизму Западной Камчатки // ДАН, 2006, т. 408, № 6, с. 795—799.

**Перепелов А.Б., Щербаков Ю.Д., Чащин А.А., Пузанков М.Ю., Карманов Н.С., Цыпукова С.С.** Магнезиальные андезиты Камчатки — геохимические типы и условия происхождения // Материалы Третьей Всероссийской конференции с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит». Владивосток, Изд-во Дальнаука, 2016, с. 200—204.

**Перчук Л.Л.** Пироксеновый барометр и пироксеновые геотермы // Докл. АН СССР, 1980, т. 233, № 6, с. 1196—2000.

- Петрографический кодекс** России / Под ред. О.А. Богатикова, А.Ф. Морозова, О.В. Петрова. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2009, 199 с.
- Симонов В.А.** Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.
- Симонов В.А., Котляров А.В.** Условия кристаллизации магм в промежуточных камерах под вулканами Толбачинский и Ичинский (Камчатка): данные по расплавленным включениям // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии. Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2016, с. 143—146.
- Симонов В.А., Сафонова И.Ю., Ковязин С.В., Котляров А.В.** Физико-химические параметры неопротерозойского и раннекембрийского плюмового магматизма Палеоазиатского океана (данные по расплавленным включениям) // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (5), с. 648—664.
- Симонов В.А., Котляров А.В., Ступаков С.И.** Условия формирования палеоокеанических базальтовых комплексов Кузнецкого Алатау // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2016, с. 176—178.
- Соболев А.В., Слуцкий А.Б.** Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология и геофизика, 1984 (12), с. 97—110.
- Стефанов Ю.М., Широкий Б.И.** Металлогения верхнего структурного этажа Камчатки. М., Наука, 1980, 104 с.
- Толбачинское** трещинное извержение 2012—2013 гг. (ТТИ-50) / Под ред. Е.И. Гордеева, Н.Л. Добрецова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2017, 421 с.
- Ariskin A.A., Frenkel M.Ya., Barmina G.S., Nielsen R.L.** COMAGMAT: a Fortran program to model magma differentiation processes // Comput. Geosci., 1993, v. 19, № 8, p. 1155—1170.
- Bindeman I.N., Ponomareva V.V., Balley J.C., Valley J.W.** Volcanic arc of Kamchatka: a province with high- $\delta^{18}\text{O}$  magma sources and large-scale  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  depletion of the upper crust // Geochim. Cosmochim. Acta, 2004, v. 68, № 4, p. 841—865.
- Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Perepelov A.B., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., Chen C.H.** Large-volume silicic volcanism in Kamchatka, Ar-Ar and U-Pb ages, isotopic and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2010, v. 189, № 1—2, p. 57—80.
- Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.** Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // Geochem. Geophys. Geosyst., 2011, v. 12, № 7, Q07021.
- Frezzotti M.L., Peccerillo A., Panza G.** Carbonate metasomatism and  $\text{CO}_2$  lithosphere–asthenosphere degassing beneath the Western Mediterranean: An integrated model arising from petrological and geophysical data // Chem. Geol., 2009, v. 262, № 1—2, p. 108—120.
- Johnson M.C., Rutherford M.J.** Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // Geology, 1989, v. 17, № 9, p. 837—841.
- Kimura J.I., Ariskin A.A.** Calculation of water-bearing primary basalt and estimation of source mantle conditions beneath arcs: PRIMACALC2 model for WINDOWS // Geochem. Geophys. Geosyst., 2014, v. 15, p. 1494—1514.
- Lee C.A., Lee T.C., Wu C.T.** Modeling the compositional evolution of recharging, evacuating and fractionating (REFC) magma chambers: implication for differentiation of arc magmas // Geochim. Cosmochim. Acta, 2014, v. 143, p. 8—22.
- Mercier J.C.C.** Single-pyroxene thermobarometry // Tectonophysics, 1980, v. 70, p. 1—37.
- Nikogosian I.K., Manfred J., van Bergen M.J.** Heterogeneous mantle source of potassium-rich magmas in central-southern Italy: Melt inclusion evidence from Roccamonfina and Ernici (Mid Latina Valley) // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2010, v. 197, № 1—4, p. 279—302.
- Nimis P., Taylor W.R.** Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer // Contr. Miner. Petrol., 2000, v. 139, № 5, p. 541—554.
- Portnyagin M., Duggen S., Hauff F., Mironov N., Bindeman I., Thirlwall M., Hoernle K.** Geochemistry of the late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: Quantitative modeling of subduction-related open magmatic systems // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2015, v. 307, p. 133—155.
- Putirka K.D.** Thermometers and barometers for volcanic systems // Rev. Miner. Geochem., 2008, v. 69, № 1, p. 61—120.
- Putirka K., Johnson M., Kinzler R., Longhi J., Walker D.** Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene–liquid equilibria, 0–30 kbar // Contr. Miner. Petrol., 1996, v. 123, № 1, p. 92—108.

**Ridolfi F., Renzulli A.** Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1130°C and 2.2 GPa // *Contr. Miner. Petrol.*, 2012, v. 163, № 5, p. 877—895.

**Schmidt M.W.** Amphibole composition as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer // *Contr. Miner. Petrol.*, 1992, v. 110, № 2—3, p. 304—310.

**Simakin A., Salova T., Devyatova V., Zelensky M.** Reduced carbonic fluid and possible nature of high-K magmas of Tolbachik // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2015, v. 307, p. 210—221.

**Sobolev A.V., Danyushevsky L.V.** Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas // *J. Petrol.*, 1994, v. 35, № 5, p. 1183—1211.

**Turner S.P., Sims K.W.W., Reagan M.K., Cook C.** A  $^{210}\text{Pb}$ – $^{226}\text{Ra}$ – $^{230}\text{Th}$ – $^{238}\text{U}$  study of Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes, Kamchatka // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, v. 71, p. 4771—4785.

**Yavuz F.** WinAmphcal: A Windows program for the IMA-04 amphibole classification // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2007, v. 8, № 1, Q01004.

*Рекомендована к печати 21 марта 2019 г.  
А.Э. Изухом*

*Поступила в редакцию 14 сентября 2018 г.,  
после доработки — 13 декабря 2018 г.*