

ТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК 548.4:552.11:550.34

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВОВ
В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ НАДСУБДУКЦИОННЫХ КАМЕРАХ
(на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка)**

Н.Л. Добрецов^{1,3}, В.А. Симонов^{2,3}, А.В. Котляров², Р.Ю. Кулаков³, Н.С. Карманов²

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

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

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

В результате исследования плагиоклазов, амфиболов и расплавных включений установлены физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах вулканов, представляющих различные типы субдукционного магматизма Камчатки: молодые базальтовые системы влк. Толбачинский (Ключевская группа) и древний влк. Ичинский (Срединный хребет) с чередованием базальтовых и кислых извержений. В случае влк. Толбачинский было выяснено, что кристаллы-лапиллы плагиоклаза образовывались из базальтовых расплавов при температурах 1075—1115 °С и в условиях низких (до 1 кбар) давлений на глубине 2—3 км. Кристаллизация минералов андезитов происходила при более широких параметрах (1220—1020 °С и 3.3—1.6 кбар) в промежуточной камере на глубинах до 10 км. Источником расплавов послужили очаги базальтовой магмы (хорошо фиксируемые геофизическими методами на глубинах 18—20 км) с минимальными температурами около 1290 °С. Для Ичинского вулкана устанавливаются три уровня промежуточных камер. На глубинах до 23 км и температурах до 1225 °С происходило формирование андезитов. В промежуточной камере (14 км) при 1135—1045 °С в результате дифференциации андезитовых магм образовывались дацитовые расплавы. На самых верхних горизонтах (9—3 км) при температурах 1130—1030 °С формировались дациты. Выясняется общее сходство процессов дифференциации в промежуточных камерах вулканов Камчатки. В то же время для каждого вулкана характерны свои специфические особенности магматизма. Происхождение и дифференциация лав базальтовых (Толбачинский) вулканов отличается от вулканов со значительной ролью андезитов (Ичинский).

Физико-химические параметры кристаллизации, промежуточные надсубдукционные камеры, расплавные включения, минералы базальтов и андезитов, вулканы Камчатки.

**PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF CRYSTALLIZATION OF MELTS
IN INTERMEDIATE SUPRASUBDUCTION CHAMBERS**

(by the example of Tolbachik and Ichinskii Volcanoes, Kamchatka Peninsula)

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

In study of plagioclases, amphiboles, and melt inclusions, we have determined the physicochemical parameters of crystallization of melts in the intermediate suprasubduction chambers of volcanoes representing different types of subduction magmatism on the Kamchatka Peninsula: the young basaltic systems of Tolbachik Volcano (Klyuchevskaya group) and ancient Ichinskii Volcano (Sredinnyi Range) with alternating basaltic and felsic eruptions. For Tolbachik Volcano, we have found that plagioclase lapilli formed from basaltic melts at 1075—1115 °C and low (≤ 1 kbar) pressures at depths of 2—3 km. Andesite minerals crystallized within a wider range of temperatures and pressures (1220—1020 °C and 3.3—1.6 kbar) in an intermediate chamber at depths of ≤ 10 km. The melts were generated in basaltic magma chambers (detected well by geophysical methods at depths of 18—20 km) with minimum temperatures of ~ 1290 °C. For Ichinskii Volcano, three levels of intermediate chambers are distinguished. Andesites formed at depths of ≤ 23 km at ≤ 1225 °C. Dacitic melts were generated from an intermediate chamber (14 km) at 1135—1045 °C as a result of differentiation of andesitic magmas. Dacites formed in the uppermost horizons (9—3 km) at 1130—1030 °C. Despite the similarity between differentiation processes in the inter-

mediate chambers of the Kamchatka volcanoes, each volcano is characterized by specific magmatism. The lavas of basaltic volcanoes (Tolbachik) and those of andesitic volcanoes (Ichinskii) differ in genesis and differentiation.

Physicochemical parameters of crystallization, intermediate suprasubduction chambers, melt inclusions, basalt and andesite minerals, Kamchatka volcanoes

ВВЕДЕНИЕ

Проблема субдукционного магматизма является одной из наиболее сложных в геодинамике и требует комплексного анализа геолого-геофизических (в том числе сейсмотомографических), геохимических и экспериментально-петрологических данных (включая термобарогеохимию по расплавленным включениям в минералах). Сложность построения моделей субдукционного магматизма определяется возможностью независимой миграции расплавов и флюидов, а также двух уровней магмообразования (в зонах субдукции на глубинах 100—130 км и в надсубдукционной мантии на глубинах 50—80 км [Добрецов и др., 2015]) и трех уровней промежуточных камер (около 25—30 км вблизи нижней границы коры и малоглубинных очагов: 10—15 и 2—5 км [Иванов, 2008; Добрецов, 2010; Добрецов и др., 2012, 2015]).

Модели субдукционного магматизма можно верифицировать и детализировать на примере конкретных объектов, например, вулканов Камчатки [Лаверов и др., 2005; Кулаков и др., 2011; Добрецов и др., 2012, 2015]. В частности, проведено компьютерное моделирование формирования базальтов Камчатки посредством декомпрессионного (по мере подъема магмы) фракционирования на примере лав Ключевского вулкана [Арискин, Бармина, 2000]. В то же время проблемы глубин формирования промежуточных надсубдукционных магматических камер и особенности физико-химических условий кристаллизации расплавов в отдельных очагах над зонами субдукции требуют дальнейших детальных всесторонних исследований на эталонных вулканах Камчатки.

В восточном поясе Камчатки главную массу вулканитов формируют относительно краткие (длительностью около 0.1 млн лет) кальдерообразующие импульсы с большой долей игнимбритов. За последний миллион лет здесь в ходе трех импульсов активизации (в течение около 0.3 млн лет) извержено 18 тыс. км³ преимущественно андезитов и дацитов, а за остальные 0.5—0.7 млн лет лишь 3.3 тыс. км³ базальтов. На западе Камчатки более древний вулканический пояс Срединного хребта представляет собой зону развития позднекайнозойских вулканических структур на фундаменте из олигоцен-миоценовых эффузивов и граувакковых осадков.

Данная работа посвящена выяснению условий субдукционного магматизма на примере петролого-геохимических, минералогических, термобарогеохимических и геолого-геофизических исследований двух контрастных вулканов на Камчатке: молодой базальтовый влк. Толбачинский из Ключевой группы вулканов (с активными извержениями в 1975—1976 и в 2012—2013 гг.) и древний влк. Ичинский в Срединном хребте, где в последние сотни тысяч лет происходило закономерное чередование базальтовых и кислых извержений. Существенное внимание было уделено влк. Толбачинский, но при этом наибольшее значение имел сравнительный анализ новых данных по параметрам магматических систем в промежуточных камерах вулканов Толбачинский и Ичинский, полученных с помощью изучения минералов и термобарогеохимических исследований расплавленных включений.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОЛБАЧИНСКОГО И ИЧИНСКОГО ВУЛКАНОВ

Толбачинский вулкан расположен в ю.-з. части Ключевой группы вулканов на расстоянии 45 км на ю.-з. от Ключевского вулкана и 45 км на з.-ю.-з. от Безымянного вулкана (рис. 1, 2). Эта самая молодая группа вулканов на Камчатке находится над кайнозойскими осадками Центрально-Камчатской депрессии [Действующие вулканы..., 1991].

Толбачинский вулкан состоит из трех частей: 1) Острый Толбачик высотой 3682 м; 2) Плоский Толбачик высотой 3085 м; 3) растущий вулкан Толбачинский Дол на юго-западном фланге Плоского Толбачика, включая сопки Набоко, Красная, Северного прорыва высотой до 300 м и общим куполообразным поднятием на высоте 1000 м над ур.м. (см. рис. 2).

Острый и Плоский Толбачик начали формироваться около 7—10 тыс. л. н. примерно одновременно с Ключевским вулканом [Churikova et al., 2013], но Острый Толбачик прекратил свою активность, а Плоский Толбачик и вулканические центры на юго-западном фланге Плоского Толбачика продолжают быть активными. Эта активность в историческое время (в течение 300 лет) проявлялась от Плоского Толбачика до центров Южного прорыва 1976 г. в разломной зоне длиной около 25 км по азимуту 200—205°. Между вулканами Толбачинский, Камень и Ключевским вулканической активности в это время не

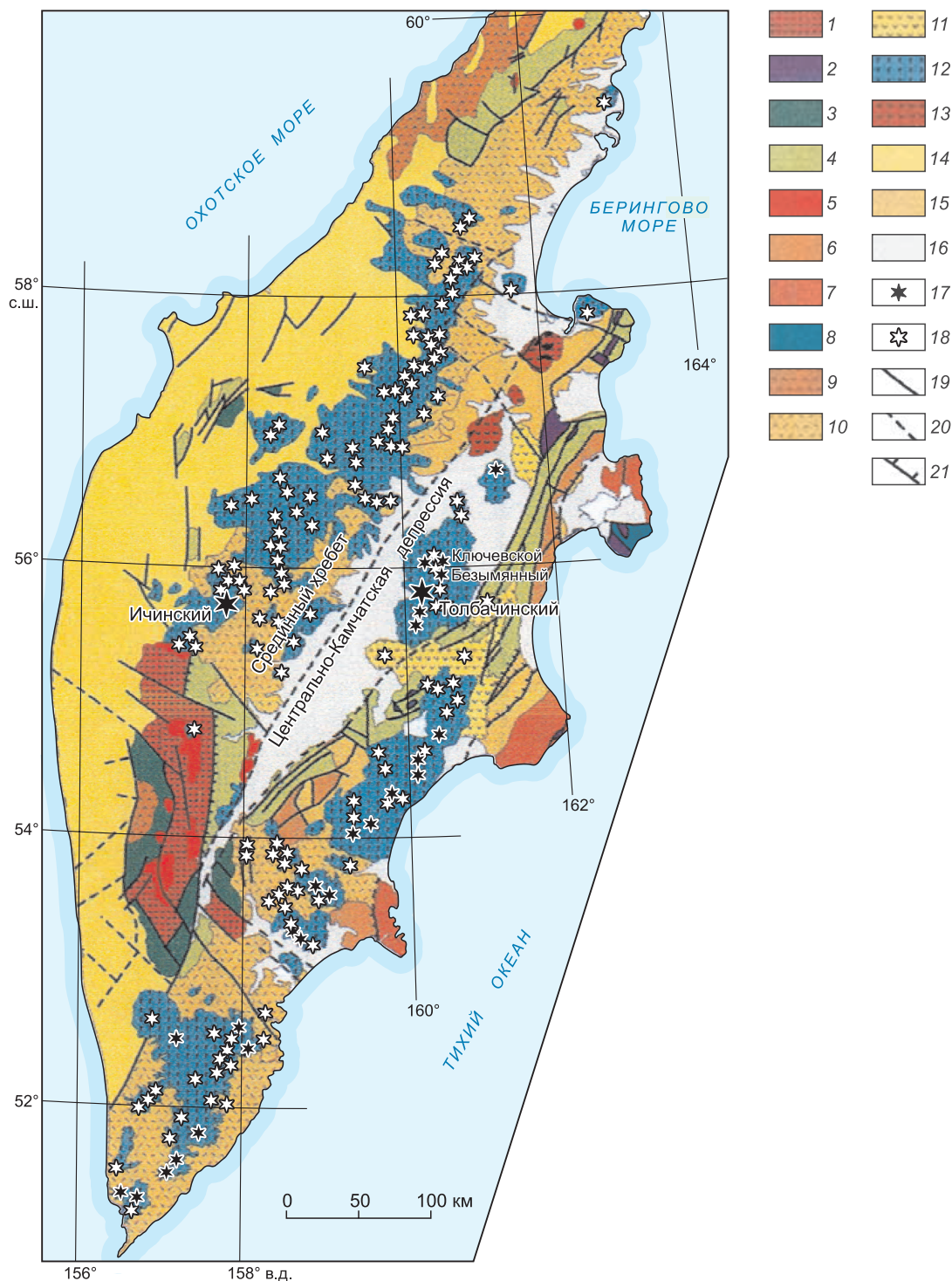


Рис. 1. Расположение изученных вулканов в структурах Камчатки.

1—6 — аккреционно-складчатые комплексы основания Курило-Камчатской островодужной системы: 1 — выступы метаморфических пород, 2 — гипербазиты и габбро офиолитовой ассоциации, 3 — меловые терригенные отложения пассивных окраин, 4 — позднемеловые и палеоценовые аллохтонные образования островных дуг и окраинных морей, 5 — синколлизонные гранитоиды, 6 — палеоцен-эоценовый комплекс; 7, 8 — террейны восточных полуостровов: 7 — мел-эоценовые островодужные образования, 8 — меловые океанические образования; 9—13 — позднекайнозойские вулканические дуги: 9 — Западно-Камчатская (эоценовые вулканиды), 10 — миоцен-плиоценовые вулканические комплексы Срединно-Камчатской и Южно-Камчатской вулканических дуг, 11 — плиоцен-эоплейстоценовые вулканические комплексы Восточно-Камчатской вулканической дуги, 12 — четвертичные вулканиды, 13 — эоцен-олигоценные вулканические комплексы на стыке Алеутской и Курило-Камчатской дуг; 14—16 — кайнозойские молассовые и междуговые образования: 14 — палеоцен-миоценовые отложения Западной Камчатки, 15 — олигоцен-миоценовые отложения Тюшевского и Литкенского прогибов, 16 — рыхлые отложения четвертичных депрессий; 17, 18 — вулканы: 17 — активные, 18 — потухшие; 19—21 — разрывные нарушения: 19 — достоверные, 20 — предполагаемые под рыхлыми отложениями, 21 — надвиги. Рисунок составлен на основе работ [Гордеев, Карпов, 2012; Добрецов и др., 2015].

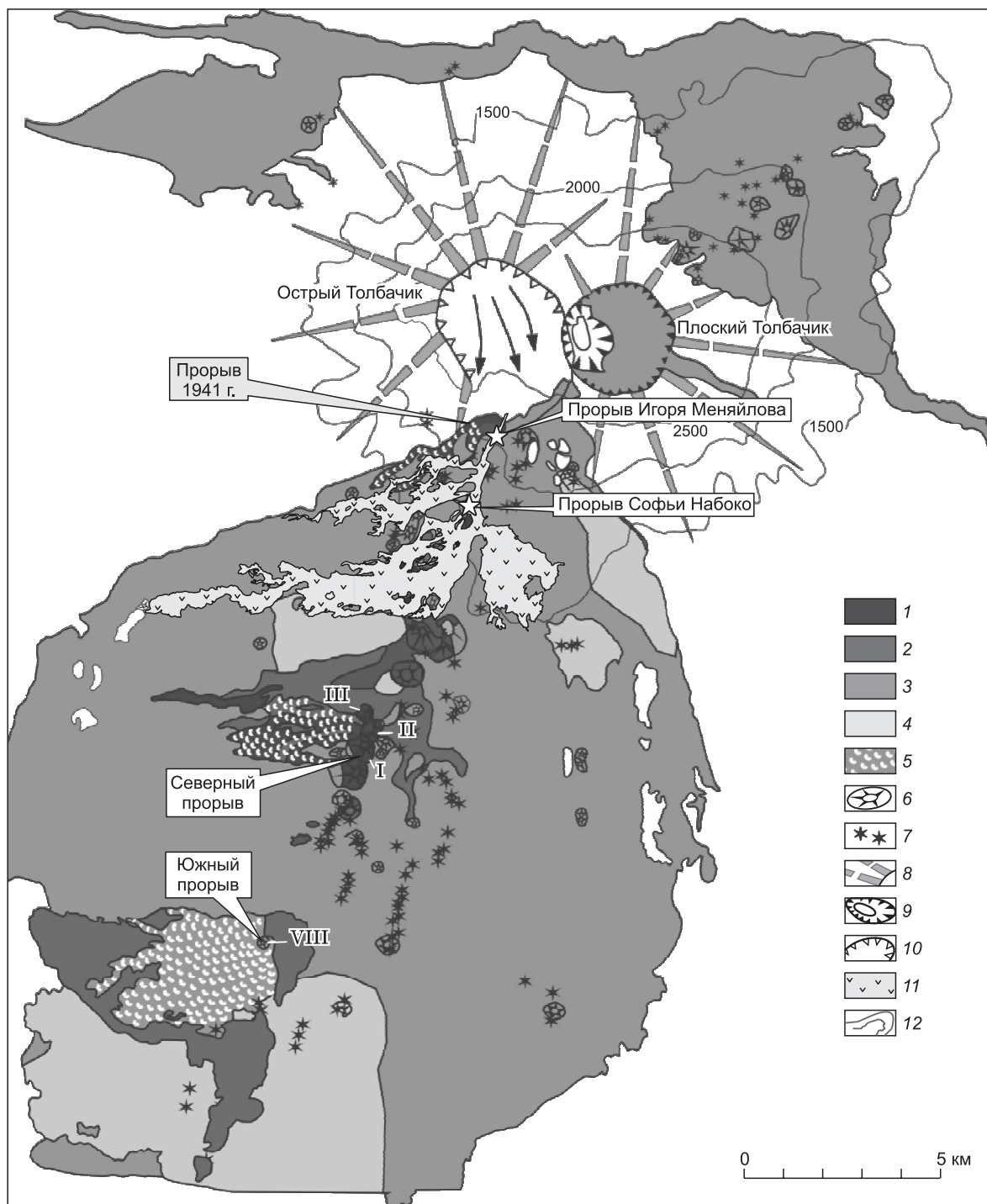


Рис. 2. Геологическое строение района Толбачинского вулкана.

1—4 — типы голоценовых базальтов: 1 — магнезиальные базальты умеренной щелочности, тип I; 2 — магнезиальные промежуточные базальты, тип II; 3 — субщелочные глиноземистые базальты, тип III; 4 — глиноземистые промежуточные базальты, тип IV; 5—10 — вулканические образования II этапа вулканизма до 2000 лет: 5 — лавовые потоки прорыва 1941 г., Северного и Южного прорывов 1975—1976 гг.; 6 — шлаковые конусы; 7 — эруптивные центры и бокки крупных шлаковых конусов, показанные вне масштаба; 8 — конусы стратовулканов; 9 — кальдеры влк. Плоский Толбачик; 10 — стенки обвалных цирков; 11 — лавовые потоки трещинного Толбачинского извержения; 12 — изолинии высот (м). Цифрами I, II, III и VIII обозначены конусы Северного и Южного прорывов 1975—1976 гг. Рисунок составлен по данным из работ [Флеров и др., 1984; Федотов и др., 2011] и с использованием материалов, предоставленных С.А. Хубуная, В.Н. Двигало, И.М. Романовой.

Таблица 1. Характеристики трещинных излияний влк. Толбачинский [Belousov et al., 2015]

№ п/п	Характеристика	Извержение 1941 г.	Извержение 1975—1976 г.		Извержение 2012—2013 гг.
			Северный прорыв	Южный прорыв	
1	Длительность, дни	7	70	450	280
2	Средний расход магмы, м ³ /с	27	95	22	≥ 23
3	Максимальный расход магмы, м ³ /с	Нет данных	112	80	400
4	Максимальная высота шлакового конуса, м	100	300	160	120
5	Длина лавовых потоков, км	5	5	9	17.8
6	Площадь лавовых потоков, км ²	1.8	9	36	36*
7	Объем лав, км ³ DRE	0.014	0.22	0.96	—
		0.0125	0.2	0.86	0.54*
8	Объем пирокластики, км ³ DRE	0.01	0.95	0.03	0.02*
		0.004	0.37	0.012	0.08*
9	Общий объем, км ³ DRE	0.024	1.17	0.99	—
		0.016	0.57	0.87	0.55*
Литературный источник		[Пийп, 1946]	[Большое..., 1984]	[Андреев и др., 1978]	[Двигаго и др., 2014]

Примечание. Данные по объемам пирокластики и лав пересчитаны на эквивалент плотности пород (Dense Rock Equivalent — DRE), используя плотности (г/см³) магмы 2.8, лавы 2.5 и пирокластики 1.1.

* Финальная стадия фотограмметрически не измерена, оценки по экстраполяции.

отмечено, но в районе Ключевского и на с.-в. от него на протяжении около 20 км фиксируются активные вулканические центры, включая кратер Ключевского, паразитарные кратеры и многочисленные шлаковые конусы. Проявлена и сейсмическая брешь между вулканами Толбачинский и Ключевской шириной около 20 км [Belousov et al., 2015].

Таким образом, вулканическая и сейсмическая активность, по-видимому, связанная с самостоятельными базальтовыми очагами, фиксируется на с.-в. и ю.-з. флангах единой тектонической зоны длиной около 80 км (см. рис. 2).

Вулканические извержения из кратера Плоского Толбачика и вулканических аппаратов на его ю.-з. фланге зафиксированы с 1740 по 2013 г. 14 раз — более мелкие через 3—11 лет, более крупные через 21—36 лет, в среднем через 20 лет. Характеристика наиболее крупных и изученных извержений в 1941, 1975—1976 гг. и 2012—2013 гг. приведена в табл. 1.

Наиболее крупное большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ, Северный и Южный прорывы в 1975—1976 гг.) длительностью 450 дней дало объем вулканического материала 0.87 км³. Второе по значению извержение 2012—2013 гг. длилось 280 дней и дало 0.55 км³ вулканитов. Три крупнейших извержения — Северный и Южный прорывы и 50-летия ИВС (2012—2013 гг.) суммарно обеспечили выброс 2 км³ материала за 730 дней (около 2 лет). Все эти извержения по составу были базальтовые с выделением двух типов — высокомагнезиальных базальтов (8—10 мас. % MgO, I тип) и высокоглиноземистых субщелочных базальтов (II тип). Андезиты появляются только в виде бомб, выброшенных из верхней части промежуточных вулканических очагов. В частности, нами обнаружены такие бомбы в Северном прорыве 1975 г.

Во время раннего извержения 1975 г. (Северный прорыв) преобладали пирокластические выбросы объемом 0.95 км³, по составу отвечающие магнезиальным базальтам. В самом крупном извержении Южного прорыва 1976 г. (как и при извержении 2012—2013 гг.) изливались только лавы высокоглиноземистых базальтов (0.86 и 0.55 км³). Объем пирокластики составил 0.03 км³ в 1976 г. и 0.02 км³ в 2013 г.

В начальную стадию извержения 2012—2013 гг. (прорыв Игоря Меняйлова) изливались андезибазальты с содержанием SiO₂ = 54 мас. % и K₂O свыше 1.5 мас. %. Тот же состав имели первые пеплопады. Состав пирокластики был смешанным и включал ювенильные бомбы и угловатые блоки вмещающих пород из подводящего канала (красные шлаки, реже плотные базальты). Эта стадия интерпретируется как фреатомагматическая, захватывающая верхнюю часть поднимающейся магматической колонны и вмещающие породы вблизи трещины излияния. Объем этой стадии не превышал 0.1 км³ [Belousov et al., 2015].

В главную стадию (из конусов Красный и Набоко) изливались базальтовые лавы, аналогичные извержению 1976 г. в Южном прорыве — SiO₂ = 52 мас. %, K₂O около 1.4 мас. %, MgO = 4—5 мас. % [Волынец и др., 2013]. Большинство лав, а также бомб и пирокластики содержат значительное количе-

ство мелких извилистых стекловатых обломков, а также фрагменты «волос Пеле». В начале главной стадии было выброшено много уплощенных кристаллов и сростков плагиоклаза, покрытых тонкой пленкой стекла. В главную стадию к 5 июля 2013 г. конус Набоко имел высоту 120 м и объем 0.016 км³ с главным кратером диаметром 100 м и глубиной 30 м. Кратер Северного прорыва 1975 г. достигал 300 м в диаметре (см. табл. 1). Обломки пирокластики 2012—2013 гг. были самые мелкие и наиболее стекловатые. Динамика и характер этих извержений сильно отличались от извержения 1941 г. и Северного прорыва 1975 г. (см. табл. 1).

Высокоглиноземистые андезибазальты преобладали во всех доисторических извержениях Толбачика начиная с 7000 лет. Высокомагнезиальные базальты появились только в последние 2000 лет [Федотов и др., 2010], связаны с более глубокими очагами (около 12 км, а по нашим оценкам — 18—23 км) и сопровождалась дайковыми каналами (системой даек в виде пояса длиной до 20—22 км). Высокоглиноземистые базальты извергались из менее глубоких камер (4—5 км) и сопровождалась дайками и эруптивными трещинами длиной от 8—10 км и до первых сотен метров [Волынец и др., 2013; Belousov et al., 2015].

Характерной особенностью последнего извержения 2012—2013 гг. влк. Толбачинский является максимальная стекловатость и высокая пористость пород при интенсивном выделении вулканических газов. Из этих вулканогенных летучих компонентов образуются разнообразные минералы — тенорит (CuO), галит (NaCl) и сульфаты. Широко развиты возгоны ярко-желтого цвета, в виде налета покрывающие базальтовые лавы и пропитывающие их по трещинам (предположительно хлорид железа — молизит, FeCl₃). Реже наблюдались трещины в лавовых потоках с инкрустацией темно-зеленым, почти черным минералом (предположительно пийпит — сульфат калия и меди). Большинство новообразованных минералов нестойки в естественных условиях. Через несколько дней после образования они теряют свои яркие окраски, гидратируются или полностью растворяются атмосферными осадками [Савельев, 2013]. Таким образом, количество воды среди вулканических газов извержения 2012—2013 гг. влк. Толбачинский, скорее всего, незначительно, и в данном случае преобладали сернистые, хлористые и, возможно, восстановленные флюидные компоненты, для выяснения роли которых в магматических системах Толбачинского вулкана необходимо провести дополнительные исследования.

Ичинский вулкан является самым большим действующим вулканом в Срединном хребте Камчатки и располагается на расстоянии около 180 км к ю.-з. от Ключевского вулкана (см. рис. 1). Высота вулкана 3607 м, диаметр более 30 км. Во многих справочниках считается единственным действующим вулканом в Срединном хребте, хотя активная деятельность отмечалась также на вулканах Хангар (100 км к югу от Ичинского) и Уксичан [Давыдова, 2014] (60 км к с.-в.). Для всех трех вулканов характерна преобладающая или значительная доля кислых вулканитов (дацитов и риолитов), но Ичинский вулкан отличается наиболее сложным чередованием 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 (рис. 3).

Последние этапы эруптивной активности влк. Ичинский приурочены к голоцену [Певзнер, 2004], представлены грубыми вулканическими песками и несортированными пирокластическими отложениями. По составу пирокластика отвечает андезитам и дацитам известково-щелочной серии, обладает умеренной магнезиальностью и относится к типичным породам островных дуг. В разрезах на склоне и подножии вулкана голоценовый чехол содержит как «местные» вулканогенные отложения (не менее 14 единиц извержений), представленные лавами и пирокластикой, так и транзитные маркирующие пеплы удаленных вулканов (Шивелуч, Хангар, Авачинский, Северный и Южный Черпук).

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, в интервале около 8000—6700 лет назад, представленных в основном тефрой. Максимальный всплеск активности вулкана происходил около 6500 лет назад. Разрезы этого возраста насыщены обломочным материалом. Выделяются отложения пепловоглыбовых пирокластических потоков. Завершается период ростом крупной андезиодацитово-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. Необходимо отметить, что до настоящего времени причины чередования пирокластических выбросов и спокойных излияний выяснены недостаточно.

В целом на основе имеющейся геологической схемы [Кутыев, 1975] (см. рис. 3) реконструируемая последовательность вулканических стадий на влк. Ичинский может быть представлена в следующем виде.

1. Оливиновые базальты и купола оливиновых базальтов с кратерами диаметром до 200 м и глубиной до 50 м. Они слагают основание вулкана и его внешнюю кайму.

2. Субщелочные базальты и андезибазальтовые потоки, часто с лавобрекчиями, лучше выражены в северной части вулкана.
3. Многофазовые купола амфиболовых дацитов и риодацитов, в том числе купол Гигилен размером 1.5×3.0 км в с.-в. части вулкана (см. рис. 3).
4. Андезиты (с переходами в андезибазальты и андезидациты), слагающие основную часть конуса, частично закрытого ледниками.

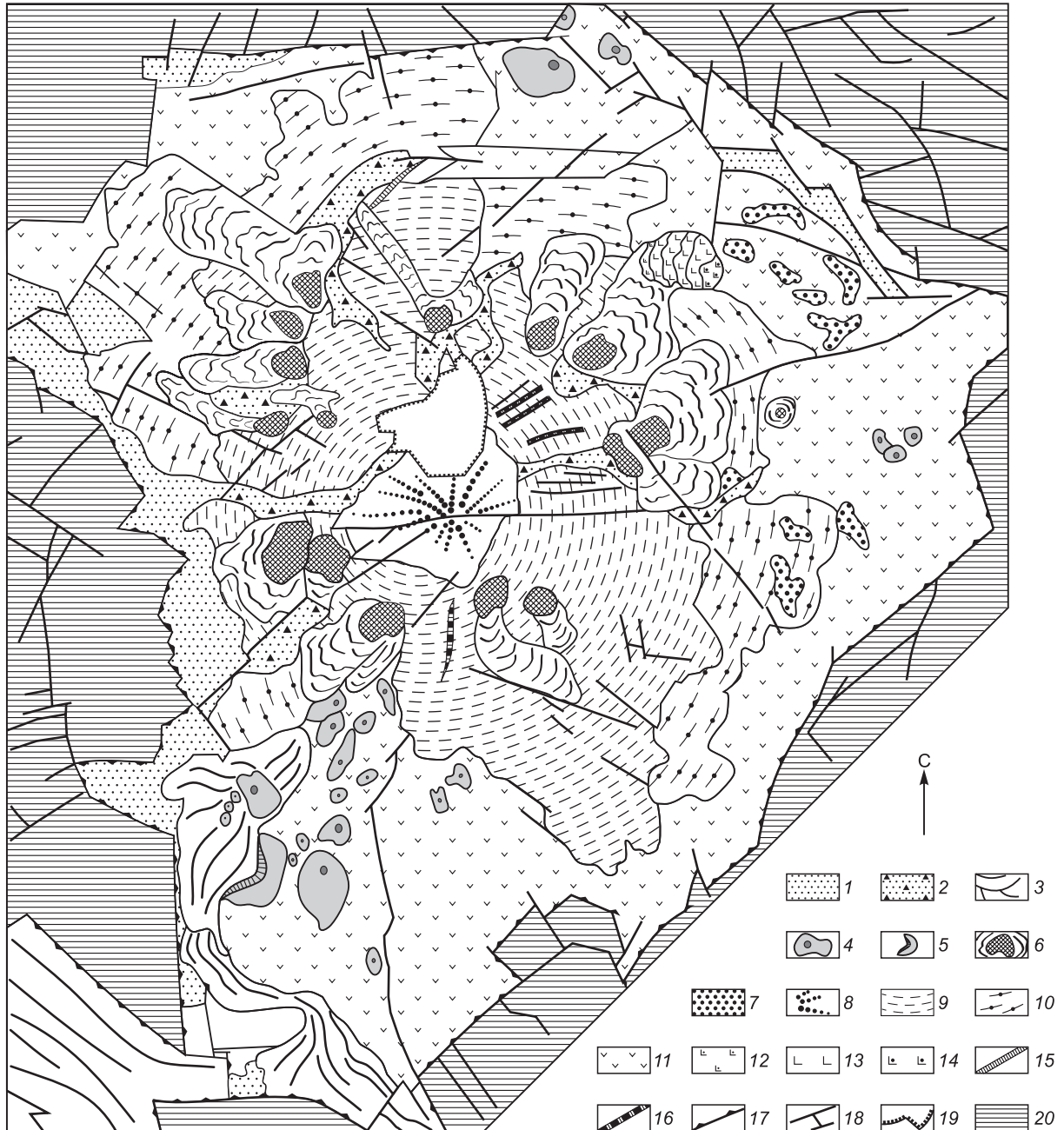


Рис. 3. Геологическое строение района Ичинского вулкана.

1 — флювиогляциальные образования; 2 — морена; 3 — лавовые потоки андезибазальтов и оливиновых базальтов; 4 — шлаковые конусы базальтов; 5 — скрытые шлаковые конусы; 6 — экструзивные купола и лавовые потоки андезидацитов; 7 — пемзовые покровы андезидацитового состава; 8 — ледовый панцирь на вершине вулкана; 9 — слоистые толщи базальтов и андезибазальтов; 10 — слоистые толщи стратовулкана существенно базальтового состава; 11 — оливиновые базальты плато и первичной постройки; 12 — риолиты экструзивного купола Гигилен; 13 — андезиты экструзивного купола Гигилен; 14 — андезидациты экструзивного купола Гигилен; 15 — дайки риолитового состава; 16 — дайки андезидацитового состава; 17, 18 — разломы, образующие депрессию: 17 — установленные; 18 — предполагаемые; 19 — кратер, бронированный льдом; 20 — породы обрамления. Рисунок составлен на основе данных из работы [Кутыев, 1975].

5. Покровы дацитов длиной до 5—6 км, начинающиеся куполами риодацитов на сохранившейся фрагментарно кальдере вулкана размером 8×15 км.

6. Субширотные и радиальные дайки кислого состава формировались во время стадии 5 или представляют независимую стадию.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой работ послужили коллекции образцов эффузивных пород, собранных авторами статьи на вулканах Толбачинский и Ичинский, а также предоставленных для исследований сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский. Физико-химические параметры расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах рассмотренных вулканов были установлены в ходе детального изучения минералов из эффузивов и находящихся в них стекловатых расплавных включений. В то же время особенностью проведенных работ является комплексный подход с использованием геолого-петрологических, петрохимических, минералогических и термобарогеохимических исследований (с привлечением геофизической информации), что позволило получить наиболее обоснованные данные о характере развития магматических систем при подъеме расплавов из глубинных очагов к близповерхностным камерам.

На первом этапе обработки отобранных образцов с целью выяснения их петрографических особенностей и определения минерального состава изучены шлифы. В дальнейшем петрохимические составы пород были определены с помощью силикатного рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation в ИГМ СО РАН, г. Новосибирск. Для получения более представительных выводов дополнительно использована информация других исследователей, находящаяся в базе геохимических данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>).

Главный объем нового оригинального материала, являющегося основой для выводов в данной статье, был получен в результате исследования образцов пород Толбачинского и Ичинского вулканов с помощью электронного сканирующего микроскопа. Состав минералов-вкрапленников и стекловатого матрикса из эффузивов, а также стекол и микрофаз в расплавных включениях определен в ИГМ СО РАН 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—30 с. При данных условиях анализа погрешность определения основных компонентов ($C > 10$ —15 мас. %) обычно 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—30 отн. % [Лаврентьев и др., 2015].

Часть плагиоклазов и амфиболов из эффузивов Ичинского вулкана была проанализирована на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro в ИГМ СО РАН. Пределы обнаружения (мас. %) компонентов этим методом следующие: SiO_2 — 0.007, TiO_2 — 0.032, Al_2O_3 — 0.011, FeO — 0.019, MnO — 0.034, MgO — 0.011, CaO — 0.008, Na_2O — 0.017, K_2O — 0.009. Стандартами при анализе на микрозонде служили минералы — ортоклаз (Or), диопсид (Di) и гранат (Gr-145).

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, Слущкий, 1984] с использованием имеющихся методик [Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994].

Обработка полученных данных с целью расчетного моделирования физико-химических параметров расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах вулканов Толбачинский и Ичинский (Камчатка) проводилась с помощью программ PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и PLUTON [Лавренчук, 2004].

ПЕТРОХИМИЯ ПОРОД

На основе новых данных и с учетом опубликованных материалов были рассмотрены особенности петрохимии эффузивных пород из районов Толбачинского и Ичинского вулканов. Анализ собранных образцов показал для существенной части из них отрицательные значения потерь при прокаливании (табл. 2).

Традиционные петрохимические критерии разделения на петрохимические типы по соотношению суммы щелочей и SiO_2 свидетельствуют о том, что среди эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов присутствуют как субщелочные серии, так и породы нормальной щелочности. По соотношению FeO/MgO — SiO_2 эффузивы нормальной щелочности в случае влк. Толбачинский разделяются на толеитовые и известково-щелочные, а в случае Ичинского вулкана они представлены только известково-щелочными породами.

Таблица 2.

**Представительные оригинальные анализы (мас. %) эффузивных пород
Толбачинского и Ичинского вулканов**

№ п/п	№ образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	П.п.п.	Сумма
1	7	62.05	0.61	16.35	6.30	0.13	2.70	5.77	3.49	1.75	0.13	-0.03	99.246
2	1417	52.24	1.08	15.14	9.98	0.15	8.62	8.35	2.97	1.50	0.32	-0.25	100.104
3	T-126	51.79	2.00	16.27	12.03	0.17	4.38	7.49	3.56	2.44	0.72	-0.78	100.075
4	1418.B	51.00	1.11	14.60	10.16	0.16	9.19	8.86	2.94	1.49	0.31	-0.30	99.502
5	T-14-13	52.96	1.88	15.99	11.03	0.17	3.57	7.42	3.62	2.49	0.69	-0.51	99.312
6	T-67-13	52.79	1.84	16.23	11.14	0.17	3.56	7.21	3.59	2.52	0.72	-0.36	99.418
7	T-14-12	63.59	0.62	16.24	6.03	0.12	2.43	5.41	3.61	1.87	0.15	0.05	100.113
8	1405	59.91	0.64	16.66	6.00	0.13	2.44	5.15	3.88	2.49	0.28	1.53	99.101
9	1402	66.23	0.57	16.13	4.42	0.09	1.56	3.65	4.10	3.00	0.19	0.12	100.062
10	1401	51.23	1.98	16.18	12.03	0.17	4.26	7.39	3.59	2.48	0.72	-0.72	99.328
11	1403	62.92	0.66	16.69	5.52	0.10	2.36	4.94	3.84	2.42	0.22	0.10	99.758
12	6A(1402)	66.61	0.52	15.81	4.07	0.08	1.49	3.38	4.11	3.12	0.17	0.27	99.629

Примечание. 1—7 — породы Толбачинского вулкана; 8—12 — породы Ичинского вулкана.

На вариационных диаграммах (рис. 4) среди эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов в целом выделяются две группы пород (различающиеся как по содержанию оксидов, так и по их трендам эволюции) — базальтовая и андезитовая. Тренды андезитов для обоих вулканов фактически совпадают, показывая падение титана, магния, кальция и увеличение калия с ростом SiO₂. Андезитовая ветвь дифференциации в Толбачинском вулкане представлена только андезитовыми бомбами в пирокластике. В случае базальтовой группы наклоны эволюционных трендов Толбачинского и Ичинского вулканов существенно различаются. В частности, в базальтах Толбачика содержание TiO₂ увеличивается, а в базальтах Ичинского вулкана значения этого элемента падают с ростом SiO₂. По значениям MgO и CaO при тех же SiO₂ (50—54 мас. %) среди пород Толбачинского вулкана выделяется группа высокомагнезиальных (более 8.5 мас. %) и высокальциевых (более 10 мас. %) базальтов, отсутствующая на Ичинском вулкане. Обращают на себя внимание значительные (от 0.6 до 3 мас. %) вариации содержаний калия в эффузивах рассмотренных вулканов. При этом для обоих вулканов выделяются три разных тренда роста K₂O с увеличением SiO₂ (см. рис. 4).

Проведено сравнение составов пород Толбачинского и Ичинского вулканов с петрохимическими данными по эффузивам других вулканов Камчатки. Для этого использована информация по породам Ключевского (преобладают базальты), Уксичан (базальты и андезиты) и Безымянный (в основном андезиты). Было выяснено, что базальтовые породы Толбачика близки к данным по эффузивам (SiO₂ = 50—54 мас. %) вулканов Ключевской и Уксичан, отличаясь явно более высокими значениями TiO₂. Андезиты Толбачинского вулкана попадают в поля соответствующих пород влк. Безымянный. Эффузивы Ичинского вулкана наиболее близки к породам влк. Уксичан, отличаясь повышенными значениями титана и меньшими содержаниями калия. В целом высокотитанистые базальты Толбачика и Ичинского не имеют аналогов среди эффузивов других рассмотренных вулканов. Данные по андезитам Ичинского и Безымянного близки между собой (см. рис. 4).

На диаграмме MgO—SiO₂ (рис. 5) для эффузивов Ичинского вулкана устанавливается классический тренд дифференциации: оливиновые базальты—базальты—андезибазальты—андезиты. Большинство этих пород располагаются в поле эффузивов влк. Уксичан. При этом в диапазоне базальтов и андезибазальтов (SiO₂ = 48—57 мас. %) тренд эффузивов Ичинского вулкана фактически совпадает с расчетной траекторией дифференциации родоначальных магм влк. Уксичан, приведенной в работе [Давыдова, 2014]. В случае Толбачинского вулкана выделяются эффузивы с высокими содержаниями магния (от 7.5 до 11 мас. %), располагающиеся между полями оливиновых базальтов и бонинитов и ассоциирующие с частью данных по вулканам Ичинскому и Уксичану (см. рис. 5).

СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ

Для выяснения особенностей дифференциации расплавов в промежуточных камерах под Толбачинским и Ичинским вулканами основное внимание было уделено анализу минералов, несущих максимальное количество генетической информации. Изучались минералы, содержащие расплавные включения, исследования которых позволили получить данные о физико-химических условиях магматических систем. Исследования плагиоклазов и амфиболов дали возможность не только изучить расплавные

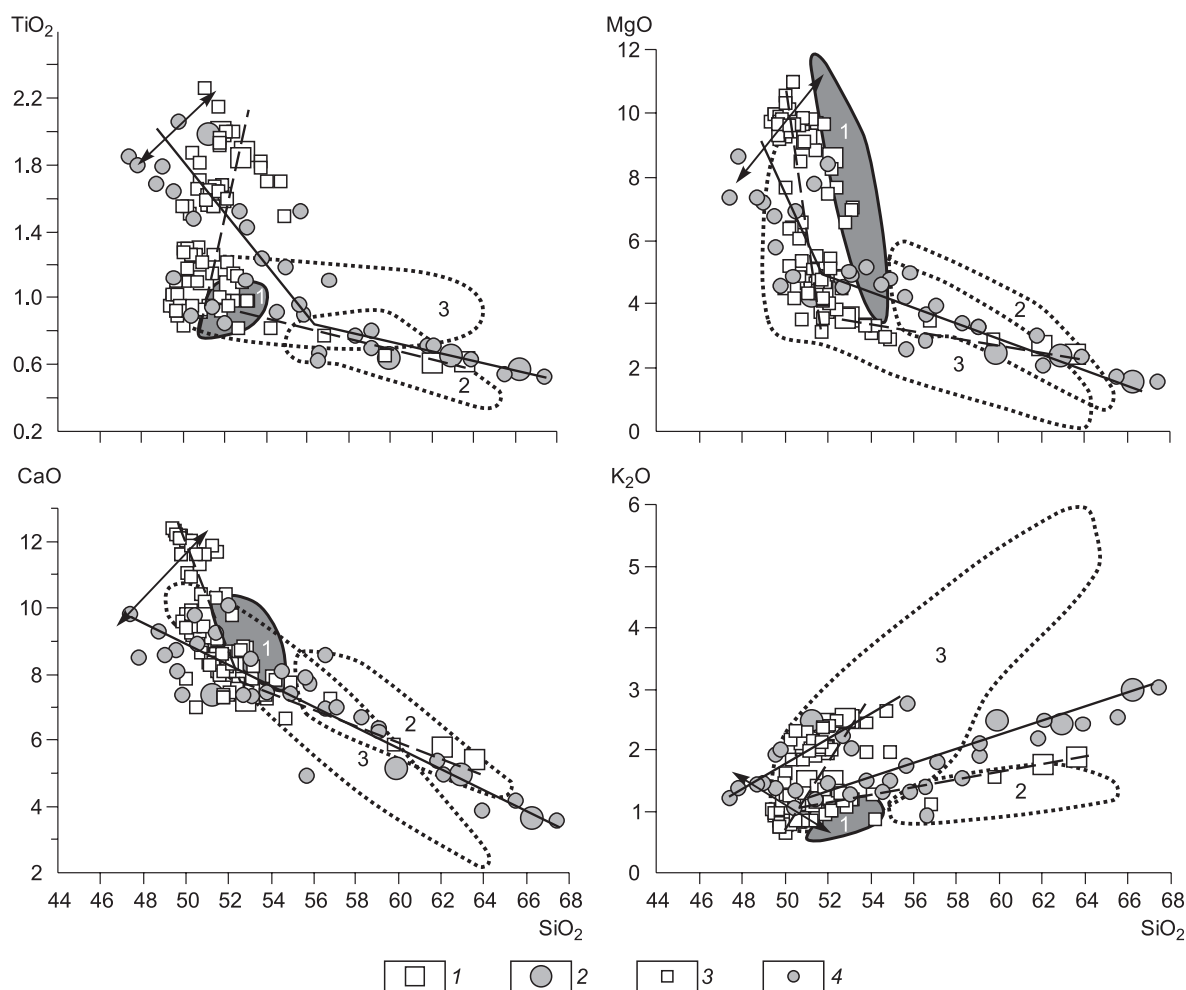


Рис. 4. Вариационные диаграммы (мас. %) для эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов.

1, 2 — оригинальные авторские анализы пород Толбачинского (1) и Ичинского (2) вулканов; 3, 4 — данные по эффузивам Толбачинского (3) и Ичинского (4) вулканов из базы данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>). Тренды пород: Толбачинский — сплошная линия, Ичинский — штриховая линия. Поля пород: эффузивы вулканов Ключевской (1), Безымянный (2) и Уксичан (3), Камчатка. Стрелками показаны возможные направления смещения расплавов. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с добавлением материалов из работ [Churikova et al., 2013; Давыдова, 2014] и базы данных GEOROC.

включения, но и установить параметры кристаллизации в разноглубинных камерах. В частности, проведено изучение уплощенных кристаллов-лапильей плагиоклаза (покрытых тонкой пленкой стекла), выброшенных в виде самостоятельных фаз во время извержения 2013 г. и формировавшихся, наиболее вероятно, на самых верхних горизонтах магматической колонны при активном участии летучих компонентов. Исследования вкрапленников амфиболов и плагиоклазов позволили получить данные об эволюции магматических систем во времени и дали возможность оценить давление расплавов в разноглубинных очагах.

В случае **Толбачинского вулкана** определены составы хорошо ограненных (имеющих вид плоских табличек шириной до 15 мм и толщиной 1—2 мм) кристаллов-лапильей плагиоклаза из прорыва Набоко, 2013 г. (табл. 3). По содержанию анортитового компонента изученные плагиоклазы разбиваются на две группы (58—60 и 63—70 % An), соответствуя в целом лабрадору.

В андезите Северного прорыва (1976 г.) влк. Толбачинский были установлены составы вкрапленников плагиоклаза и амфибола (табл. 3, 4). По значениям анортитового компонента (45—50) изученный плагиоклаз относится к андезину. Особый интерес представляют зональные кристаллы. На рис. 6, а видно, что центр вкрапленника плагиоклаза кристаллизовался в стационарных условиях, показывая рост An от 45 до 50 %. Затем происходит чередование тонких контрастных зон с общим падением анортитового компонента вновь до 46—45 % An.

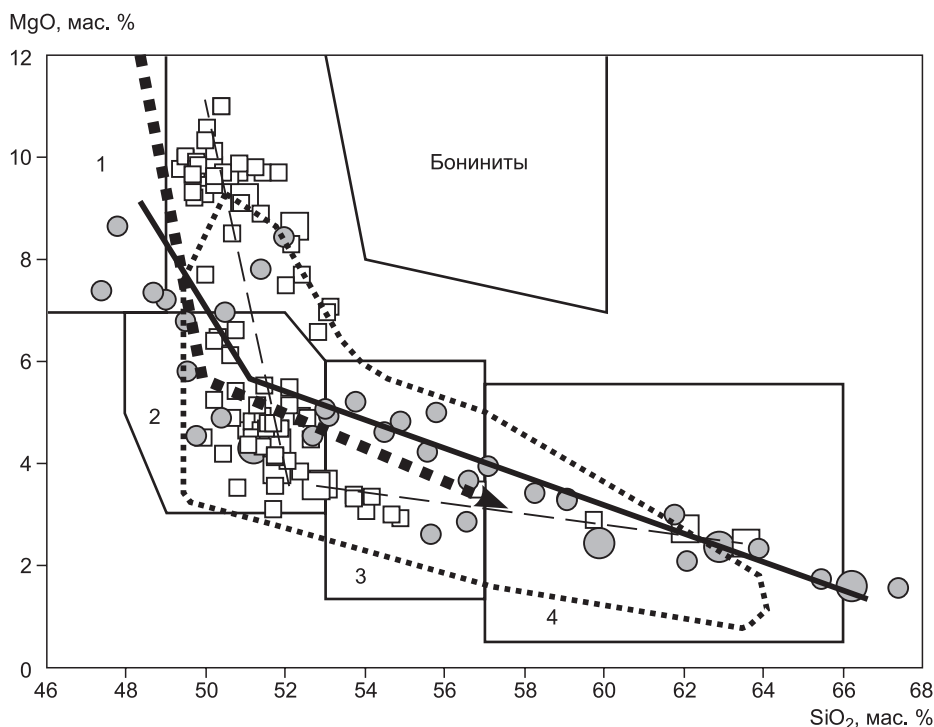


Рис. 5. Детализированная диаграмма MgO—SiO₂ для эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов.

Поля пород: 1 — оливиновые базальты, 2 — базальты, 3 — андезибазальты, 4 — андезиты. Пунктиром показаны данные по влк. Уксичан: поле эффузивов и тренд эволюции родоначальных магм. Остальные усл. обозн. см. на рис. 4. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с добавлением материалов из работ [Магматические..., 1983; Симонов и др., 1994; Давыдова, 2014] и базы данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>).

По своему составу амфиболы из андезита влк. Толбачинский относятся к магнезиогорнблендитам и сходны с амфиболами из пород известково-щелочных серий. Для вкрапленников амфибола устанавливается зональность (см. рис. 6, б). Причем, как и в случае с плагиоклазом, равномерная кристаллизация центра (с ростом алюминия в четверной координации) сменяется контрастными по составу тонкими зонами. Сопоставляя данные по плагиоклазу и амфиболу, видим, что оба минерала росли при близких условиях и фактически синхронно, показывая кристаллизацию центров в стационарной (скорее всего, в замкнутой) обстановке промежуточного очага, которая сменяется резкими флуктуациями параметров, связанными с разгерметизацией камеры и возможным движением расплава в канале.

Для **Ичинского вулкана** исследовались минералы из андезитов и дацитов. По содержанию анортитового компонента плагиоклазы разбиваются на две группы: битовнит (74—82 % An) и андезин (37—52 % An). В даците присутствует только андезин (30—42 % An).

Амфиболы из андезитов соответствуют магнезиогастингситам, а минералы из дацитов относятся к магнезиогорнблендитам. Оба амфибола характерны для пород известково-щелочных серий. Устанавливается зональное строение амфиболов из андезитов Ичинского вулкана (см. рис. 6, в). При этом наблюдается диаметрально противоположная тенденция изменения состава кристалла в ходе его роста по сравнению с вкрапленниками из андезитов влк. Толбачинский. В случае ичинских амфиболов при формировании центральной части происходит падение значений алюминия в четверной координации (для центра амфиболов влк. Толбачинский — рост этого компонента), а затем кристаллизация краевых частей идет с увеличением алюминия (для периферии амфиболов Толбачика — падение) (см. рис. 6).

На основе данных по составам амфиболов с помощью набора барометров [Johnson, Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; и др.] были рассчитаны давления образования андезитов Толбачинского, а также андезитов и дацитов Ичинского вулканов. В результате установлено, что амфиболы из андезитов Толбачика кристаллизовались при давлениях 1.6—3.3 кбар, совпадающих с данными по низкобарической группе амфиболов из эффузивов влк. Безымянный (рис. 7). В то же время андезиты Ичинского вулкана формировались в основном при гораздо более высоких параметрах (6.0—7.5 кбар), соответствующих высокобарической группе амфиболов Безымянного вулкана, а небольшая часть этих пород образова-

Таблица 3. Представительные анализы (мас. %) плагиоклазов из исследованных образцов эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	An
1	1а.5	53.45	29.03	0.76	11.95	4.35	0.47	100.01	58.63
2	1а.6	50.57	31.06	0.66	14.22	3.23	0.26	100.00	69.79
3	1а.7	53.68	28.81	0.73	11.86	4.52	0.40	100.00	57.81
4	2а.4	53.18	29.28	0.66	12.19	4.23	0.46	100.00	59.78
5	2а.5	51.53	30.43	0.71	13.33	3.44	0.35	99.79	66.74
6	4.3	50.98	30.79	0.71	13.83	3.37	0.32	100.00	68.10
7	4.4	53.01	29.24	0.74	12.18	4.42	0.41	100.00	58.94
8	46.4	50.67	30.89	0.74	14.10	3.29	0.30	99.99	69.08
9	5.7	52.19	30.07	0.65	12.84	3.92	0.33	100.00	63.17
10	6.4	51.55	30.38	0.80	13.25	3.62	0.40	100.00	65.35
11	7а.8	55.62	27.95	0.30	10.04	5.85	0.24	100.00	48.01
12	76.5	56.20	27.72	0.34	9.83	5.62	0.29	100.00	48.32
13	9а.4	56.63	27.50	0.30	9.58	5.97	0.32	100.00	46.14
14	106.5	56.12	27.64	0.32	9.94	5.79	0.19	100.00	48.15
15	10с.1	56.89	27.35	0.27	9.19	6.00	0.30	100.00	45.04
16	10с.2	55.57	27.96	0.30	10.38	5.59	0.19	99.99	50.09
17	10с.3	56.12	27.63	0.30	9.84	5.80	0.32	100.01	47.50
18	10с.4	56.44	27.43	0.34	9.78	5.75	0.26	100.00	47.72
19	10с.5	56.37	27.58	0.28	9.57	5.94	0.25	99.99	46.42
20	10с.6	56.47	27.60	0.30	9.47	5.91	0.26	100.01	46.25
21	2.8	49.40	31.96	0.46	14.81	2.87	0.00	99.50	74.04
22	2.10	48.42	32.92	0.50	15.64	2.37	0.00	99.85	78.48
23	3.3	56.79	27.24	0.77	9.26	5.88	0.38	100.31	45.51
24	3.6	61.51	24.95	0.67	7.49	5.66	0.60	100.88	40.60
25	4.1	57.63	27.02	0.75	9.96	5.14	0.37	100.87	50.56
26	4.4	54.58	27.81	0.75	10.32	5.10	0.26	98.81	51.97
27	4.5	59.91	25.43	0.76	9.02	4.46	0.51	100.09	50.96
28	10.4	50.34	32.33	0.49	14.84	2.83	0.00	100.83	74.34
29	13.1	48.25	33.37	0.57	16.20	1.98	0.00	100.37	81.89
30	13.2	49.46	32.18	0.49	15.07	2.75	0.00	99.95	75.18
31	7.6	59.59	25.22	0.21	7.13	7.28	0.57	100.00	33.98
32	7.7	57.87	26.35	0.22	8.37	6.51	0.45	99.77	40.46
33	8.3	58.54	26.10	0.26	7.79	6.83	0.48	100.00	37.60
34	8.4	58.76	26.02	0.18	7.55	7.02	0.47	100.00	36.28
35	8.7	58.13	26.24	0.27	8.04	6.93	0.38	99.99	38.23
36	8.8	60.53	24.80	0.18	6.42	7.54	0.53	100.00	31.02
37	9а.7	60.22	24.79	0.31	6.76	7.27	0.64	99.99	32.69
38	96.7	59.68	25.25	0.19	7.25	6.96	0.67	100.00	35.12
39	15а.21	58.77	25.92	0.35	8.01	6.42	0.52	99.99	39.56
40	15с.5	59.97	25.06	0.31	6.82	7.28	0.56	100.00	33.01

Примечание. 1—20 — плагиоклазы Толбачинского вулкана: кристаллы-лапиллы (1—10, обр. 1), плагиоклаз из андезита (11—20, обр. 7); 21—40 — плагиоклазы Ичинского вулкана: из андезита (21—30, обр. 1405), из дацита (31—40, обр. 1402). An — анортитовый компонент. 1—20, 31—40 — электронный сканирующий микроскоп; 21—30 — рентгеновский микроанализатор.

лась около 4.5 кбар. Гораздо ниже были давления при кристаллизации большинства дацитов Ичинского вулкана (1.0—3.2 кбар), близкие к характеристикам андезитов Толбачика и низкобарической группы амфиболов Безымянного. В то же время часть дацитов могла формироваться при относительно повышенных давлениях (4.1—4.5 кбар), близких к отдельным данным по амфиболам из андезитов влк. Толбачинский (см. рис. 7).

Таблица 4. Представительные анализы (мас. %) амфиболов из исследованных образцов эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Al ^{IV}
1	1.2	47.47	1.68	7.63	13.67	0.40	14.54	10.84	1.43	0.34	98.00	1.23
2	1.4	48.83	1.23	6.68	13.44	0.46	15.07	10.79	1.20	0.32	98.02	1.08
3	1.6	49.00	1.11	6.37	13.44	0.42	15.20	10.87	1.30	0.29	98.00	1.05
4	2.1	46.88	1.63	8.01	13.85	0.37	14.47	10.89	1.54	0.36	98.00	1.30
5	2.3	47.27	1.66	7.78	13.83	0.27	14.61	10.68	1.53	0.27	97.90	1.27
6	2.4	48.46	1.30	6.64	13.43	0.41	15.31	10.88	1.30	0.27	98.00	1.11
7	2.5	47.83	1.49	6.90	13.68	0.42	15.00	10.88	1.43	0.28	97.91	1.16
8	3.4	48.83	1.39	6.54	13.19	0.34	15.24	10.85	1.26	0.27	97.91	1.07
9	4а.14	46.81	1.50	8.41	13.82	0.41	14.62	10.61	1.51	0.30	97.99	1.35
10	5.1	48.43	1.32	7.25	13.52	0.28	14.97	10.57	1.46	0.19	97.99	1.14
11	8.1	42.21	2.26	11.79	13.18	0.30	13.96	11.24	2.45	0.61	98.00	1.90
12	8.2	43.11	2.16	11.00	12.83	0.42	14.27	11.26	2.27	0.68	98.00	1.78
13	8.3	45.14	1.26	9.59	14.18	0.59	13.91	10.82	1.97	0.54	98.00	1.51
14	8.4	43.31	2.43	10.93	12.95	0.32	14.08	11.16	2.21	0.61	98.00	1.75
15	8.5	42.26	2.15	12.04	13.44	0.34	13.51	11.30	2.40	0.57	98.01	1.88
16	8б.7	40.92	3.55	12.77	13.61	0.32	12.79	10.99	2.40	0.65	98.00	2.05
17	11б.5	42.70	2.26	11.57	12.47	0.25	14.11	11.69	2.31	0.62	97.98	1.81
18	15а.3	40.86	2.71	13.24	12.57	н.о.	13.99	11.37	2.67	0.59	98.00	2.09
19	15с.5	41.70	2.52	13.21	11.49	0.17	14.11	11.57	2.57	0.66	98.00	1.97
20	6В8.3	44.30	1.52	9.61	13.23	0.23	14.23	10.68	1.95	0.39	96.13	1.55
21	2.4	47.13	1.92	7.46	12.71	0.44	14.17	10.93	1.55	0.42	96.73	1.16
22	3.2	48.65	1.31	5.76	12.22	0.49	15.41	10.71	1.28	0.27	96.10	0.98
23	3.3	45.45	2.22	7.90	13.53	1.26	13.93	10.90	1.74	0.94	97.87	1.35
24	4.1	49.60	1.52	5.13	12.26	1.06	16.07	10.75	1.18	0.54	98.11	0.85
25	4.2	46.36	1.91	7.40	12.79	1.31	14.59	11.69	1.64	0.68	98.37	1.26
26	4.4	47.67	1.62	6.59	11.96	0.43	15.42	10.61	1.58	0.31	96.19	1.12
27	6.4	45.74	2.17	8.06	13.08	0.27	14.09	10.77	1.68	0.47	96.32	1.32
28	12.2	43.52	2.66	9.53	14.11	0.46	12.53	10.75	1.99	0.48	96.03	1.54
29	12.3	46.59	1.98	7.37	12.50	0.44	14.40	10.85	1.67	0.30	96.09	1.20
30	12.5	49.78	1.04	5.16	12.09	0.53	16.00	10.62	1.22	0.18	96.62	0.87

Примечание. 1—10 — амфиболы из андезитов Толбачинского вулкана (обр. 7); 11—30 — амфиболы из андезита (11—20, обр. 1405) и из дацита (21—30, обр. 1402) Ичинского вулкана. Al^{IV} — алюминий в четверной координации. 1—19 — электронный сканирующий микроскоп, 20—30 — рентгеновский микроанализатор.

Исследования амфиболов показали, что при формировании андезитов Толбачинского и Ичинского вулканов не только существенно различаются абсолютные величины давлений, но и устанавливаются различные пути эволюции параметров кристаллизации этих пород. В частности, анализ зональных вкрапленников амфибола показал, что в случае андезитов влк. Толбачинский кристаллизация происходила в достаточно спокойной обстановке на фоне роста давления, которая резко сменилась скачкообразными изменениями параметров при общей тенденции снижения давления. Совершенно другая картина наблюдается для андезитов Ичинского вулкана — постепенное снижение сменяется в целом равномерным ростом давления (рис. 8), что, скорее всего, может быть вызвано накоплением летучих в камере.

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Проведенные исследования позволили установить, что первичные расплавные включения присутствуют практически во всех детально рассмотренных в предыдущем разделе минералах: в кристаллах-лапилях плагиоклаза влк. Толбачинский, в плагиоклазе и в амфиболе из андезитов Толбачинского вулкана, а также в амфиболе из андезитов и в амфиболе и плагиоклазе из дацитов Ичинского вулкана (рис. 9).

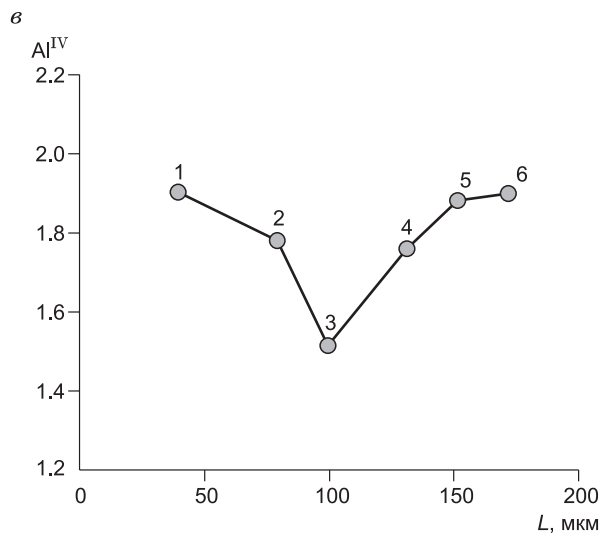
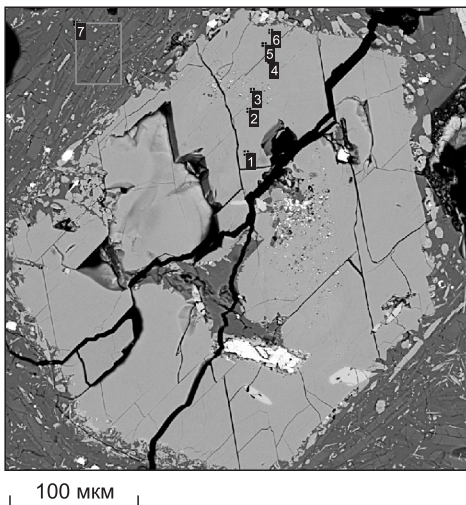
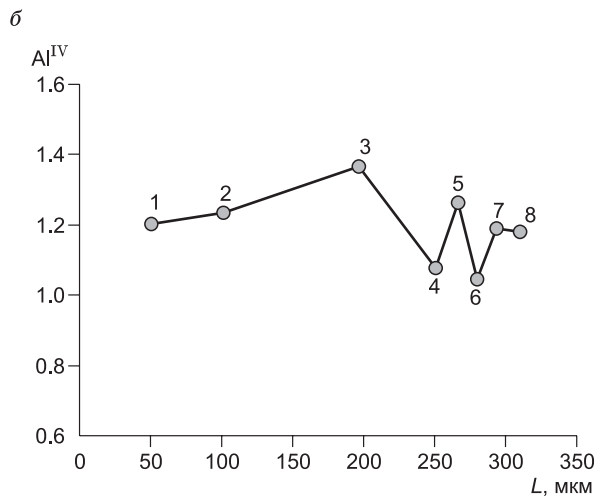
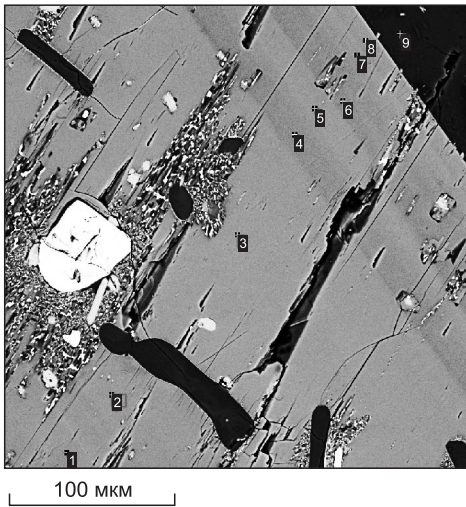
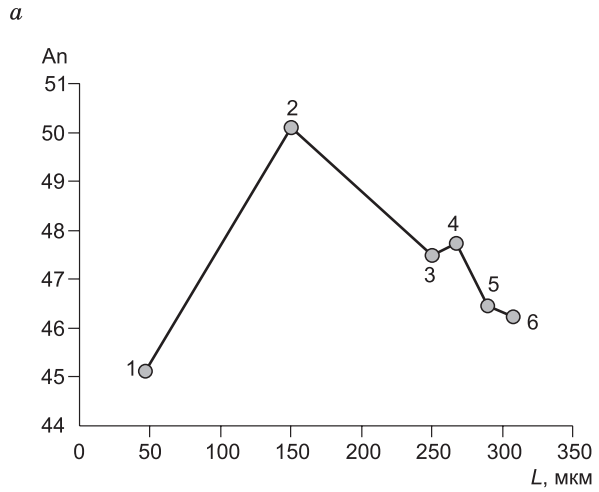
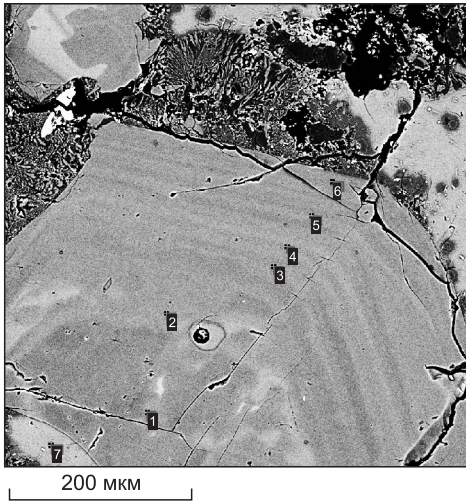
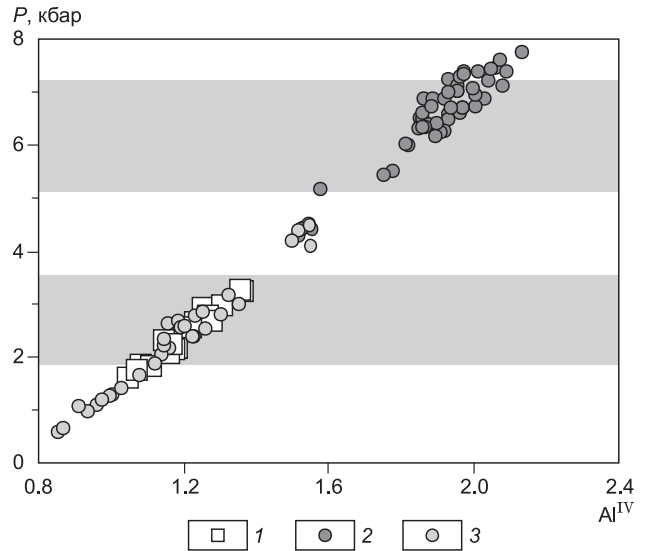


Рис. 6. Изменения составов зональных вкрапленников из эффузивов Толбачинского (*a*, *б*) и Ичинского (*в*) вулканов.

a — плагиоклаз, *б*, *в* — амфибол. An — содержание анортитового компонента в плагиоклазе, Al^{IV} — значения алюминия в четверной координации для амфибола. *L* — расстояние от центра вкрапленника до точки анализа. Цифрами обозначены номера анализов на электронном микроскопе последовательно от центра к краю кристалла.

Рис. 7. Соотношение параметров давления кристаллизации и содержания алюминия в амфиболах из эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов.

1 — андезиты Толбачинского вулкана; 2, 3 — андезиты (2) и дациты (3) Ичинского вулкана. Серым отмечены интервалы давлений для амфиболов из эффузивов влк. Безымянный, Камчатка [Turner et al., 2013].



Первичные включения расплавов (10—40 мкм) равномерно располагаются в объеме кристаллов-лапиллелей плагиоклаза **Толбачинского вулкана**. Формы включений близки к правильным табличкам. Содержат обычно однородное светло-коричневатое стекло и газовый пузырек (см. рис. 9, а). В электронном сканирующем микроскопе видна очень тонкая кайма по границе включения (см. рис. 9, б). Учитывая то, что эта кайма на стенках представляет собой очень незначительную часть включения, состав однородного стекла, заполняющего практически полностью включение,

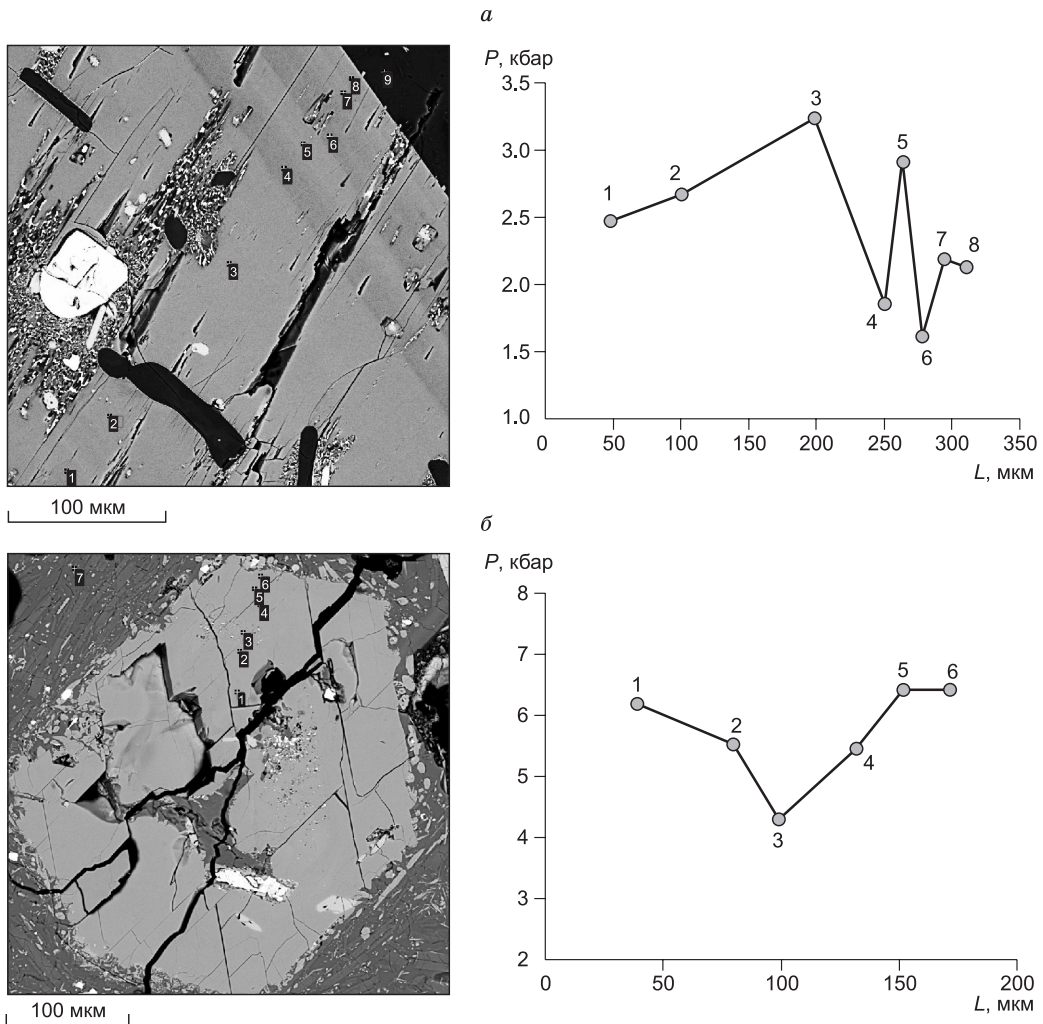


Рис. 8. Изменение давления в процессе кристаллизации зональных вкрапленников амфибола из эффузивов Толбачинского (а) и Ичинского (б) вулканов.

L — расстояние от центра вкрапленника до точки анализа. Цифрами обозначены номера анализов на электронном микроскопе последовательно от центра к краю кристалла.

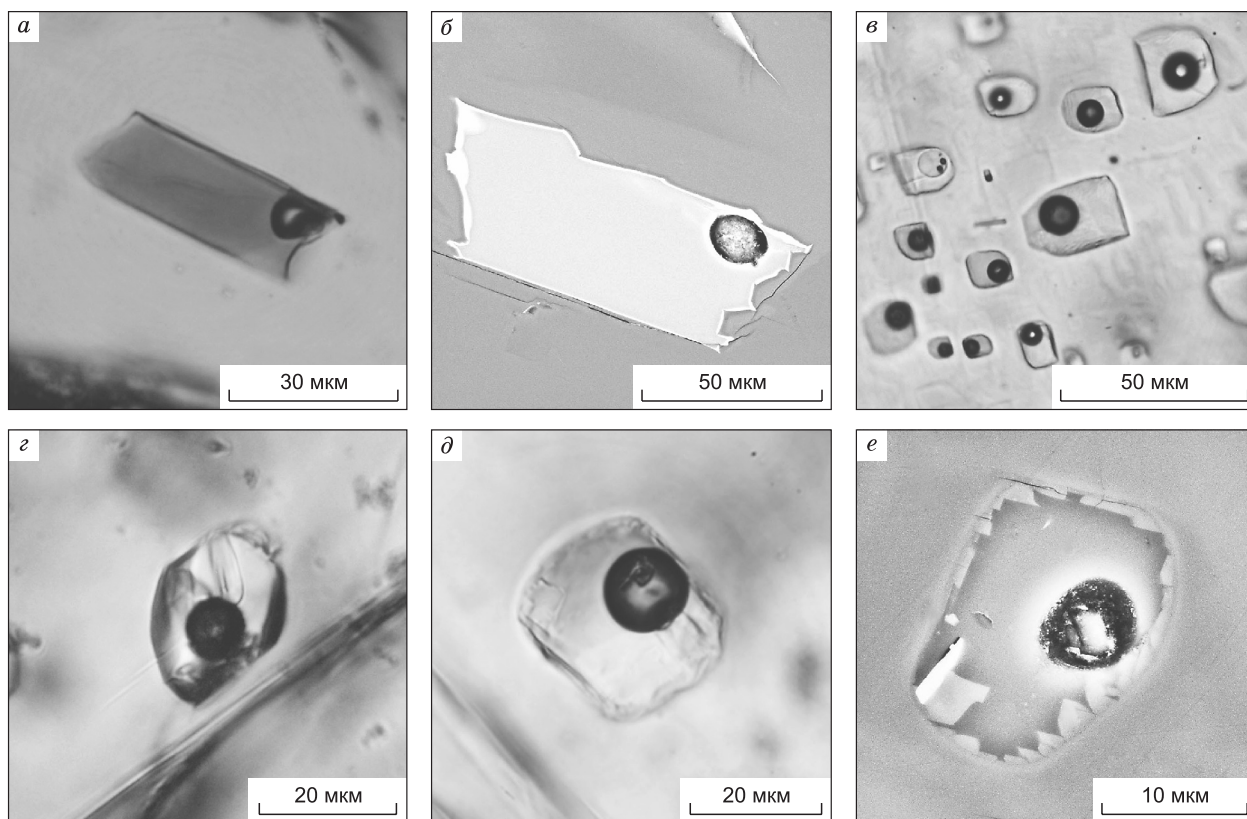


Рис. 9. Фотографии первичных расплавных включений в минералах из эффузивов Толбачинского (а—в) и Ичинского (г—е) вулканов.

а, б — включения гомогенного стекла в кристаллах-лапиллах плагиоклаза (*а* — проходящий свет, *б* — электронный сканирующий микроскоп); *в* — включения в плагиоклазе из андезита; *г* — включение в амфиболе из дацита; *д, е* — включения в плагиоклазе из дацита (*д* — проходящий свет, *е* — электронный сканирующий микроскоп).

должен быть весьма близок к составу расплава, из которого росли и который захватывали в процессе кристаллизации отдельные кристаллы плагиоклаза. Эксперименты в микротермокамере показали, что при нагреве до 900 °С во включениях появляются первые порции расплава. Около 1050 °С по краям включений развивается кайма расплава, а в центре присутствуют уменьшающиеся газовые пузырьки между тающими фазами. Включения становятся полностью гомогенными около 1090—1100 °С. Обращает на себя внимание то, что включения ведут себя при температурах свыше 1000 °С спокойно и, даже находясь вблизи поверхности пластинки, не взрываются, свидетельствуя о незначительном давлении летучих компонентов.

Во вкрапленниках плагиоклаза из андезитов Толбачинского вулкана первичные расплавные включения (5—60 мкм) располагаются полосами по двойникам и согласно зонам роста минерала. Формы двухфазных (стекло + газовый пузырек) включений правильные, изометричные или удлиненные, обычно ограниченные (см. рис. 9, в). При наблюдении с помощью электронного сканирующего микроскопа отмечена тонкая кайма микрокристалликов на стенках включений. В ходе нагрева в микротермокамере тонкая зона расплава по границе включений появляется при температурах около 1050 °С. Значительная часть включений становится гомогенной в районе температур 1170—1220 °С. Как уже было отмечено, что, несмотря на существенные размеры газовых пузырьков (см. рис. 9, в), включения при температурах гомогенизации не взрываются и даже при разгерметизации близповерхностных включений расплав спокойно вытекает. Все это свидетельствует о незначительном давлении флюидов.

Первичные расплавные включения (до 50 мкм) в амфиболе из андезитов влк. Толбачинский обладают равновесными формами с некоторой огранкой и содержат в основном стекло, округлый газовый пузырек и несколько мелких светлых кристаллических фаз. Все эксперименты в микротермокамере с включениями в амфиболе андезитов Толбачинского вулкана (так же как и высокотемпературные опыты с включениями в амфиболах из эффузивов Ичинского вулкана) закончились безрезультатно в связи с потемнением и тотальным плавлением самого минерала при температурах свыше 1000 °С.

Таблица 5. Представительные анализы (мас. %) расплавных включений в минералах из исследованных образцов эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	1a.1	53.67	2.22	14.39	11.71	н.о.	4.45	7.88	2.87	2.22	99.41
2	3.1	54.05	1.91	16.39	9.61	0.19	3.69	6.00	4.05	3.53	99.42
3	4.2	52.29	2.06	15.63	10.14	н.о.	4.03	6.32	3.97	2.87	97.31
4	46.2	53.84	1.85	16.48	9.85	»	3.90	6.17	3.93	3.33	99.35
5	46.3	54.55	2.06	14.17	11.04	0.17	4.49	5.60	3.54	3.62	99.24
6	5.1	53.23	2.04	16.31	10.11	0.17	3.94	6.38	3.79	3.36	99.33
7	5.3	54.04	1.82	16.58	9.65	н.о.	3.97	6.47	3.72	3.15	99.40
8	5.6	53.97	1.89	16.37	9.66	0.26	4.09	5.94	3.72	3.61	99.51
9	6.1	54.57	2.06	15.61	10.46	0.28	3.75	5.70	3.63	3.28	99.34
10	6.3	54.67	2.06	15.31	10.77	0.17	3.89	5.39	3.40	3.76	99.42
11	4a.1	77.50	0.21	13.32	1.67	н.о.	н.о.	0.16	1.80	5.28	99.94
12	4a.3	76.99	0.22	13.23	1.30	»	»	0.39	2.10	5.65	99.88
13	4a.4	72.39	0.82	17.48	2.11	»	0.34	0.30	1.13	5.52	100.09
14	4a.5	73.98	0.38	14.98	1.92	»	0.57	0.88	0.57	6.61	99.89
15	46.2	75.52	0.45	14.03	1.82	»	0.20	0.31	2.07	5.43	99.83
16	8a.1	79.17	0.22	10.32	1.31	»	0.25	0.88	3.63	3.89	99.67
17	8a.2	78.93	0.28	10.26	1.35	»	0.31	0.91	3.56	4.16	99.76
18	8a.3	79.18	0.21	10.30	1.14	»	0.36	0.83	2.83	4.89	99.74
19	8a.4	78.61	0.25	10.57	1.21	»	0.22	0.92	2.97	5.03	99.78
20	106.3	74.10	0.22	13.95	1.12	»	н.о.	1.09	6.30	3.08	99.86
21	11a.1	67.01	0.41	16.36	2.43	»	2.70	4.05	3.80	3.24	100.00
22	11a.2	66.97	0.52	17.08	2.44	»	2.00	3.94	3.81	3.24	100.00
23	116.2	58.57	0.28	19.09	2.38	»	4.56	5.74	6.19	1.68	98.49
24	11c.1	59.59	0.97	19.64	4.32	»	3.01	6.00	2.88	3.15	99.56
25	156.1	65.41	0.46	18.65	1.78	»	1.32	4.06	5.06	2.66	99.40
26	156.2	65.26	0.57	18.52	2.18	»	1.78	4.21	4.39	2.57	99.48
27	9a	75.19	0.24	13.31	0.73	»	0.12	0.65	4.54	4.96	99.73
28	13b	76.88	0.28	12.20	0.79	»	н.о.	0.59	3.89	5.12	99.75
29	14a.2	76.62	0.22	12.47	0.83	»	0.12	0.48	3.94	5.21	99.90
30	14a.1	75.25	0.14	13.20	0.82	»	0.11	0.45	4.39	5.52	99.88
31	14b	69.77	0.14	15.95	0.64	»	н.о.	2.48	5.51	3.25	97.75
32	15b	71.91	0.28	11.10	1.23	»	0.31	0.25	3.24	4.82	93.14
33	15c	76.35	0.15	12.51	0.95	»	0.15	0.50	3.67	5.41	99.70
34	12.4	76.37	0.30	12.18	0.98	»	0.54	2.52	1.94	4.05	98.88
35	2.1	76.83	0.22	12.79	1.07	»	н.о.	0.69	3.25	5.15	100.00
36	2.2	76.93	0.26	12.73	1.07	»	»	0.72	3.27	4.96	99.94
37	2.5	76.86	0.22	12.63	1.05	»	»	0.67	3.34	5.15	99.92
38	12.3	76.34	0.35	13.38	0.77	0.22	0.14	0.67	2.99	5.15	100.01
39	12.5	76.65	0.25	12.85	0.95	н.о.	н.о.	0.76	3.53	5.00	99.99
40	12.7	75.46	0.29	13.00	0.84	»	0.21	1.49	3.06	5.09	99.44

Примечание. 1—10 — включения гомогенного стекла в кристаллах-лапиллях плагиоклаза Толбачинского вулкана (обр. 1); 11—20 — стекла включений в амфиболе (11—15) и плагиоклазе (16—20) из андезита Толбачинского вулкана (обр. 7); 21—26 — стекла включений в амфиболе из андезита Ичинского вулкана (обр. 1405); 27—40 — валовые составы включений в плагиоклазе (27—33); стекла включений в амфиболе (34—40) из дацита Ичинского вулкана (обр. 1402). н.о. — ниже предела определения. Электронный сканирующий микроскоп.

Таблица 6. Представительные анализы (мас. %) стекол матрикса в андезите и в даците Ичинского вулкана

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
1	15д.1	66.92	0.24	18.64	1.60	н.о.	0.48	4.38	4.85	2.89	100.00
2	15д.2	66.71	0.21	17.93	2.22	»	0.97	4.27	4.74	2.96	100.01
3	15д.3	67.04	0.35	17.39	2.48	»	0.96	4.13	4.75	2.91	100.01
4	8.7	68.09	0.24	17.82	1.71	»	0.59	3.81	4.73	3.02	100.01
5	12.6	76.48	0.34	13.03	0.91	»	0.19	0.76	3.13	5.17	100.01
6	12.8	76.00	0.30	13.21	0.94	»	0.16	0.87	4.08	4.45	100.01
7	15а.1	77.55	0.40	12.33	0.90	»	н.о.	0.40	3.24	5.18	100.00
8	15а.2	78.03	0.39	12.08	0.78	»	»	0.45	3.13	5.15	100.01
9	15а.3	77.80	0.40	12.11	0.80	»	»	0.50	3.27	5.12	100.00
10	15а.4	75.89	0.30	13.21	0.98	»	0.15	1.01	3.97	4.47	99.98
11	15а2.3	78.24	0.29	12.06	0.73	»	н.о.	0.46	3.17	5.05	100.00

Примечание. 1—11 — стекло матрикса в андезите (1—4, обр. 1405) и в даците (5—11, обр. 1402) Ичинского вулкана. н.о. — ниже предела определения. Электронный сканирующий микроскоп.

В амфиболе из андезитов **Ичинского вулкана** первичные расплавные включения (10—20 мкм) обладают обычно отчетливой огранкой и содержат главным образом стекло и круглый газовый пузырек.

В случае дацитов Ичинского вулкана в амфиболах найдены первичные расплавные включения (10—50 мкм), содержащие светлое стекло и газовый пузырек (см. рис. 9, з).

Плагиоклазы дацитов Ичинского вулкана содержат первичные включения расплава (10—70 мкм), располагающиеся равномерно или полосами вдоль двойников. Формы включений равновесные, с определенной огранкой (см. рис. 9, д). Основной объем включений занимает стекло с круглым газовым пузырьком. Как показали исследования с помощью электронного сканирующего микроскопа, во включениях также находится целый ряд мелких кристаллических фаз (см. рис. 9, е). В ходе высокотемпературных экспериментов около 1000 °С во включениях появляется расплав. При 1090 °С уменьшаются газовые пузырьки и кристаллические фазы. Температуры полных гомогенизаций составляют около 1110—1155 °С. Судя по спокойному поведению включений при температурах гомогенизации и сохранности при этих параметрах крупных (до 65 мкм) включений, давление летучих компонентов (и, прежде всего, воды) было относительно небольшим.

Анализ стекол (табл. 5) и кристаллических микрофаз во включениях, а также стекол матрикса (табл. 6) с помощью электронного сканирующего микроскопа позволил выяснить особенности химического состава расплавов, из которых кристаллизовались эффузивы Толбачинского и Ичинского вулканов. В основном использовались данные по составам стекол, но в отдельных случаях (см. рис. 9, е), зная составы всех фаз, удавалось подсчитать валовой состав включений (см. табл. 5).

Стекла включений в кристаллах-лапиллях плагиоклаза Толбачинского вулкана по своему составу близки к базальтам и располагаются обычно на окончании базальтовых трендов этого вулкана, показывая относительно обогащение титаном, железом и калием (рис. 10). Данные по включениям в плагиоклазе из андезитов влк. Толбачинский свидетельствуют о существовании расплавов с высокими SiO₂ и K₂O при формировании этих пород. В целом реальность установленного нами по включениям для Толбачинского вулкана широкого диапазона состава расплавов от базальтов до дацитов и риолитов вступает в противоречие с отсутствием кислых извержений на Толбачике, но подтверждается данными других исследователей расплавных включений для вулканов Камчатки (рис. 10). В то же время проблема, почему на Толбачинском вулкане более кислые породы, чем андезибазальты в потоках и в дайках, не проявлены, требует дальнейшего рассмотрения.

В случае Ичинского вулкана расплавные включения свидетельствуют об участии андезитового расплава при кристаллизации андезитов и дацитового расплава при формировании дацитов. Наблюдается в целом эволюция расплава с падением титана, железа, кальция и с увеличением калия на фоне роста SiO₂, хорошо совпадающая с трендами для пород этого вулкана (см. рис. 10).

Необходимо отметить, что расплавные включения с высокими содержаниями SiO₂ (68—78 мас. %), не имеющие аналогов среди пород (см. рис. 4, 5, 10), свидетельствуют о появлении в надсубдукционных камерах фактически риолитовых расплавов, которые наблюдаются и в древних зонах субдукции. В частности, подобные включения с кислыми расплавами отмечены нами для палеоостроводужных комплексов Рудного Алтая (см. рис. 10). По данным предыдущих исследователей, риолитовые составы характерны также для расплавных включений во вкрапленниках андезитов Курило-Камчатского региона. Изучение этих включений из минералов вулканов Курильской дуги и Камчатки показало, что их состав

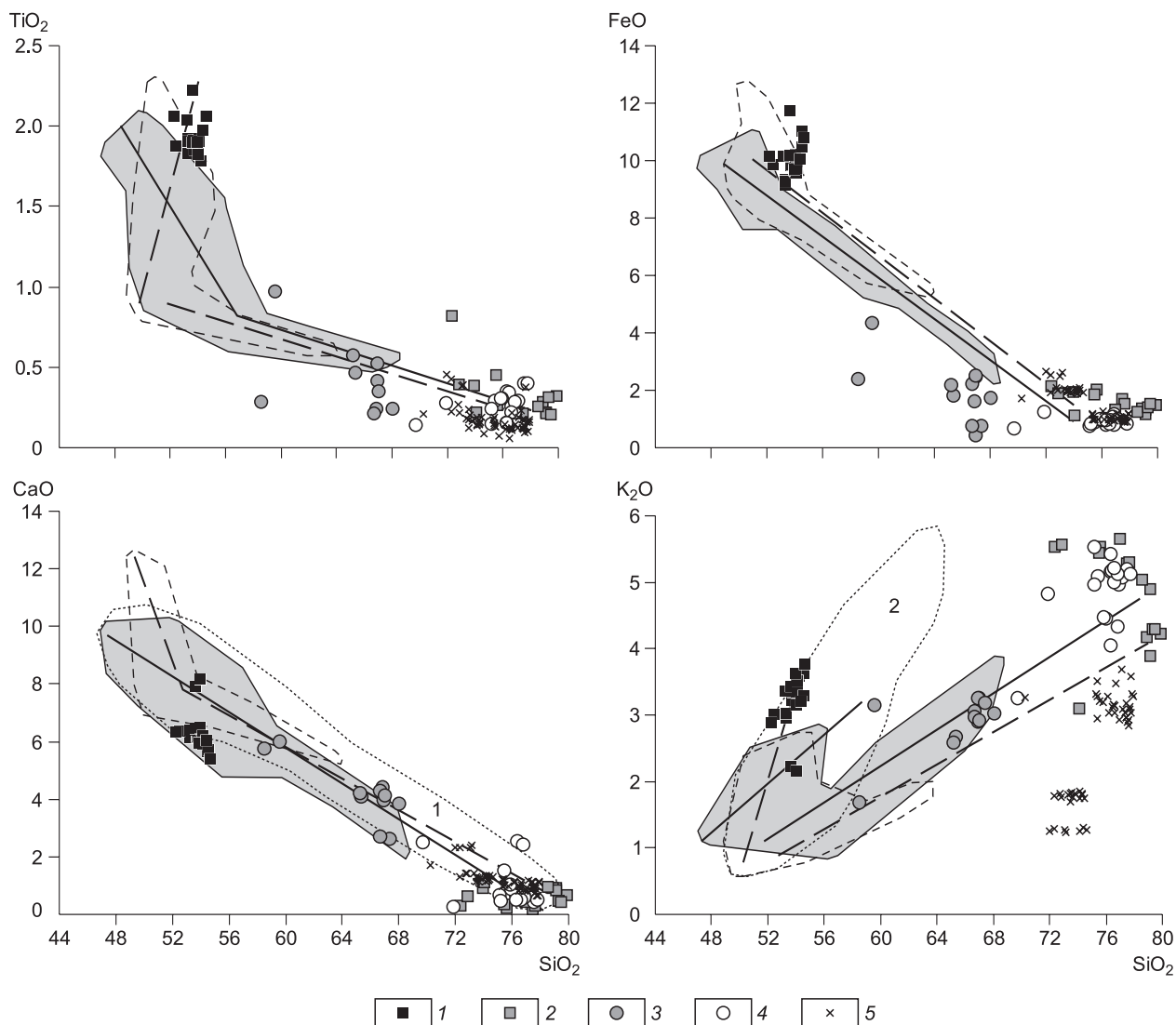


Рис. 10. Вариационные диаграммы (мас. %) для расплавных включений в минералах из эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов.

1 — включения гомогенного стекла в кристаллах-лапиллях плагиоклаза Толбачинского вулкана; 2 — стекла включений в амфиболе и плагиоклазе из андезита Толбачинского вулкана; 3 — стекла включений в амфиболе и стекловатый матрикс в андезите Ичинского вулкана; 4 — валовые составы включений в плагиоклазе, стекла включений в амфиболе и в матриксе в даците Ичинского вулкана; 5 — стекла расплавных включений в кварце из эффузивов палеозон субдукции Рудного Алтая. Поля данных по эффузивам отмечены штриховой (влк. Толбачинский) и сплошной (Ичинский) линиями. Тренды пород и расплавных включений: Толбачинский — штриховая, Ичинский — сплошная линии. Цифры на диаграммах: 1 — поле расплавных включений в минералах из эффузивов влк. Камбальный, Камчатка, 2 — поле эффузивов влк. Уксичан, Камчатка. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с добавлением материалов из работ [Тетрова, Плечов, 2000; Давыдова, 2014] и базы данных GEOROC (<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>).

вы сильно варьируют по содержанию SiO_2 (от 56 до 80 мас. %), причем с ростом кремнезема закономерно уменьшаются содержания Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO и увеличиваются значения Na_2O и K_2O (до 3.8—6.8 мас. %) [Толстых и др., 2003]. Эти опубликованные данные хорошо согласуются с результатами наших исследований расплавных включений в минералах из эффузивов вулканов Толбачинский и Ичинский. Важно, что полученные составы кислых стекол отличаются максимальными содержаниями K_2O (до 5.7 мас. %), что было отмечено и ранее [Толстых и др., 2003].

Полученные результаты исследования состава расплавных включений дали возможность уточнить температурный режим кристаллизации эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов в ходе сравнительного анализа с данными по температурам гомогенизации включений. Расчетное моделирование температур ликвидусной кристаллизации минералов проводилось по программе PETROLOG [Dany-

ushevsky, Plechov, 2011] на основе информации по стеклам и валовым составам включений. Давление при расчетах задавалось в основном в соответствии с данными, полученными с помощью амфиболовых барометров (см. выше). При оценке содержаний воды в расплавах учитывалась информация, полученная при экспериментах по гомогенизации, об относительно невысоких флюидных давлениях во включениях. В связи с этим для базальтоидных магм (из которых формировались кристаллы-лапиллы плаггиоклаза) задавалось 0.5 мас. % H_2O , а для более кислых расплавов (из которых кристаллизовались амфиболы и плаггиоклазы) расчеты проводились при содержаниях воды 2 и 0.5 мас. %.

В результате моделирования было выяснено, что расчетные ликвидусные температуры формирования отдельных кристаллов-лапилл плаггиоклаза влк. Толбачинский составляют 1075—1115 °С, что фактически совпадает с данными по температурам гомогенизации расплавных включений (1090—1100 °С) и согласуется с результатами непосредственных замеров температур лавовых потоков, излившихся в течение последних месяцев (июнь—июль 2013 г.) основной стадии извержения 2012—2013 гг. — до 1080 °С [Belousov et al., 2015]. В то же время полученные параметры меньше замеренных температур лавы, извергавшейся на Толбачике в феврале—марте 2013 г., — 1060—1160 °С [Савельев, 2015].

Моделирование на основе данных по составам стекол включений в амфиболе и в плаггиоклазе показало следующие расчетные ликвидусные температуры кристаллизации андезитов Толбачинского вулкана: 1035—1085 °С (при 2.0 мас. % H_2O) и 1045—1155 °С (при 0.5 мас. % H_2O). Эти параметры существенно ниже, чем температуры гомогенизации включений в плаггиоклазе из этих пород — 1170—1220 °С.

В случае андезитов Ичинского вулкана составы стекол включений были изучены только для амфибола. На основе этих данных получены следующие расчетные температуры ликвидусной кристаллизации: 1100—1190 °С (при 2 мас. % H_2O) и 1160—1225 °С (при 0.5 мас. % H_2O).

Для дацитов Ичинского вулкана моделирование проводилось на основе данных по составам включений в амфиболе и в плаггиоклазе. Расчеты по стеклам включений в амфиболе показали следующие температуры ликвидусной кристаллизации: 1030—1060 °С (при 2 мас. % H_2O) и 1030—1120 °С (при 0.5 мас. % H_2O). Моделирование на основе данных по валовым составам включений в плаггиоклазе свидетельствует о близких расчетных температурах кристаллизации (полученных при содержании H_2O = 2.0 и 0.5 мас. %), попадающих в интервал около 1050—1135 °С. Сравнение с экспериментальными данными показало сходство максимальных расчетных температур (1120—1135 °С) с температурами гомогенизации включений в плаггиоклазе из дацитов Ичинского вулкана (1110—1155 °С).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования и полученные новые данные по минералам и расплавным включениям позволили выяснить физико-химические параметры расплавов, существовавших в промежуточных камерах под вулканами Толбачинский и Ичинский (Камчатка).

На основе всесторонних исследований расплавных включений с использованием метода гомогенизации и расчетного моделирования получен значительный объем новой информации о температурных режимах кристаллизации эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов.

В случае кристаллов-лапилл плаггиоклаза из влк. Толбачинский температуры гомогенизации расплавных включений (1090—1100 °С) фактически совпадают с результатами расчетного моделирования (1075—1115 °С), проведенного на основе данных по химическому составу этих включений. В целом мы можем вполне обоснованно говорить о том, что рассмотренные плаггиоклазы кристаллизовались при температурах 1075—1115 °С.

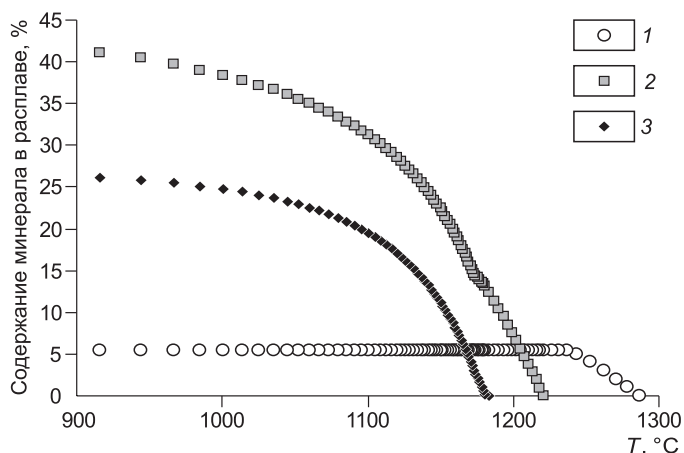
Для андезитов Толбачинского вулкана температуры гомогенизации включений в плаггиоклазе (1170—1220 °С) заметно выше расчетных параметров (1020—1160 °С). С учетом того, что для подобных пород Ичинского вулкана (см. далее) расчеты показали температуры (1100—1225 °С), совпадающие с данными по гомогенизации включений влк. Толбачинский, можно предположить достаточно широкий интервал кристаллизации толбачинских андезитов (1020—1220 °С). При этом стекла с более низкими температурами характеризуют, скорее всего, условия формирования пробки над промежуточными камерами.

В случае андезитов Ичинского вулкана (как уже отмечалось выше) мы имеем только расчетные данные по расплавным включениям — 1100—1225 °С. Для дацитов Ичинского вулкана температуры гомогенизации включений в плаггиоклазе (1110—1155 °С) в значительной мере совпадают с расчетными параметрами (1030—1135 °С). В итоге можно говорить о следующем вполне достоверном интервале температур кристаллизации минералов дацитов — 1030—1155 °С.

Исследования составов минералов и расплавных включений дали возможность выяснить не только температурный режим, но и установить параметры давлений кристаллизации расплавов Толбачинского и Ичинского вулканов в разноглубинных промежуточных камерах. В частности, минералы анде-

Рис. 11. Фракционная кристаллизация базальтовых расплавов в нижней (около 21 км) промежуточной камере Толбачинского вулкана.

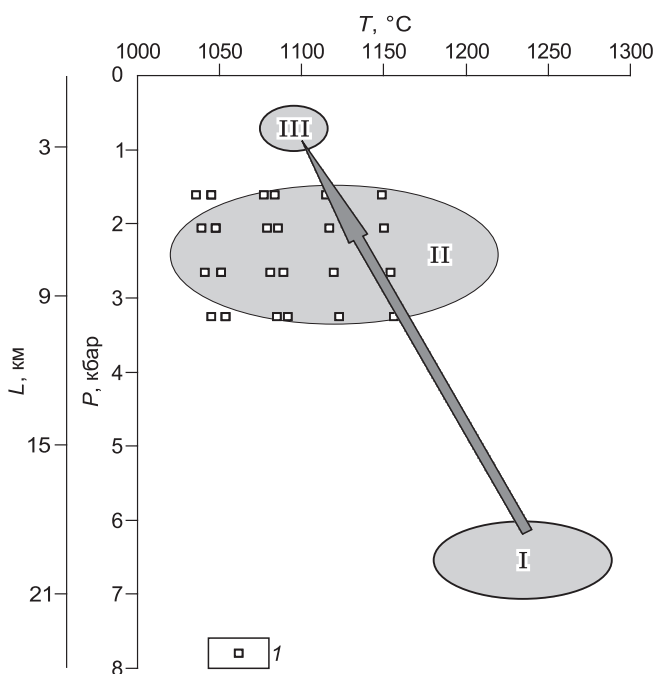
1 — оливин, 2 — клинопироксен, 3 — плагиоклаз. При расчетном моделировании использована программа PLUTON [Лавренчук, 2004].



зитов влк. Толбачинский формировались при минимальных давлениях 3.3—1.6 кбар. Для Ичинского вулкана установлено три интервала давлений: 7.5—6.0, около 4.5, 3.2—1.0 кбар (см. рис. 7). Таким образом, для этого вулкана выделяются три камеры (на глубинах 23—18, около 14 и 9—3 км), которые в целом согласуются с данными о трех уровнях промежуточных очагов (около 25—30 км вблизи нижней границы коры и малоглубинных очагов: 10—15 и 2—5 км) [Иванов, 2008; Добрецов, 2010; Добрецов и др., 2012, 2015]. При этом необходимо отметить, что установленные нами с помощью анализа минералов и расплавных включений параметры давлений формирования андезитов Толбачинского и Ичинского вулканов (1.6—7.5 кбар) существенно выше данных по андезитам других вулканов (в частности, влк. Шивелуч — 0.4—1.6 кбар), полученных по флюидным включениям CO₂ в плагиоклазах [Толстых и др., 2003].

Анализ зональных вкрапленников амфибола позволил расшифровать особенности изменения давления при кристаллизации расплавов на разных глубинах. Было выяснено, что в верхних промежуточных камерах (с давлением 3.3—1.6 кбар, как в случае влк. Толбачинский, см. рис. 8) постепенное повышение давления (обусловленное, скорее всего, стационарным состоянием системы в герметичном объеме) сменяется резким падением и последующими флуктуациями параметров, что связано с раскрытием камеры — трещинообразованием в динамически активных приповерхностных горизонтах коры. В более глубоких очагах (с давлением до 7.5 кбар, как в случае влк. Ичинский, см. рис. 8) изменения параметров совершенно иные — давление постепенно падает, а затем равномерно растет. Таким образом, ситуация на глубинах около 23 км более спокойная и диаметрально противоположная по сравнению с верхними камерами (9—3 км).

Совместное использование расчетных температур (полученных на основе данных по расплавным включениям с помощью программы PETROLOG) и расчетных давлений (на основе данных по составам амфиболов) позволило выяснить эволюцию параметров кристаллизации эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов при подъеме расплавов в верхние горизонты.



В случае влк. Толбачинский было выяснено, что кристаллы-лапиллы плагиоклаза образовывались при температурах 1075—1115 °C и в условиях низких (до 1 кбар) давлений на глубине 2—3 км. Кристаллизация минералов андезитов происходила при более широких параметрах (1220—1020 °C и 3.3—1.6 кбар) в промежуточной камере на глубинах до 10 км. Источником расплавов, кристаллизовавшихся на отмеченных выше уровнях, послужили, скорее всего, очаги базальтовой магмы, хорошо фиксируемые геофизическими методами на глубинах 18—

Рис. 12. Параметры расплавов Толбачинского вулкана в промежуточных разноглубинных камерах.

I — данные по расплавным включениям и минералам из андезитов Толбачинского вулкана. I—III — разноглубинные промежуточные камеры с базальтовым (I, III) и андезитовым (II) расплавами. Стрелка — эволюция базальтовых расплавов.

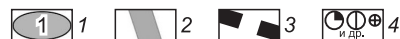
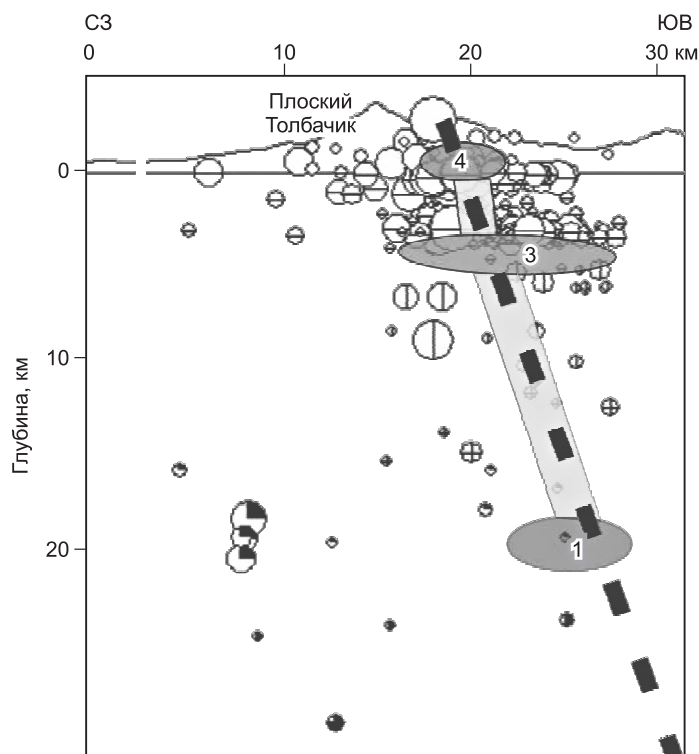
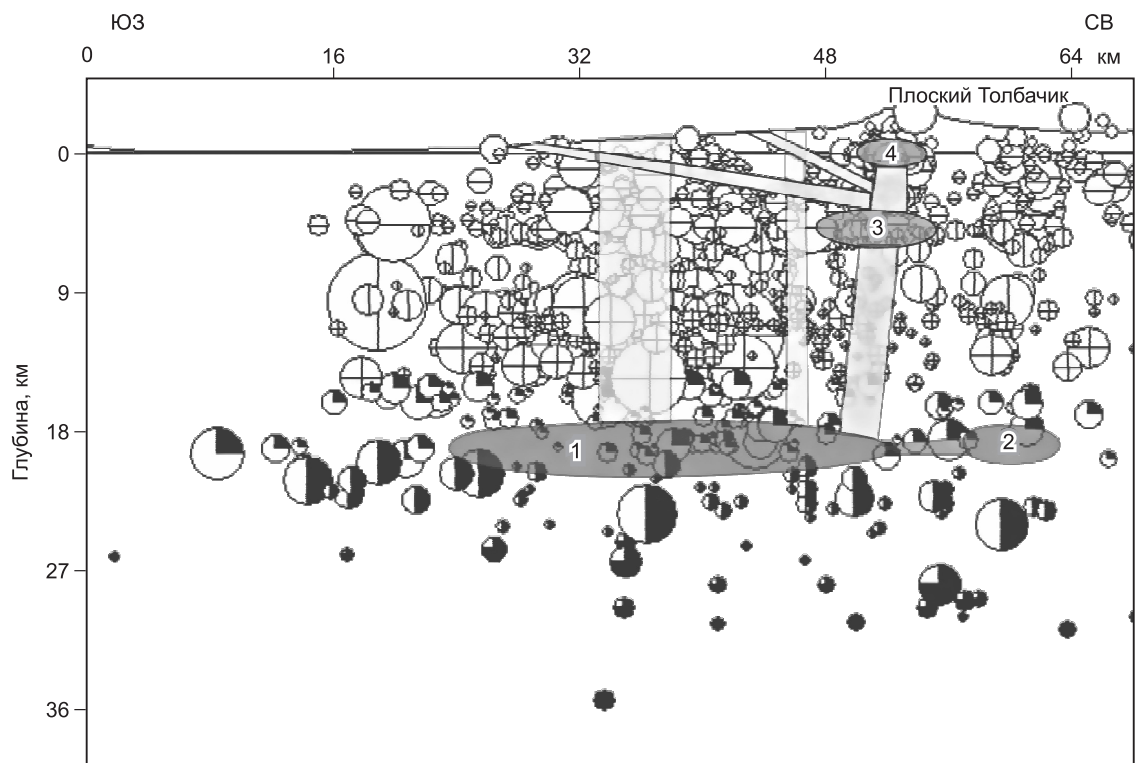


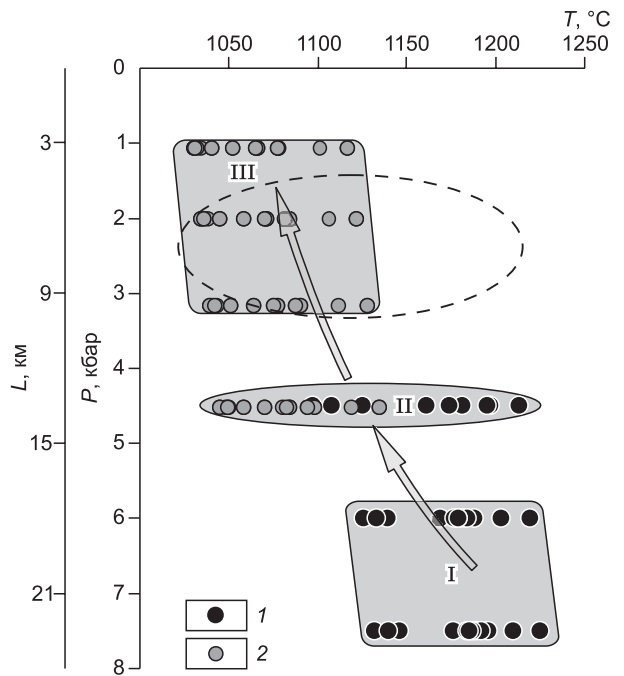
Рис 13. Сейсмические данные о зонах накопления (резервуарах) магмы под влк. Толбачинский.

1 — зоны накопления (резервуары) магмы; 2 — зоны подъема магмы; 3 — глубинный разлом; 4 — гипоцентры землетрясений различной глубины и мощности. Цифрами отмечены отдельные резервуары магмы. Рисунок составлен на основе рис. 9 из работы [Belousov et al., 2015].

20 км [Belousov et al., 2015]. Температуры и особенности кристаллизации базальтовых расплавов в этих камерах (при давлении до 7 кбар) были оценены с помощью программы PLUTON [Лавренчук, 2004]. За основу взят состав базальта (с максимумом MgO = 11 мас. %), находящегося в начале тренда эффузивов вулкана Толбачинский (см. рис. 4). В результате выяснено, что температуры расплавов в этой нижней камере были как минимум 1290 °С. Около 1280 °С начинает кристаллизоваться оливин, а затем (при 1220 °С) — клинопироксен. Наиболее низкотемпературным минералом в данной камере (начало кристаллизации около 1180 °С) является плагиоклаз (рис. 11). В целом для влк. Толбачинский устанавливаются три промежуточных камеры на глубинах 21—18, 10—5 и менее 3 км (рис. 12). Эти параметры

Рис. 14. Параметры расплавов Ичинского вулкана в промежуточных разноглубинных камерах.

1, 2 — данные по расплавленным включениям и минералам из андезитов (1) и дацитов (2) Ичинского вулкана. I—III — разноглубинные промежуточные камеры. Стрелками показана эволюция параметров магматических систем при подъеме расплавов и последовательной кристаллизации андезитов и дацитов Ичинского вулкана. Штриховой линией отмечена промежуточная камера с андезитовым расплавом Толбачинского вулкана (данные по расплавленным включениям и минералам).



хорошо согласуются с имеющимися геофизическими данными (рис. 13), свидетельствующими о трех уровнях накопления (резервуарах) магмы под влк. Толбачинский на глубинах около 20, 5 и около 0 км [Belousov et al., 2015].

Для Ичинского вулкана также устанавливаются три уровня промежуточных камер. На глубинах до 23 км и температурах до 1225 °С происходило формирование андезитов. В промежуточной камере (на глубинах около 14 км) при падении температуры до 1135—1045 °С в результате дифференциации андезитовых магм образовывались дацитовые расплавы. На самых верхних горизонтах (9—3 км) при температурах 1130—1030 °С кристаллизовались дациты. Сравнивая с отмеченными выше данными, видим, что андезиты Ичинского вулкана (изливавшиеся в массовом количестве) формировались на гораздо более глубинных уровнях, чем аналогичные породы Толбачинского вулкана (рис. 14), присутствующие только в бомбах.

В целом наши данные по Ичинскому вулкану свидетельствуют о кристаллизации на нижних уровнях андезитовых магм, а на самых высоких — дацитовых расплавов. Очень важным является промежуточный очаг на глубинах около 14 км, в пределах которого и происходила дифференциация расплавов с последовательной сменой андезитов дацитами. Для оценки достоверности отмеченных процессов дифференциации в этой камере было проведено моделирование фракционирования расплавов с помощью программы PLUTON [Лавренчук, 2004]. За основу был взят состав детально изученного нами обр. 1405 андезита (59.91 мас. % SiO₂, 2.44 мас. % MgO). Давления задавались соответственно глубине камеры — 4.5 кбар. Содержание воды в расплаве изменялось от 1 до 3 мас. %. На рис. 15, а видна интенсивная кристаллизация плагиоклаза при температурах, установленных нами с помощью расплавленных

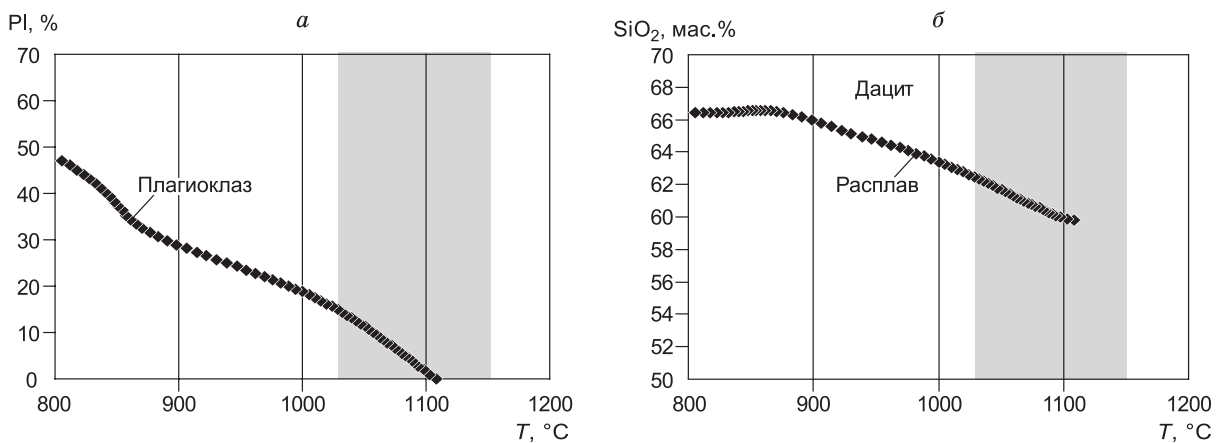


Рис. 15. Фракционная кристаллизация в промежуточной камере андезитовых расплавов с формированием дацитов Ичинского вулкана.

Показан рост содержания плагиоклаза (а) и SiO₂ (б) в ходе фракционирования андезитового расплава при снижении температуры в промежуточной камере II (см. рис. 14) на глубинах около 14 км. Интервалы температур кристаллизации дацитов Ичинского вулкана (полученные на основе данных по расплавленным включениям) отмечены серым цветом. При расчетном моделировании использована программа PLUTON [Лавренчук, 2004].

включений, начиная с 1105 °С. При снижении до 1000—980 °С фракционирующий расплав становится дацитовым по своему составу (см. рис. 15, б). В целом проведенное расчетное моделирование на основе составов пород Ичинского вулкана с использованием данных по составам минералов (оценено давление) и по расплавленным включениям (определены температуры) показало реальность процессов фракционирования в промежуточных камерах при подъеме магм.

Исследования расплавленных включений свидетельствуют о том, что минералы из эффузивов Толбачинского и Ичинского вулканов в ходе своего роста захватывали микропорции расплавов, отвечающих по своему составу широкому спектру пород: базальты—андезибазальты—андезиты—дациты—риодациты. По этим характеристикам рассмотренные вулканы в целом не отличаются от вулканов Камчатки, изученных ранее другими исследователями. В частности, данные по расплавленным включениям в минералах влк. Камбальный [Тетроева, Плечов, 2000] хорошо согласуются с результатами наших работ. Также ранее было установлено, что составы расплавленных включений во вкрапленниках андезитов Курило-Камчатского региона сильно варьируют по содержанию SiO₂ (от 56 до 80 мас. %), причем большая часть (~80 %) стекол включений имеет дацитовый и риолитовый состав [Толстых и др., 2003]. В то же время необходимо отметить, что в случае каждого вулкана (как видно на рис. 10 для вулканов Толбачинский, Камбальный, Ичинский, Уксичан) ситуация достаточно специфична.

Составы гомогенных стекол расплавленных включений в кристаллах-лапиллях плагиоклаза влк. Толбачинский свидетельствуют об их формировании из продифференцированных базальтовых расплавов, обогащенных титаном и калием. При кристаллизации андезитов этого вулкана принимали участие риодацитовые магмы. Но лав такого состава не обнаружено, т. е. это только интерстиционные расплавы. В то же время андезиты Ичинского вулкана (судя по составам включений) кристаллизовались при участии расплавов, эволюционирующих от андезитов до дацитов. Собственно дациты Ичинского вулкана содержат следы риодацитовых расплавов и тоже лишь в интерстициях. При этом необходимо отметить, что как в случае андезитов, так и для дацитов расплавленные включения близки по химизму к составу стекловатого матрикса, в котором располагаются вкрапленники минералов с включениями. Таким образом, расплавленные включения несут информацию о составах главным образом интеркумулусных расплавов, ответственных за кристаллизацию последних вкрапленников и за состав матрикса в андезитах и дацитах Ичинского вулкана.

Было выяснено, что в диапазоне базальтов и андезибазальтов (SiO₂ = 48—57 мас. %) тренд эффузивов Ичинского вулкана близок к расчетной траектории дифференциации родоначальных магм влк. Уксичан. Таким образом, намечается сходство процессов эволюции магматических систем этих двух вулканических структур. В то же время в области андезитов (SiO₂ свыше 57 мас. %) породы Уксичана в значительно большей степени обогащены калием (см. рис. 10).

В целом полученные данные по вулканам Толбачинский и Ичинский, а также опубликованная информация по другим вулканам Камчатки [Тетроева, Плечов, 2000; Давыдова, 2014; и др.] подтверждают мнение, что дифференциация магм и формирование вулканических пород в зонах субдукции происходит преимущественно в промежуточных камерах. Отличия заключаются в том, что дифференциация в очаге на глубине 23—30 км происходит с участием оливина (или пироксена) и магнетита (как это показано нами для нижней промежуточной камеры влк. Толбачинский, см. рис. 11), в малоглубинных очагах (9—15 км) — с участием амфибола и плагиоклаза, а на глубине 2—5 км — почти исключительно плагиоклаза. Детали этих процессов могут быть индивидуальными в каждом вулкане.

Нерешенной проблемой остается принципиальное отличие базальтовых вулканов (например Ключевской группы) от дифференцированных (Ичинский) и андезитовых (Безымянный и Шивелуч). В влк. Толбачинский на 10 тыс. лет при средней частоте в 20 лет (5 раз за 100 лет) произошло около 500 извержений и ни разу не зафиксированы андезиты (с содержанием SiO₂ более 56 мас. %).

Возможная модель, объясняющая это явление, — образование исходных базальтовых расплавов на глубине 50—80 км при взаимодействии глубинных расплавов или флюидов, исходящих из зон субдукции, с перидотитами «горячей мантии» при температурах 1400—1450 °С [Добрецов и др., 2013]. Образующийся базальтовый расплав изначально обеднен H₂O и дополнительно теряет ее в промежуточных камерах. На поверхность прорываются только базальтовые расплавы с температурой около 1160 °С — наиболее высокотемпературные лавы Толбачинского извержения. Более кислые и вязкие расплавы (начиная с андезита) остаются в промежуточных камерах, формируя «пробки», силлы, линзы, обогащенные плагиоклазом.

Под андезитовыми вулканами располагается очаг на глубинах 100—150 км, где из субстрата (эклогит + метаосадки) формируется обогащенный H₂O андезитовый расплав, имеющий возможность прорваться прямо на поверхность, не успевая потерять воду в промежуточных камерах [Иванов, 2008; Добрецов и др., 2013, 2015]. Высокая вязкость и невозможность изливаться проявляется, начиная с дацитов, которые часто формируют дацитовые купола. Лавы дацитов и риолитов выбрасываются преимущественно при массовых «кальдерных» извержениях, образуя большие игнимбритовые поля. Такая ста-

дия происходит редко — на Камчатке последний раз около 50 тыс. л.н. [Действующие вулканы..., 1991; Лаверов и др., 2005; Гордеев, Карпов, 2012]. К сожалению, породы этой группы изучены совершенно недостаточно.

Особую проблему составляют высокие содержания K_2O в базальтах вулканов Ичинский и Уксичан. Продукты извержения влк. Уксичан представлены калиевыми трахибазальтами, которые для наиболее магнезиальных базальтов (с $MgO = 10$ мас. %) содержат 3.5 мас. % K_2O и 50 мас. % SiO_2 [Давыдова, 2014]. Подобные, но несколько менее калиевые, породы присутствуют и в влк. Ичинский, но, к сожалению, эта группа пород осталась за рамками наших исследований минералов и стекловатых включений.

Такая же тенденция проявлена и на влк. Толбачинский, где в отличие от Ключевского вулкана выявлена группа базальтов с содержанием TiO_2 более 1.4 мас. % и K_2O более 1.5 мас. % (см. рис. 4, 10). Обогащение калием в наибольшей степени проявлено (как и в Ичинском вулкане) в кислых стекловатых включениях в андезитах. Однако самостоятельных излияний высококалиевых базальтов на влк. Толбачинский не обнаружено. Возможно, излияние щелочных базальтов можно ожидать в будущем. На диаграммах TiO_2-SiO_2 , $MgO-SiO_2$, K_2O-SiO_2 (см. рис. 4) показаны предполагаемые линии смешения, которые меняют составы исходных расплавов в камере, но не меняют существенно линии их кристаллизационной дифференциации. Именно к такому типу могут относиться дифференцированные вулканы Ичинский и Уксичан.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате исследования плагиоклазов, амфиболов и расплавных включений установлены физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах вулканов, представляющих различные типы субдукционного магматизма Камчатки: молодые базальтовые системы влк. Толбачинский (Ключевская группа) и древний влк. Ичинский (Срединный хребет) с чередованием базальтовых и кислых извержений.

2. В случае влк. Толбачинский было выяснено, что кристаллы-лапиллы плагиоклаза образовывались из базальтовых расплавов при температурах 1075—1115 °С и в условиях низких (до 1 кбар) давлений на глубине 2—3 км. Кристаллизация минералов андезитов происходила при более широких параметрах (1220—1020 °С и 3.3—1.6 кбар) в промежуточной камере на глубинах до 10 км. Источником расплавов, кристаллизовавшихся на отмеченных выше уровнях, послужили, скорее всего, очаги базальтовой магмы (хорошо фиксируемые геофизическими методами на глубинах 18—20 км) с минимальными температурами около 1290 °С.

3. Для Ичинского вулкана устанавливаются три уровня промежуточных камер. На глубинах до 23 км и температурах до 1225 °С происходило формирование андезитов. В промежуточной камере (14 км) при 1135—1045 °С в результате дифференциации андезитовых магм образовывались дацитовые расплавы. На самых верхних горизонтах (9—3 км) при температурах 1130—1030 °С формировались дациты.

4. Выясняется общее сходство процессов дифференциации в промежуточных камерах вулканов Камчатки. В то же время для каждого вулкана характерны свои специфические особенности магматизма, как в случае последних (2012—2013 гг.) извержений высокотемпературных лав влк. Толбачинский, насыщенных, скорее всего, не водой, а сернисто-хлористыми и, возможно, восстановленными газами.

5. Происхождение и дифференциация лав базальтовых (Толбачинский) вулканов отличается от вулканов со значительной ролью андезитов (Ичинский). В первом случае глубинные базальтовые магмы, образующиеся в надсубдукционной «горячей мантии», изначально обеднены H_2O , и возникающие в промежуточных камерах андезитовые дифференциаты не могут прорваться на поверхность из-за высокой вязкости. В случае вулканов другого типа андезитовые расплавы, содержащие больше воды и поэтому менее вязкие, легко проникают в верхние горизонты.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН С.А. Чиркову, С.А. Хубуная и В.В. Пантелеевой за предоставленные для исследования образцы, а также рецензентам А.Э. Изоху и А.Б. Перепелову за конструктивные замечания, которые помогли улучшить качество статьи.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 14-17-00430 и Министерства образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

Андреев В.Н., Гусев Н.А., Ковалев Г.Н., Слезин Ю.В. Динамика лавовых потоков Южного пролива Большого Толбачинского извержения 1975—1976 гг. // Бюл. вулканологической обсерватории АН СССР на Камчатке, 1978, т. 55, с. 18—26.

- Арискин А.А., Бармина Г.С.** Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М., Маик «Наука/Интерпериодика», 2000, 363 с.
- Большое** трещинное Толбачинское извержение 1975—1976 гг. на Камчатке / Ред. С.А. Федотов. М., Наука, 1984, 637 с.
- Волынец А.О., Мельников Д.В., Якушев А.И.** Первые данные о составе вулканических пород трещинного Толбачинского извержения 2012—2013 гг., ИВС-50 // ДАН, 2013, т. 452, № 1, с. 953—957.
- Гордеев Е.Н., Карпов Г.А.** Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения РАН, 1962—2012. Владивосток, Дальпресс, 2012, 216 с.
- 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.
- Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В.** Первые количественные оценки параметров Толбачинского трещинного извержения 2012—2013 гг. по фотограмметрическим наблюдениям // Вулканология и сейсмология, 2014, т. 8, № 9, с. 261—268.
- Действующие вулканы Камчатки** // Под ред. С.А. Федотова, Ю.П. Масуренкова. М., Наука, 1991, т. 1, 302 с.; т. 2, 416 с.
- Добрецов Н.Л.** Петрологические и геохимические особенности субдукционного магматизма // Петрология, 2010, № 1, с. 1—24.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д.** Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (12), с. 1633—1661.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., 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.
- Иванов Б.В.** Андезиты Камчатки. М., Наука, 2008, 364 с.
- Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В.** Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (6), с. 830—851.
- Кутыев Ф.Ш.** Об эволюции базальтоидов Камчатки // Вопросы магматизма и тектоники Дальнего Востока. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1975, с. 101—119.
- Лаверов Н.П., Богатиков О.А., Добрецов Н.Л.** Новейший и современный вулканизм на территории России. М., Наука, 2005, 604 с.
- 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» // Тез. докл. Второй Сибирской междунар. конф. молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск, 2004, с. 105—106.
- Магматические горные породы.** Т. 1. М., Наука, 1983, 766 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.
- Пийп Б.И.** Новый боковой кратер на вулкане Плоский Толбачик // Бюл. вулканологической обсерватории, 1946, т. 13, с. 10—21.
- Савельев Д.П.** О продолжении трещинного Толбачинского извержения в феврале—марте 2013 г. // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. Современные геологические процессы, 2013, № 1, вып. № 21, с. 7—8.
- Симонов В.А.** Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.
- Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Буслов М.М.** Бонинитовые серии в структурах Палеоазиатского океана // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (7—8), с. 182—199.
- 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.
- Тетроева С.А., Плечов П.Ю.** Петрология пород Камбального вулкана по данным изучения расплавных включений // Труды ВНИИСИМС. Синтез минералов и методы их исследования. Геология месторождений пьезооптического и камнесамоцветного сырья. 2000, вып. XVI, с. 313—321.

Толстых М.Л., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Богоявленская Г.Е., Хубуная С.А. Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов, формировавших андезиты вулканов Курило-Камчатского региона // *Петрология*, 2003, т. 11, № 5, с. 451—470.

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

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

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

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

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

Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu. Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2011, v. 12, № 7, Q07021, doi: 10.1029/2011GC003516.

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, p. 837—841.

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, p. 304—310.

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

Turner S., Izbekov P., Langmuir C. The magma plumbing system of Bezymianny Volcano: Insights from a 54 year time series of trace element whole-rock geochemistry and amphibole composition // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2013, v. 263, p. 108—121.

*Рекомендована к печати 30 октября 2015 г.
А.Э. Изохом*

*Поступила в редакцию
24 июля 2015 г.*