



УДК 550.382.3, 551.21

А. Г. Зубов, В. В. Ананьев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: zubov@kscnet.ru*

О методике определения глубин магматических палеоочагов по составу и магнитным свойствам титаномагнетитов

На двух вулканах испробован титаномагнетитовый метод определения глубин магматических очагов. По температуре Кюри образцов тефры Авачинского вулкана выявлено, что андезитовый магматический очаг ~ 5 т. л. н. предположительно имел глубину 18 ± 7 км, а андезибазальтовый ~ 3 т. л. н. — 32 ± 6 км. Глубина очага, определённая тем же методом по лаве Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС — 47 ± 5 км. Это несколько отличается от результата, полученного нами по микрозондовому элементному составу лавового образца, отобранного с этого извержения несколько ранее — 35 ± 6 км. Различие возможно либо из-за дифференциации магмы, либо это ошибка метода, связанная с недостаточной представительностью отбора образцов. Приводятся данные других авторов по Камчатке и Курильским островам.

Введение

Как известно, в большинстве случаев магма поступает из глубин на поверхность не сразу, а с остановками в промежуточных камерах — магматических очагах. Выстаиваясь какое-то время в этих очагах, магма приходит в новое термодинамическое и химическое равновесие в другом окружении и условиях. Таких очагов на пути магмы может быть несколько. Магматические очаги недоступны для прямых наблюдений, но они являются частью вулканического аппарата, и вулканология очень нуждается в информации о них по каждому конкретному вулкану для понимания механизмов извержений и прогноза. Наиболее применяемые способы определения наличия и глубин расположения современных магматических очагов — геофизические. Петрологические же методы могут дать информацию не только о современных, но и о древних, даже давно остывших очагах, используя сведения о составе продуктов извержения. При этом учитывается, что этот состав непосредственно связан с условиями пребывания в последнем магматическом очаге.

С целью определения глубины магматических очагов в этой работе изучаются магнитные свойства и состав титаномагнетитов (ТМ), присутствующих в вулканических породах. Любой петрологический (в т.ч. и петромагнитный) метод определения глубин очагов основывается на допущении сохранения в отобранных образцах породы информации о глубинных параметрах, «записанных» в составе и свойствах пришедшего из глубин вещества. Поэтому необходимо каким-то образом учитывать и, по-воз-

можности, контролировать соблюдение некоторых важных очевидных допущений [2]:

1) магма в последнем перед выходом на поверхность очаге успела прийти в устойчивое термодинамическое состояние и химический баланс с окружающей средой;

2) магма из последнего равновесного очага поднималась на поверхность достаточно быстро, не успев при транзите изменить свой химический состав;

3) на поверхности вытекшая лава достаточно быстро остыла, законсервировав своё минералогическое состояние;

4) за время до момента отбора остывшая лава сумела сохранить свой минералогический состав.

Первые два пункта напрямую проконтролировать невозможно. Третий пункт может нарушаться в лавовых потоках (озёрах), остывавших медленно из-за очень больших объёмов. Для контроля влияния окислительных процессов при остывании используется сравнительный петрологический анализ образцов одного извержения, остывших в разных окислительных условиях, то есть разного происхождения и залегания. Для контроля четвёртого пункта детально анализируется минералогический состав вещества на предмет выявления структур распада или других признаков нарушения минералогической сохранности ТМ.

ТМ представляет собой изоморфный твёрдый раствор, основными компонентами которого являются магнетит и ульвошпинель. Подобные твёрдые растворы с падением температуры могут становиться неустойчивыми и распадаться на другие более устойчивые компоненты. Для изучения глубин очагов в случае неглубокого распада обычно

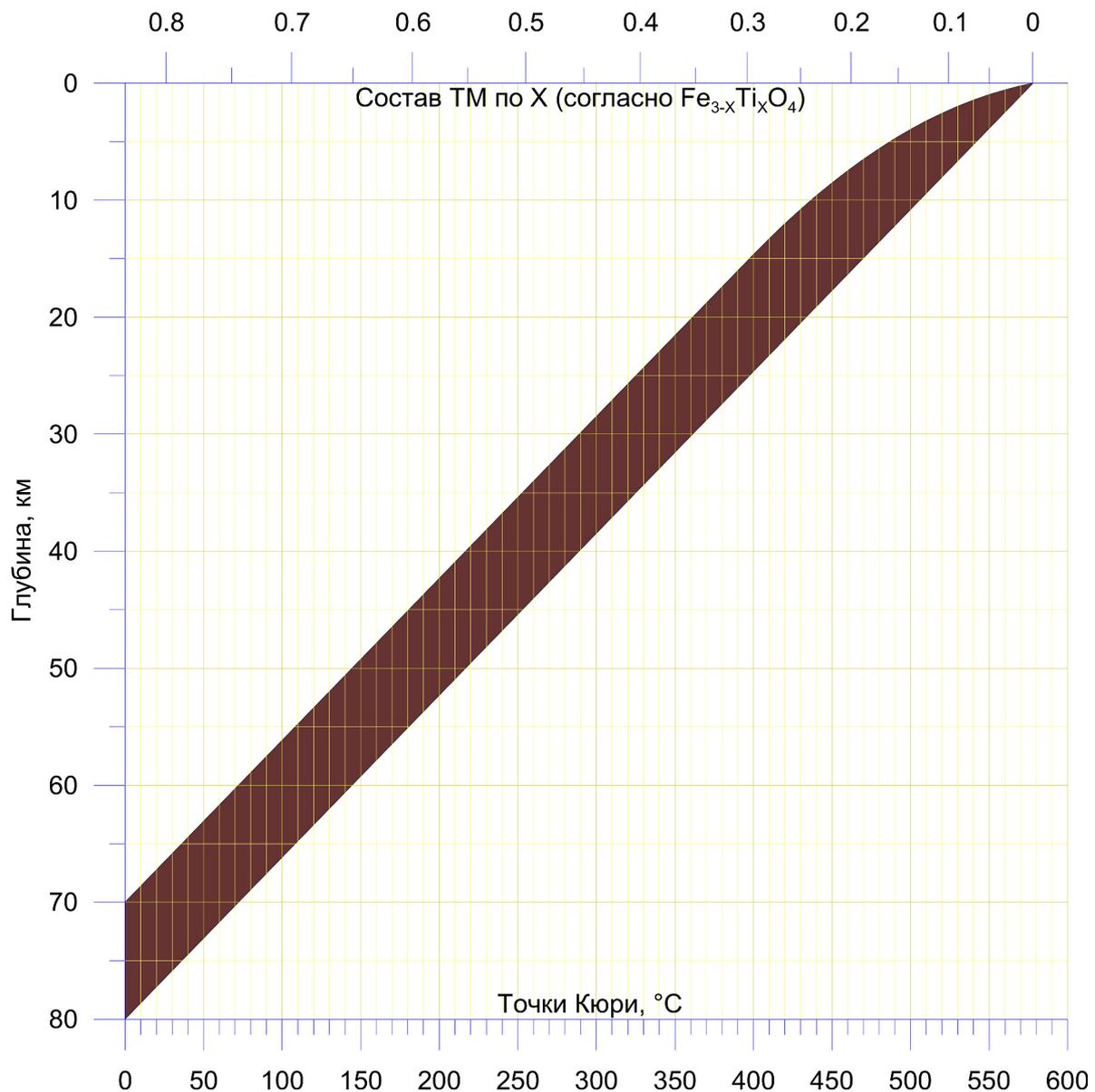


Рис. 1. Номограмма для определения глубины магматического очага по магнитным свойствам T_C и составу X первично-магматических титаномагнетитов вулканических пород [14].

используется процедура гомогенизации твёрдого раствора путём выдержки образцов в аргоне при $T \sim 1000^\circ C$ [9]. Это позволяет вернуться к состоянию ТМ, близкому к исходному. После извержения в процессе своего дальнейшего существования ТМ в породах нередко подвергается окислению, которое может быть как однофазным (с переходом части двухвалентного железа в трёхвалентное при сохранении структуры), так и гетерофазным (с распадом твёрдого раствора). При окислении информация о глубинных условиях искажается. Окисленные образцы лучше исключать из анализа, но в некоторых случаях и для них ситуация поддаётся коррекции.

Основой для разработки описываемой методики определения глубин магматических очагов стали лабораторные исследования в разных лабораториях физико-химических свойств ТМ и гемоильмени-

тов при различных термодинамических условиях: высоких температурах, варьирующих окислительных условиях fO_2 и содержаниях влаги [11]. Выявленную возможность называют «геотермометр — кислородный барометр Баддингтона-Линсли». Поскольку, как правило, по мере уменьшения глубины окислительная обстановка меняется, то наиболее зависимым в этом случае параметром является fO_2 . Менее зависимы от глубины температура поднимающейся магмы и другие не столь важные параметры. По сочетанию лабораторных и геофизических данных была получена зависимость температуры Кюри (T_C) или химического состава ТМ через параметр X от глубины очага (рис. 1) [13, 14, 15]. Правда, точность определений глубин невелика, поскольку в географически разных местах главный зависимый от глубины параметр fO_2 может существенно ва-

ривировать из-за разной проницаемости среды для жидких или газообразных окисляющих флюидов, да и остальные параметры могут меняться по-разному. Но в целом закономерность уменьшения содержания титана в ТМ с уменьшением глубины залегания резервуара с равновесной магмой в некоторых границах соблюдается, и такая информация весьма ценна.

Авачинский вулкан

С целью поиска петромагнитных признаков идентификации маркирующих горизонтов района Авачинско-Корякской группы вулканов был проведён терромагнитный анализ (ТМА) нескольких образцов тефры Авачинского вулкана, любезно предоставленных нам Л. И. Базановой. По сравнению с лавой тефра имеет преимущество в том, что она остывает несравнимо быстрее, что способствует сохранению глубинного химического состава из-за более короткого контакта с атмосферным кислородом в нагретом состоянии. С другой стороны, повышенная газопроницаемость тефры улучшает условия для окисления минералов. Практика показала, что при ТМА мелкого (<0,1 мм) вулканического пепла фиксируется в основном магнетит, как продукт разрушения ТМ [7, 10]. То есть влияние атмосферного кислорода пагубно для ТМ остывающих мелких вулканических продуктов. В нашем эксперименте изучалась тефра естественного гранулометрического состава. Лишь в некоторых случаях пришлось слегка раздробить образцы со слишком крупной фракцией, чтобы порошок поместился в пространстве измерительного контейнера прибора. Очень мелкой фракции практически не было, поскольку образцы отбирались достаточно близко от вулкана, где из-за гравитационно-эоловой дифференциации выпадает грубая составляющая.

Это и отразилось на температурных графиках магнитной восприимчивости, полученных во ВНИГРИ на чешском каппа-мосте с печью. В результате вырисовалась чёткая картина однофазного состава исходного ферромагнитного материала (рис. 2). Для большинства образцов магнитная компонента оказалась устойчивой к нагревам, что видно по близости кривых нагрева и охлаждения при первом нагреве. При повторном нагреве из-за химической стабилизации минерального состава близость кривых ещё заметнее. Менее устойчивые к нагревам образцы 0940/3, 09152/14 и 6630/9 были отобраны в разных местах. Они были взяты на испытание именно с целью попробовать найти характерные свойства, подтверждающие их общее происхождение от одного извержения. По графикам ТМА все образцы разбились на две группы с довольно кучными результатами. T_C определялись как точки максимальной крутизны спада на кривой ТМА первого нагрева. В одной группе $T_C = 305\text{--}320^\circ\text{C}$, в другой $T_C = 400\text{--}425^\circ\text{C}$. Выяснилось, что и по составу эти образцы существенно отличаются. В первую группу попали андезибазальты

извержений, произошедших 2,4–3,0 т. л. н., согласно радиоуглеродным данным, во вторую — андезиты с возрастом 5,2–5,3 т. л. н. по радиоуглеродному датированию [3, 5].

Кроме ТМА, других анализов ферромагнитных материалов не проводилось. Тем не менее малый разброс T_C в группах говорит об однородности и гомогенности магнетиков, образовавшихся в равновесной среде каждого из двух разных очагов. Процессы распада или окисления ТМ не могут происходить синхронно и должны были бы дать более широкий разброс данных. Следовательно, в нашем случае можно рассчитывать на сохранение в изученных образцах информации о глубинных условиях. Воспользовавшись рис. 1, получаем расчётные глубины магматических очагов для изученных андезитов $H = 18 \pm 7$ км и для более молодых андезибазальтов $H = 32 \pm 6$ км.

Трещинное Толбачинское извержение имени 50-летия ИВиС ДВО РАН

Когда на традиционной конференции 2013 г., посвящённой Дню вулканолога, была озвучена информация о том, что в лаве происходящего Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС (ТТИ50) обнаружены алмазы и включения самородных металлов: меди, железа и алюминия, стало понятно, что в лаве среда имеет восстановительный потенциал, характерный для больших глубин. Учитывая, что по современным представлениям алмазы могут образовываться при давлениях, которые присутствуют на глубинах больших 50 км, получаем ещё один довод в пользу глубинности происхождения магмы. Появилась идея проверить как сработает титаномангнетитовый метод определения глубины последнего магматического очага.

С этой целью был проведён ТМА образца (отбор 11 января 2013 г., N55.75 792°, E160.32 050°), отобранного из текущего лавового потока ТТИ50. Температурная кривая магнитной восприимчивости, снятая В. В. Поповым во ВНИГРИ, показывает практическую стабильность магнитных минералов при нагреве до 350°С (рис. 3а). При более высоких температурах заметны сильные химические изменения магнитных минералов в процессе нагрева на воздухе (рис. 3а и 3б). Благодаря эффекту Гопкинсона, очень чётко определяется температура Кюри исходного ферромагнетика $T_C = 206 \pm 2^\circ\text{C}$. К сожалению, это пока наш единственный результат ТМА по этому извержению. Согласно ему глубина магматического очага, которой соответствует состав ТМ данного образца $H = 47 \pm 6$ км. В пределах точности ТМА в образце не обнаружено присутствия самородного железа.

С этим результатом можно сравнить данные микронзондового анализа ТМ из другого, более раннего потока этого же извержения (отбор 9 декабря 2012 г., N55.74 561°, E160.13 208°). Изображения в электронном микроскопе дают картину однородных зёрен ТМ без признаков

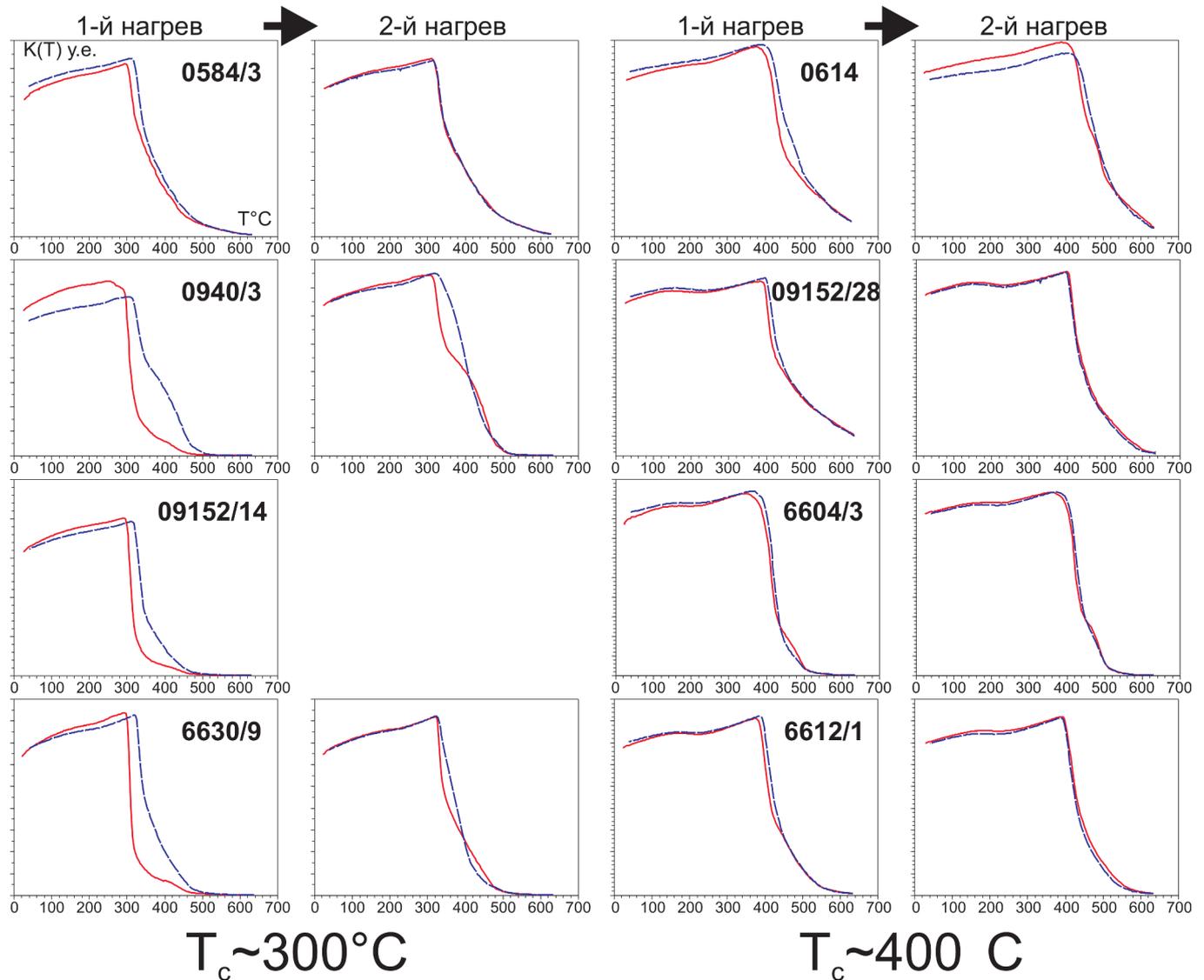


Рис. 2. Температурная зависимость магнитной восприимчивости для андезибазальтов ($T_c \sim 300^\circ\text{C}$) и андезитов ($T_c \sim 400^\circ\text{C}$) Авачинского вулкана. Сплошная линия – нагрев, прерывистая – охлаждение.

разложения или окисления. В табл. 1 представлены довольно кучные данные химического состава 9 зёрен ТМ. Расчёт трёхвалентного железа сделан в соответствие со стехиометрией ТМ.

Поскольку в ТМ состав и T_c однозначно связаны [12], по составу ТМ тоже можно определить глубину магматического очага, воспользовавшись всё той же номограммой на рис. 1. Параметр X , характеризующий состав ТМ, входит в общую формулу ТМ: $\text{Fe}_{3-X}\text{Ti}_X\text{O}_4$. Подсчитать X по составу ТМ можно разными способами: 1) по относительному весовому количеству TiO_2 (или просто Ti), 2) по соотношению весов $\text{TiO}_2/\text{FeO}^*$ (здесь общее железо, пересчитанное на FeO) или 3) по модели твёрдого раствора ТМ с учётом изоморфного замещения Fe^{2+} на Mg^{2+} или Mn^{2+} , а Fe^{3+} на Al^{3+} и Cr^{3+} .

Номограмма для подсчёта X первым и вторым способом приводится в работе [12]. Проще посчитать этот параметр по формулам:

1) $X = 28,9 / (10 / RW(\text{TiO}_2) + 1)$, где $RW(\text{TiO}_2)$ – относительный вес TiO_2 в зерне ТМ.

2) $X = 3 / (1,111 / K + 1)$, где K – соотношение весов $\text{TiO}_2/\text{FeO}^*$, $K = W(\text{TiO}_2) / W(\text{FeO}^*)$.

Если первый способ основывается на модели идеального кристалла ТМ без учёта изоморфных примесей, т. е. только из ульвошпинели $\text{Fe}_2^{2+}\text{TiO}_4$ и магнетита $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$, то в третьем принимается во внимание наличие в структуре шпинели других изоморфных катионов, прежде всего Mg , Mn и Al , Cr , наличие которых изменяет соотношение магнетитового и ульвошпинелевого миналов. Используя формульные единицы и исходя из количества Ti , вычисляем количество Fe^{2+} , которое связано с миналом ульвошпинели. Вычисляем остаток Fe^{2+} , и сравниваем его с количеством Fe^{3+} , проверяя какое железо находится в избытке при построении магнетитового минала по стехиометрии. Если в избытке Fe^{2+} , его избыток соотносим с присутствующими Al и Cr

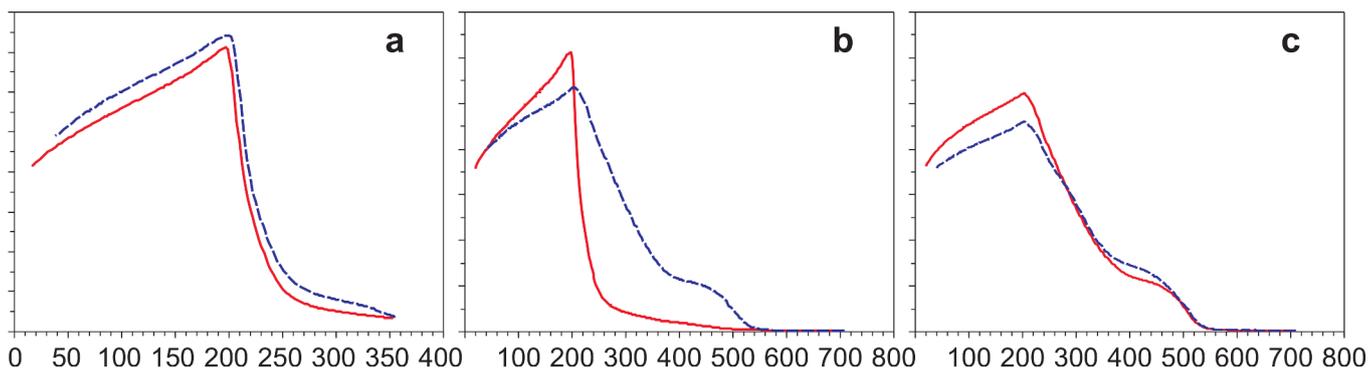


Рис. 3. Температурная зависимость магнитной восприимчивости для образца лавового потока ТТИ50. *a* — нагрев до 350° С, *b* — первый нагрев новой порции до 700° С, *c* — второй нагрев до 700° С. Условные обозначения линий как на рис. 2.

Таблица 1. Химический состав зёрен ТМ образца по микронзондовому анализу. Разделение Fe по валентностям вычислено по стехиометрии ТМ.

зёрно	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Sum
3S5	0,00	11,48	6,84	1,51	39,83	34,96	0,42	4,89	0,00	0,00	0,00	99,93
6S4	0,00	10,69	6,34	3,33	39,05	33,86	0,38	4,82	0,00	0,00	0,00	98,47
6S5	0,00	10,62	5,94	3,49	39,46	34,31	0,43	4,46	0,00	0,00	0,00	98,70
7S3	0,00	12,00	5,92	1,45	39,97	35,92	0,50	4,49	0,00	0,00	0,00	100,24
12S3	0,00	15,21	3,43	0,00	38,08	39,12	0,46	4,11	0,00	0,00	0,00	100,40
17S3	0,00	13,65	4,45	0,00	40,37	37,79	0,40	4,30	0,00	0,00	0,00	100,95
19S4	0,00	13,40	4,58	0,00	40,94	37,25	0,35	4,57	0,00	0,00	0,00	101,09
20S4	0,00	12,63	4,92	0,00	41,61	36,33	0,32	4,63	0,00	0,00	0,00	100,45
23S3	0,00	13,01	4,69	0,00	40,36	36,67	0,30	4,43	0,00	0,00	0,00	99,46
среднее	0	12,5	5,2	1,1	40,0	36,2	0,40	4,52	0	0	0	99,96
ср.кв. откл.	±0	±0,5	±0,3	±0,5	±0,3	±0,5	±0,02	±0,08	±0	±0	±0	±0,29

и ведём расчёт магнетитового минала по количеству Fe³⁺. В другом случае избыток Fe³⁺ соотносим с Mg и Mn и минал рассчитываем по Fe²⁺. Подсчитываем по стехиометрии количество кислорода, связанного с вычисленным количеством железа и титана в ульвошинели и магнетите. Далее нормируем полученные формульные единицы на 4 атома кислорода. Тогда количества общего железа и титана будут соотноситься как 3 - X и X. Отсюда находим искомое X.

Мы рассчитали величину X всеми тремя способами и получили такие результаты: 1) $X = 0,35 \pm 0,01$; 2) $X = 0,40 \pm 0,01$; 3) $X = 0,45 \pm 0,01$. В последнем варианте по стехиометрии учтён избыток Fe³⁺ во всех зёрнах, и расчёт проведён по количеству Fe²⁺. Учитывая связь T_C с составом ТМ [12], можно получить значение X для образца, прошедшего ТМА: $X = 0,56 \pm 0,01$. В чём же причины такого расхождения данных по составу зёрен? Разброс результатов можно объяснить несовершенством применяемых моделей. Из всех вариантов наиболее правильным, скорее всего, является третий, учитывающий влияние примесей. А существенное отличие

его от данных ТМА может объясняться тем, что образцы на самом деле разные. Хотя они вынесены на поверхность одним извержением, но принадлежат разным потокам, вытекшим в разное время. То есть и порции магмы, породившие эти образцы, могли появиться из разных глубин или их лавовые потоки могли по-разному окислиться на поверхности. Поэтому для определения глубин магматических очагов оставляем третий вариант расчёта X и результат ТМА.

Итак, $H_X = 35 \pm 6$ км и $H_{ТМА} = 47 \pm 6$ км.

Обсуждение результатов

Хотя петрологические способы оценки глубин магматических очагов не обещают высокой точности, но даже такая информация весьма востребована. А как метод изучения палеоочагов эти способы не имеет конкурентов.

В этих исследованиях в результате ТМА образцов тефры Авачинского вулкана выявлены возможные магматические очаги, разные для андезитового и андезибазальтового периодов действия вулкана. Ранее комплексом геофизических методов [8] было

Таблица 2. Глубины очагов камчатских и курильских вулканов по петромагнитным данным других авторов.

Место отбора	T_C , °С [источник]	Глубина очага в оригинале, км	Глубина очага по рис. 1, км
в. Ильинский, ранние извержения	250–275 [2]	—	32–45
в. Кошелева, поздние извержения	300–400 [2]	20–40	15–38
о. Парамушир	350–375 [2]	—	18–32
о. Симушир	250 [2]	45–55	35–45
о. Кунашир (Тятя, Головнина, Менделеева)	250 [2]	45–55	35–45
в. Толбачик	275 [9]	—	32–42
	250–275 [1]	—	32–45
БТТИ Северный прорыв	350 [9]	30–40	22–32
БТТИ Южный прорыв	220 [9]	30–40	40–50
в. Ключевской, главный конус	275 [9]	—	32–42
в. Ключевской, по пеплам	350–400 [7]	—	15–32
в. Шивелуч, по пеплам	430–450 [7]	—	9–20

установлено наличие периферического магматического очага на глубине 1,5–3 км под Авачинским вулканом. Так как петрологический метод даёт информацию о последнем перед излиянием магматическом очаге, это означает, что согласно нашим данным ещё 2,4 т. л. н. периферического очага не было, либо он был транзитным, кратковременным. С учётом планов практического использования периферического очага под Авачинским вулканом для добычи тепла и полезных ископаемых следует уделить большее внимание изучению природы выявленной неоднородности под вулканом. В свете этого петромагнитное изучение лавы извержения Авачинского вулкана 1991 г. для выяснения глубины её источника кажется совершенно необходимым.

Геофизические методы также выделяют под Авачинским вулканом на глубине 10–16 км аномальную зону с пониженным скоростным градиентом, что трактуется авторами как ослабленный слой с многочисленными трещинами. Не исключено, что это связано с существованием когда-то андезитового очага (или очагов), впоследствии частично опустошённого и обвалившегося.

Петромагнитное и петрологическое изучение лавовых образцов ТТИ50 подтвердило возможную глубинность магматического очага. Правда, результаты, полученные разными методами на разных образцах дали различные результаты. Это скорее всего связано с различием свойств опробованных лавовых потоков. Связано ли это с дифференциацией магмы, или это следствие искажения глубинной информации, пока не ясно. Для получения более корректных результатов требуется изучение большего количества образцов различного залегания и происхождения с совместным применением петромагнитного и микрозондового способа на каждом образце. Интерес представляет также сравне-

ние свойств магнитных минералов лавы и тефры на предмет пригодности использования в методике определения глубин очагов.

Для сравнения приведём петромагнитные данные других авторов по некоторым камчатским вулканам (табл. 2).

Можно заметить, что T_C нашего образца лавы ТТИ50 очень близка T_C лав Южного прорыва БТТИ. Геофизические методы [4] указывают на существование периферического очага на глубине 2–3 км под Северным прорывом. В том же районе выявлено также аномальное тело на глубине 7–8 км. И действительно, T_C лав Северного прорыва заметно выше, чем у лав Южного, что говорит о более мелком очаге первого. Правда, не настолько мелком, чтобы соответствовать равновесному состоянию очага на такой небольшой близповерхностной глубине. Согласно номограмме магма с такими свойствами должна уравновесить свой состав на глубине 27 ± 5 км. Однако известно [16], что почти под местом образования первого конуса перед началом БТТИ были отмечены глубокие (20–30 км) землетрясения, которые сейсмологи связывают с глубинным очагом.

Мы благодарим Л. И. Базанову за предоставленные для изучения образцы тефры Авачинского вулкана и за консультации по их хронологии. Мы также благодарны В. В. Попову за помощь и содействие при ТМА наших образцов. Особая благодарность Д. М. Печерскому за консультации по основам методики изучения магматических очагов по свойствам ТМ.

Список литературы

1. Алытова О. М. Терромагнитное изучение вулканических пород Камчатки // Бюлл. Вулканологических станций. 1969. № 45. С. 61–66
2. Багин В. И., Бродская С. Ю., Петрова Г. Н., Печерский Д. М. Глубина очагов вулканов Курило-Кам-

- чатской островной дуги по данным термомагнитных исследований вулканических пород // Изв. АН СССР, Физика Земли № 5, 1971. С. 57–68
3. *Базанова Л. И., Брайцева О. А., Дирксен О. В., Сулержицкий Л. Д., Данхара Т.* Пеплопады крупнейших голоценовых извержений на траверсе Усть-Большерецк – Петропавловск-Камчатский: источники, хронология, частота // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 30–46
 4. *Балеста С. Т., Каргопольцев А. А., Григорян Г. Б.* Сейсмические данные о магматических очагах Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1979. № 2. С. 4–11
 5. *Брайцева О. А., Базанова Л. И., Мелекесцев И. В., Сулержицкий Л. Д.* Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке (этап 7250–3700 л. н.) // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 3–24
 6. *Бродская С. Ю., Ножаров П. Б.* Глубина источников магмы по данным термомагнитных исследований плиоценовых базальтов Болгарии // Изв. АН СССР, Физика Земли № 2, 1972. С. 87–91
 7. *Гендлер Т. С., Диденко А. Н., Кирьянов В. Ю., Земцов А. Н.* Магнитная минералогия пеплов Камчатки; возможность идентификации вулканических событий // Тез. Докладов VI международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». Москва, 3–5 октября 2005 г. М.: ИФЗ, 2005. С. 16–18
 8. *Гонтовая Л. И., Ризниченко О. Ю., Нуждина И. Н., Федорченко И. А.* Авачинская группа вулканов: глубинное строение и особенности сейсмичности // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, «Современный вулканизм и связанные с ним процессы», 29–30 марта 2010 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011 г. С. 50–58
 9. *Ермаков В. А., Печерский Д. М., Шаронова З. В.* Петромагнитная характеристика четвертичных вулканических пород Центральной Камчатки // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, № 12, 1982, С. 76–87
 10. *Зубов А. Г., Кирьянов В. Ю.* О возможности использования термомагнитных параметров для идентификации вулканических пеплов // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 267–273.
 11. *Лыков А. В., Печерский Д. М.* Экспериментальное исследование связи магнитных свойств базальтов с условиями их образования // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли. 1977 г. № 4. С. 65–74.
 12. *Нагата Т.* Магнетизм горных пород. М.: Мир, 348 с.
 13. *Печерский Д. М., Багин В. И., Бродская С. Ю., Шаронова З. В.* Магнетизм и условия образования изверженных горных пород // Наука, М., 1975
 14. *Печерский Д. М., Диденко А. Н.* Палеоазиатский океан; петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: ОИФЗ РАН, 1995, 298 с.
 15. *Печерский Д. М., Попов А. А., Шаронова З. В.* Петромагнитная характеристика четвертичных лав вулкана Эльбрус // Изв. АН СССР, сер. Геологическая, № 9, 1980, С. 37–48
 16. *Федотов С. А., Горельчик В. И., Степанов В. В.* Сейсмические данные о магматических очагах, механизме и развитии базальтового трещинного Толбачинского извержения в 1975 г. на Камчатке // ДАН СССР. 1976. Том. 228, № 6. С. 1407–1410.