



УДК 550.382.3+551.21

А. Г. Зубов¹, Л. И. Базанова¹, В. В. Ананьев¹,
А. А. Овсянников¹, Г. В. Жидков²

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский
e-mail: zubov@kscnet.ru

² Геофизическая обсерватория Борок, Борок

О применении титаномагнетитового метода для определения глубины магматического очага на примере некоторых камчатских вулканов

Использование методики, основанной на изучении состава или магнитных свойств титаномагнетитов в вулканической породе, позволило определить вероятную глубину современных магматических очагов Авачинского и Ключевского вулканов, а также Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. Посредством термомагнитного анализа образцов датированной тефры Авачинского вулкана удалось подтвердить существование древних разноглубинных магматических очагов этого вулкана в периоды 2,4–3,0 и 5,2–5,3 ¹⁴С тыс. л. н. и определить глубину их залегания. Полученные результаты согласуются с данными проведённых ранее геофизических исследований.

Введение

Информация о строении корневых зон вулканов, в том числе о различных свойствах и параметрах магматических очагов — необходимая основа для построения схем и моделей вулканических процессов и их эволюции. При определении положения магматических очагов вулканов наиболее активно используются геофизические методы. В то же время продолжается поиск наиболее эффективных подходов для решения этих задач, в т.ч. петрологических.

В настоящей статье представлены результаты петромагнитного анализа титаномагнетитов в породах (лава, тефра) трёх вулканических центров Камчатки и обсуждается возможность применения мало используемого в настоящее время метода, основанного на свойствах титаномагнетита, для оценки глубины магматических очагов.

Авачинский вулкан является важнейшим объектом исследований, учитывая его близость к наиболее населённой территории Камчатки. Такое соседство с одной стороны создаёт разного рода угрозы населению и хозяйственной деятельности, с другой имеет перспективы его использования как поставщика сырья для строительного и химического производств, а также тепла [22]. В любом случае необходимо изучение истории вулканической активности и структуры вулканического аппарата, частью которого являются магматические очаги. Не случайно этот вулкан является одним из наиболее изученных на Камчатке. Поскольку метод применялся авторами этой статьи впервые, было заманчиво протестировать его на таком объекте. Два других вулканических центра (Ключевской вулкан и Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг.)

принадлежат Ключевской группе вулканов. Это район, где ранее другими исследователями проводилось изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии. Эти материалы использованы для сопоставления с нашими результатами.

Метод исследований

Применённая нами методика начала развиваться в 70-е годы прошлого века [2, 10], но не получила широкого распространения. Уже тогда было замечено, что состав титаномагнетитовых зёрен в вулканической породе каким-то образом связан с глубиной магмообразования. Лабораторные и теоретические исследования условий генезиса титаномагнетитов и гематитов показали, что из всех влияющих на их состав термодинамических факторов $P-T-f_{O_2}$ наиболее важным является последний, а именно, фугитивность (летучесть) кислорода, в первую очередь влияющая на состав растущих кристаллов [14]. Фугитивность газа зависит от температуры T , а также от давления P и концентрации, т.е. от парциального давления. Фугитивность отражает отличие реальных газов от идеальных, но при низких давлениях газа она совпадает с этим давлением. То же самое верно для их парциальных форм. Такую термодинамическую зависимость состава титаномагнетитов называют «геотермометр — кислородный геобарометр Баддингтона-Линдсли», в честь исследователей, которые впервые изучили зависимость состава титаномагнетитов и геотитов при различных $T-f_{O_2}$ условиях [24].

Представим, что атмосферный кислород проникает в земную кору по порам пород в основном

диффузионным путём. Ясно, что через длительное время должно наступить равновесное состояние, когда парциальное давление кислорода P_{O_2} будет монотонно уменьшаться от поверхностных атмосферных условий до нуля в мантии, где царит восстановительная обстановка. Очевидно, что если бы земная кора была однородной, то в такой модели каждому уровню глубины H , в зависимости от толщины коры H_k , должно соответствовать определённое P_{O_2} . На самом деле эта зависимость варьирует из-за разной водо-газопроницаемости пород, разнообразия в распределении температур в слоях коры, движения флюидов и атмосферной влаги, захватывающих и переносящих кислород. Получается цепочка функциональных зависимостей (здесь и в дальнейшем X — параметр, характеризующий состав титаномагнетита): $X \approx X(f_{O_2})$, $f_{O_2} \approx f_{O_2}(P_{O_2})$, $P_{O_2} \approx P_{O_2}(H/H_k)$. Пройдя по цепочке, получим: $X \approx X(H/H_k)$. Такое представление помогает понять почему состав магнетита приблизительно определяется относительной глубиной местонахождения магмы.

В представленной модели мы неявно воспользовались ещё одним важным допущением методики, которое состоит в предположении, что к моменту извержения магма становится равновесной с термодинамическими условиями окружающей глубинной среды. Кроме того существенно, чтобы на момент кристаллизации титаномагнетита магма сохранила свой глубинный химический состав с соответствующим глубинным P_{O_2} . Кристаллизация титаномагнетита может произойти по пути подъёма магмы или в лавовом потоке на поверхности, но если химический состав магмы при быстром подъёме сохранится, титаномагнетит по составу будет соответствовать глубинному P_{O_2} . В этом суть методики. Именно этот исходный титаномагнетит необходимо отыскать, чтобы успешно применить методику. К сожалению, при остывании на земной поверхности титаномагнетит часто окисляется. Задача исследователя найти наименее окисленные образцы и выделить первичную фазу титаномагнетита. Будем называть этот метод определения глубины равновесного магматического очага по составу или магнитным свойствам титаномагнетитов *титаномагнетитовым методом*.

Известна связь состава титаномагнетита с его магнитными свойствами — а именно с температурой Кюри (T_C) [25], которую можно получить из термомагнитного анализа. Состав титаномагнетита однозначно определяется через параметр X , входящий в обобщающую формулу титаномагнетита: $Fe_{3-X}Ti_XO_4$. Связь T_C и X [16 или рис. 1 в 11] породила два способа подсчёта глубины — посредством определения T_C термомагнитным анализом и посредством определения X с использованием микронзондового анализа. Желательно использовать оба метода совместно [10, 8, 19], поскольку в каждом из них заложены свои критерии надёжности:

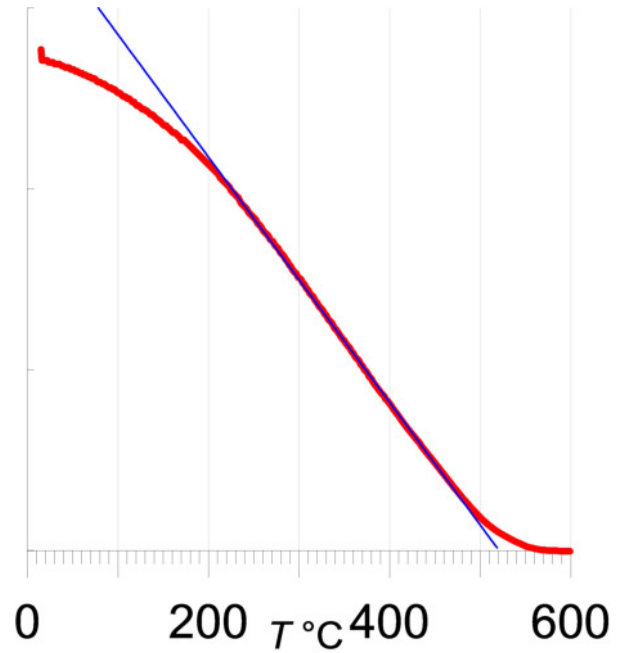


Рис. 1. Температурная зависимость намагниченности насыщения образца 874 извержения 1991 г. Авачинского вулкана. Здесь и в последующих графиках по оси ординат — условные единицы.

в первом используется вся масса магнетика в образце, то есть происходит хорошее статистическое усреднение, во втором же больше возможностей контролировать нарушения сохранности магнитных зёрен.

Подсчитать X по составу титаномагнетита можно разными способами: 1) по относительному весовому количеству TiO_2 (или просто Ti), 2) по соотношению TiO_2/FeO^* (здесь общее железо, пересчитанное на FeO), 3) по модели твёрдого раствора титаномагнетита с учётом связывания катионов железа Mg и Mn или Al и Cr . Номограмма для подсчёта X первым и вторым способом приводится в работе [16]. Проще посчитать этот параметр по формулам:

1. X_1 — отношение количества молекул TiO_2 в кристалле титаномагнетита ($TiMgt$) по отношению к количеству молекул (M) титаномагнетита. т.е. $X_1 = M(TiO_2)/M(TiMgt)$, где можно вычислить $M(TiO_2) = W(TiO_2)/MW(TiO_2)$ и $M(TiMgt) = W(TiMgt)/MW(TiMgt)$. Здесь W — весовое содержание компонента, MW — вес молекулы в атомных единицах. Очевидно, $MW(TiMgt) = 55,845(3 - X_1) + 47,867X_1 + 15,9994 \times 4 = 231,5 - 8,098X_1$. С учётом первого равенства получаем

$$X_1 = 29,0K_{TiO_2}/(K_{TiO_2} + 10,0),$$

где $K_{TiO_2} = W(TiO_2)/W(TiMgt)$. Влияние примесей здесь учитывается через содержание чистого $TiMgt$ в зёрне. Если допускается погрешность во втором знаке X_1 , то формула упрощается:

$$X_1 = 2,9K_{TiO_2}.$$

Если примесей в кристалле TiMgt мало, то $W(\text{TiMgt}) \approx 1$, и остаётся только квазилинейная зависимость от концентрации TiO_2 .

2. В любой химической формуле типа $A_n B_m C_k$ должно соблюдаться соотношение:

$$\frac{M(A)}{n} = \frac{M(B)}{m} = \frac{M(C)}{k}.$$

Для TiMgt: $M(\text{Fe})/(3 - X_2) = M(\text{Ti})/X_2$. Получаем

$$X_2 = 3/[1 + M(\text{Fe})/M(\text{Ti})].$$

Рассмотрим как выше

$$\frac{M(\text{Fe})}{M(\text{Ti})} = \frac{W(\text{Fe})}{W(\text{Ti})} \times \frac{MW(\text{Ti})}{MW(\text{Fe})} = K_{\text{Fe/Ti}} \times \frac{47,867}{55,845}.$$

В итоге

$$X_2 = 3/(1 + 0,867K_{\text{Fe/Ti}}).$$

Аналогично можно найти формулу для окислов с участием $K_{\text{FeO}^*/\text{TiO}_2} = W(\text{FeO}^*)/W(\text{TiO}_2)$. Здесь FeO^* означает общее железо, пересчитанное на двухвалентное. В итоге окончательная формула:

$$X_2 = 3/(1 + 1,112K_{\text{FeO}^*/\text{TiO}_2}).$$

3. Предполагаем, что изучаемый титаномагнетит представляет смесь миналов ульвошпинели $\text{Fe}_2^{2+}\text{TiO}_4$, магнетита $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{O}_4$ и некоторых других, в которых также может участвовать железо. 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 и ведём расчёт магнетитового минала по количеству Fe^{3+} . В другом случае избыток Fe^{3+} соотносим с Mg и Mn и минал рассчитываем по Fe^{2+} . Подсчитываем по стехиометрии количество кислорода, связанного с вычисленным количеством железа и титана в ульвошпинели и магнетите. Далее нормируем полученные формульные единицы на 4 атома кислорода. Тогда количества общего железа и титана будут соотноситься как $3 - X_3$ и X_3 . Отсюда находим искомое X_3 .

Сравнивая геофизические данные о глубинах магматических очагов с результатами петромагнитных исследований, а также учитывая экспериментальные данные удалось установить закономерности связи глубины очага с T_C [2] или с составом титаномагнетита, выражаемого через параметр X . В справочном пособии [17] приводятся эмпирические формулы нижнего предела $H(\text{км}) = 82 - 0,14T_C$ и для глубин очага более 10 км $H(\text{км}) = 80 - 0,16T_C$. Для расчёта глубин можно пользоваться номограммой [18, рис. 1-4 или 11, рис. 1].

Аппаратура

Для определения T_C применялись два подхода: по кривой магнитной восприимчивости и кривой намагниченности насыщения. В обоих случаях T_C определялась по известному методу пересечения касательных на участке перехода ферримагнетик-парамагнетик. В первом случае был использован каппа-мост KLY3 с печью CS3 чешского производства, установленный в палеомагнитной лаборатории ВНИГРИ (Россия, Санкт-Петербург). Во втором применялась установка конструкции Ю. Виноградова в Геофизической обсерватории «Борок» (Россия, филиал ИФЗ РАН).

Для проведения микронзондового анализа зёрен титаномагнетита был задействованы микронзонды Camebax ИВиС ДВО РАН (Россия) и JEOL JXA-8200 ИГЕМ РАН (Россия).

Результаты и их обсуждение

Авачинский вулкан. В результате разнообразных геофизических исследований получены сведения о существовании в настоящее время под Авачинским вулканом периферического магматического очага. По сейсмическим методам глубина его залегания 1,5–3 км [4, 5, 7]. В других публикациях указывались цифры 0–6 км (по гравиметрии) [12] и 0–2 км (геофизический комплекс) [15]. Была проведена попытка исследования структуры этого очага и петрологическим методом. Путём моделирования состава расплава в процессе изучения плагиоклазов лавы извержения 1991 г. исследователи пришли к выводу о возможном существовании основного магматического очага на глубине 5,5 км и небольшого магматического резервуара на глубине 1,8 км [27].

Образец 874 был отобран нами из внутренней части фрагмента лавовой пробки, образовавшейся в кратере Авачинского вулкана при извержении 1991 г. Удалось воспользоваться обстоятельством, что этот лавовый фрагмент был вырван газопепловым выбросом в 2005 г. из трещины в пробке. Образец был подвергнут термомагнитному анализу для получения кривой температурной зависимости намагниченности насыщения (рис. 1). По кривой очень надёжно определяется $T_C = 520^\circ\text{C}$. Согласно вышеупомянутой номограмме она соответствует глубине равновесного магматического очага $H = 5 \pm 3$ км. Такой результат хорошо согласуется с вышеприведёнными данными других исследователей.

Петрологические методы определения глубин частей вулканического аппарата способны давать информацию не только о ныне существующих очагах, но и древних, давно остывших и даже разрушенных. При поиске петромагнитных признаков идентификации маркирующих горизонтов пирокластики в районе Авачинско-Корякской группы вулканов к небольшой коллекции образцов авачинской тefфры, изученной и датированной тefфростратиграфическим и радиоуглеродным методами [3], был применён термомагнитный анализ. Особенности

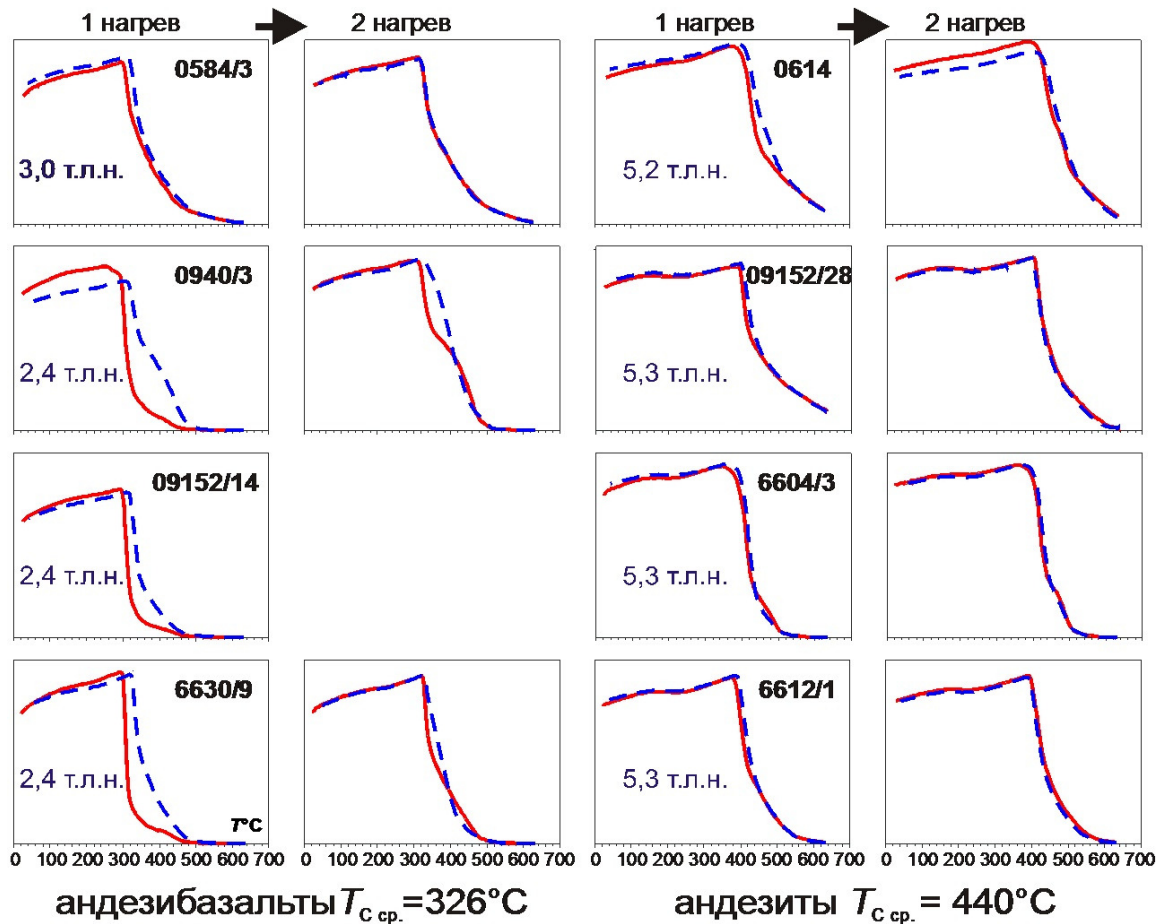


Рис. 2. Температурная зависимость магнитной восприимчивости образцов тефры Авачинского вулкана. Сплошная линия — нагрев, прерывистая — охлаждение. т.л. н. — тыс. л. н. по ¹⁴С.

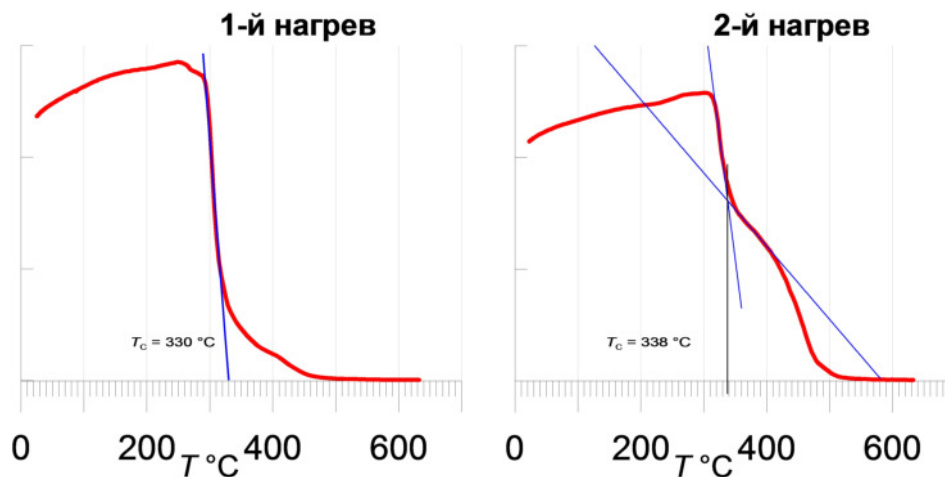


Рис. 3. Определение T_C образца тефры 0940/3. На рисунке продемонстрировано применение метода касательных для определения T_C .

использования тефры в этих исследованиях рассмотрены в работе [11].

Для получения информации о T_C на этот раз изучалась зависимость магнитной восприимчивости от температуры. Результаты измерений разбились на две группы (рис. 2): заметно изменяющихся

при нагреве (0940/3, 09152/14, 6630/9) и практически стабильных (остальные). Последние отличаются по практической повторяемости кривых нагрева и охлаждения, а также кривых повторного нагрева. Группа нестабильных образцов при первом нагреве дают кривые, характерные для гомогенного титано-

магнетита. Плавный ход кривой немного нарушают небольшие искажения в районе 400°C . Скорей всего, они вызваны минералогическими изменениями, последствия которых наблюдаются в сдвигах кривых охлаждения и повторного нагрева. Это хорошо просматривается при сравнении кривых первого и второго нагрева образца 0940/3. А именно, температуры Кюри основной фазы, полученные по кривой первого и второго нагрева, близки (330 и 338°C , соответственно, см. рис. 3). Следовательно, появившийся перегиб на кривой второго нагрева — это место перехода основной фазы ферритмагнетика в парамагнетик при продолжении плавного уменьшения магнитной восприимчивости новой магнитной фазы магнетика. При термомагнитном анализе стабильного образца 6604/3 тоже можно выявить проявление единственной первичной фазы титаномагнетита, но со значительно меньшими окислительными эффектами при повторях. Из этих соображений расчёт T_C для всех этих (нестабильные и 6604/3) образцов проводился по кривой первого нагрева как для гомогенного титаномагнетита.

Все остальные образцы имеют кривые первого нагрева весьма похожие на кривую второго нагрева окисленного после первого нагрева образца 6630/9 с перегибом кривой на участке падения. То есть кроме основной фазы титаномагнетита в них до опыта присутствует магнитная фаза продуктов окисления, произошедшего при существовании в наземных условиях. Следует обратить внимание на незавершённость перехода к нулю кривых 0614 и 09 152/28. Это может свидетельствовать о наличии магнетитовой компоненты, которая имеет $T_C = 675^\circ\text{C}$.

По результатам анализа T_C основной фазы магнетика все образцы также разбились на две группы с довольно кучными результатами. В первой группе $T_C = 326 \pm 3^\circ\text{C}$, в другой $T_C = 440 \pm 9^\circ\text{C}$. Расчёты по номограмме указывают на вероятное существование древних магматических очагов на глубинах 30 ± 5 км и 14 ± 6 км, соответственно.

Выяснилось, что и по валовому химическому составу эти группы образцов существенно отличаются. В первую группу попали андезибазальты извержений, произошедших 2,4–3,0 тыс. лет назад (л. н.), во вторую — андезиты с возрастом 5,2–5,3 тыс. л. н. (здесь и далее — радиоуглеродный возраст) [3]. Малый разброс T_C в группах говорит об однородности магнитных свойств внутри групп, то есть гомогенности магнетиков, образовавшихся в равновесной среде каждого из двух существенно разных магматических очагов. Следует заметить, что в каждой группе образцы тефры принадлежат двум разным, хотя и близким по времени извержениям (рис. 2). Следовательно, T_C может служить хорошим индикатором магмы конкретного очага.

В работе [5] на основе сейсмических данных с привлечением других геофизических методов зона инверсии скорости в интервале глубин 9–13 км

под Авачинским вулканом интерпретируется как коровый магматический очаг. А в работах [20–21] по сейсмологическим данным под вулканом выделен глубинный магматический очаг на уровне начиная с 20–30 км и ниже. В эти модели хорошо вписываются наши расчётные оценки, а именно: гипотетический магматический очаг, поставивший на поверхность андезиты ≈ 5 тыс. л. н., находился на глубине ≈ 14 км, а очаг, источник андезибазальтов ≈ 3 тыс. л. н., — на глубине ≈ 30 км.

Однако необходимо обратить внимание на итоги петрологического изучения продуктов двух извержений Молодого конуса Авачинского вулкана 3,5 и 3,3 тыс. л. н. в работе [26]. Из анализа авторов вытекает, что на начальном этапе формирования Молодого конуса система его питания состояла одновременно из двух разноглубинных очагов. Нижнекоровый очаг поставлял андезитовые магмы, а в приповерхностном очаге находились более основные. Эту схему сближает с нашей наличие корового андезитового очага, а также предполагаемый переход на последнем этапе питания вулкана на периферический очаг. Существенное расхождение состоит в том, что в нашей схеме фигурирует активный глубинный очаг, по отношению к которому остальные очаги вторичны. Частичные расхождения этой схемы с нашей трактовкой, на первый взгляд кардинальные, скорее носят дискуссионный характер и на начальном этапе опробования метода ориентируют в постановке первоочередных задач дальнейших исследований.

Трещинное Толбачинское извержение 2012–13 гг.

При исследованиях лавы этого извержения было выявлено немало признаков существенно восстановительной среды в ней: включения самородных металлов (медь, алюминий, железо), обнаружение алмазов, отложение серы на выходах в точках дегазации [13]. Такие особенности характерны для глубинной магмы. Поскольку T_C титаномагнетитов, образующихся в магме, сильно зависит от концентрации кислорода в среде, было бы логично применить это свойство как оксидометр для подтверждения глубинного происхождения магмы этого извержения. Для этого мы воспользовались отобранными на лавовых полях образцами (рис. 4).

Нами был проведён термомагнитный анализ двух лавовых образцов АТ10 и РК13–6. Первый отобран из текущего лавового потока, остужен и изучен на каппа-мосте в лаборатории. Температурная кривая магнитной восприимчивости АТ10 показала стабильность магнитных минералов при нагреве до 350°C (рис. 5а). При более высоких температурах заметны сильные химические изменения магнитных минералов в процессе нагрева на воздухе (рис. 5а и 5б). Эти изменения выглядят существенно сильнее, чем у рассмотренных выше образцов тефры Авачинского вулкана. Благодаря большой крутизне кривой из-за эффекта Гопкинсона (подъём на кривой магнитной восприимчивости перед T_C),

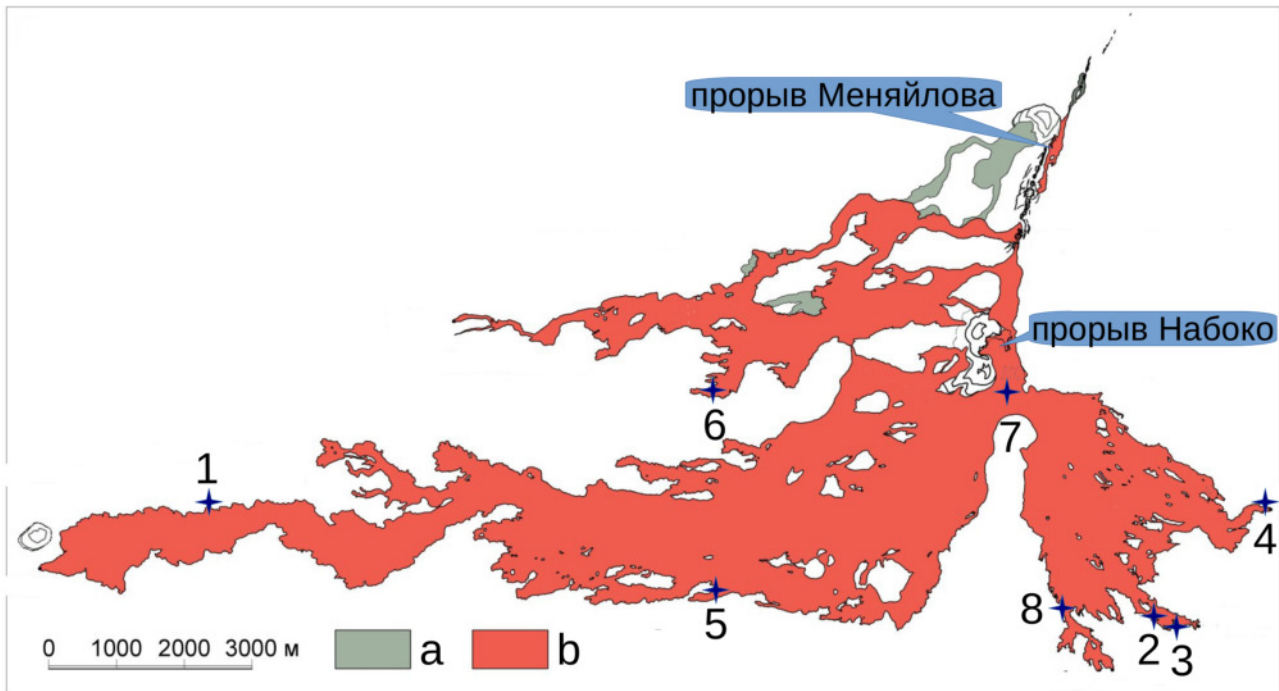


Рис. 4. Точки отбора образцов из лавовых потоков Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. Номера точек соответствуют порядковым номерам в табл. 1. *a* — потоки извержения 1941 г., *b* — потоки 2012–2013 гг. Карта потоков заимствована из [9].

Таблица 1. Результаты изучения лавовых образцов Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.

№	образец	дата отбора	источник излияния — прорыв	зёрна: анализ/расчёт	X_1	X_2	X_3	глубина очага, км
1	A1	09.12.12	Набоко	10/9	$0,48 \pm 0,05$	$0,51 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,05$	35 ± 10
2	Tolb-10-07-13	10.07.13	Набоко	21/21	$0,49 \pm 0,04$	$0,48 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,04$	37 ± 9
3	To-19	12.02.13	Набоко	(1+2)/3	$0,53 \pm 0,02$	$0,48 \pm 0,01$	$0,48 \pm 0,03$	38 ± 8
4	TOLB 1317-2	16.08.13	Набоко					
5	TOLB 1201	29.11.12	Меняйлова	5/4	$0,58 \pm 0,06$	$0,54 \pm 0,08$	$0,55 \pm 0,06$	44 ± 11
6	TOLB 1202	30.11.12	Меняйлова	3/3	$0,57 \pm 0,04$	$0,57 \pm 0,03$	$0,56 \pm 0,03$	46 ± 8
7	AT10	11.01.13	Набоко	все	$J_i(T) T_C = 230 \pm 5^\circ \text{C}$		$0,53 \pm 0,01$	43 ± 6
8	PK13-6	17.08.13	Набоко	все	$J_s(T) T_C = 250 \pm 5^\circ \text{C}$		$0,51 \pm 0,01$	40 ± 6

очень чётко определяется T_C исходного ферромагнетика (табл. 1).

Образец PK13–6 был отобран из остывшего лавового потока, а его кривая намагниченности насыщения (рис. 6) дала T_C , сходную с таковой у образца AT10 (табл. 1). Однако, эта кривая необычна тем, что при нагреве до 700°C она не выходит на ноль. Причина может быть в высоком парамагнитном сигнале, либо в наличии другого магнетика с повышенной T_C . Такое поведение кривой термоманитного анализа образца PK13–6 в высокотемпературном диапазоне хорошо сочетается с фактом вышеупомянутого обнаружения небольшого количества самородного железа [13], которое обычно имеет $T_C = 770^\circ \text{C}$. В нашем случае прямого подтверждения наличия самородного железа термоманитным

анализом не получилось из-за отсутствия технической возможности нагрева на использованной аппаратуре выше T_C чистого железа. В табл. 1 представлена вычисленная глубина магматического очага, которая определена по T_C каждого образца.

Кроме использования термоманитного анализа для определения глубины равновесного магматического очага в данном случае удалось опробовать альтернативный способ по химическому составу зёрен титаномагнетита. В результате проведения микронзондового анализа 42-х титаномагнетитовых зёрен из 6 лавовых образцов из разных потоков (рис. 4) получена величина усреднённой молярной доли ульвошпинели (табл. 1). Из-за малого представительства проанализированных зёрен в образцах To-19 и TOLB 1317–2 при расчёте их данные объеди-

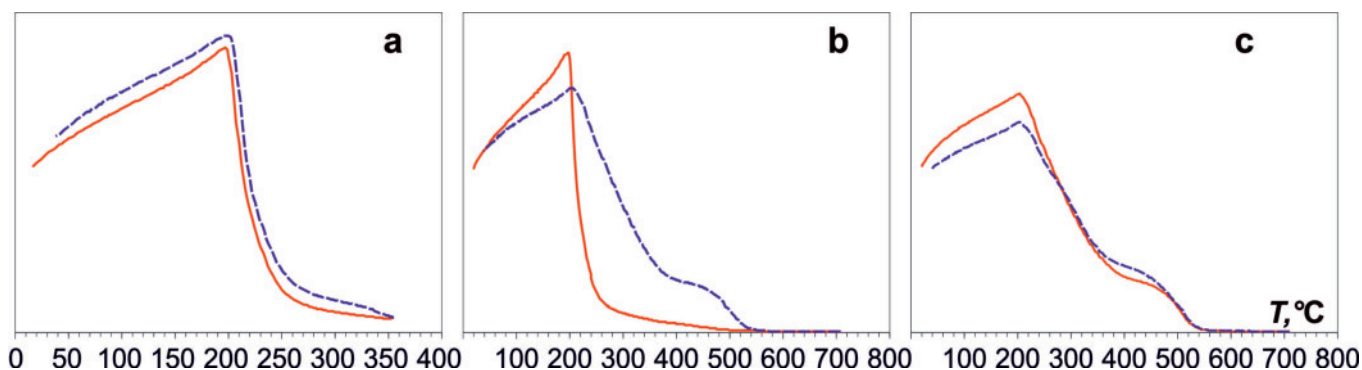


Рис. 5. Температурная зависимость магнитной восприимчивости образца лавы АТ10 Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. *a* — нагрев до 350°С, *b* — первый нагрев новой порции до 700°С, *c* — второй нагрев до 700°С. Условные обозначения линий как на рис. 2

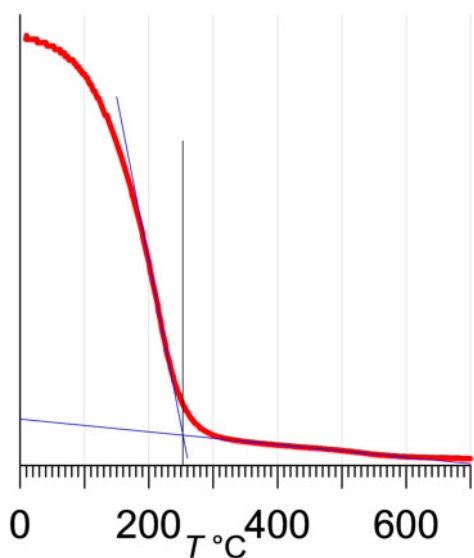


Рис. 6. Температурная зависимость намагниченности насыщения образца лавы РК13–6 Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг.

нены. При анализе результатов данные по одному зерну титаномагнетита из образцов А1 и TOLB 1201 были исключены из-за существенных различий с соответствующими параметрами других зёрен в образце. Интересно, что в исключённом зерне титаномагнетита TOLB 1201 практически отсутствует магнетитовый минал, и практически все трёхвалентное железо связано в минале магнезиоферрита ($MgFe_2O_4$), поэтому рабочая формула состоит только из ульвошпинелевого минала.

В табл. 1 представлены расчёты величины X всеми тремя предложенными выше способами. Мы полагаем, что из всех вариантов расчёта наиболее достоверным является третий, более детально учитывающий влияние примесей. Согласно этому получено среднее по всем образцам: $X = 0,48 \pm 0,05$. Это соответствует глубине очага $H = 38 \pm 10$ км.

Разброс значений во всех этих анализах связан, по-видимому, с окислительными процессами в горячих лавовых потоках при разных условиях доступа атмосферного кислорода. Поскольку при микрозон-

довом анализе у нас задействовано значительно меньше зёрен титаномагнетита, чем при термоманитном, что привело к большому разбросу результатов, оставим предпочтение результатам второго. Усреднив T_C , мы получили итоговую глубину магматического очага $H = 42 \pm 6$ км. Это среднее значение практически совпадает с вышеуказанным средним результатом, полученным из микрозондового анализа. Таким образом, двумя способами подтверждается глубокое залегание магматического очага этого трещинного извержения.

Следует отметить, что данные по глубинам очагов извержения 2012–2013 гг., более древних лав Толбачинского вулкана и Южного прорыва БТТИ близки (табл. 1). А вот результат по Северному прорыву БТТИ заметно отличается от других.

Вулкан Ключевской. Кривая температурного хода намагниченности насыщения по образцу из бортового вала латерального извержения Ключевского 1987 г. почти повторяет классическую форму кривой на рис. 1. Отличие состоит в присутствии магнетитовой фазы, которая часто сопутствует основной фазе как продукт гетерофазного окисления некоторой части последней. Выделяемая по кривой фаза первичного титаномагнетита указывает на $T_C = 320 \pm 5^\circ\text{C}$, что позволяет определить глубину соответствующего магматического очага $H = 31 \pm 6$ км.

Окончательные результаты по всем упомянутым вулканам представлены в табл. 2 и на схеме рис. 7. Наши значения глубины очага по Ключевскому вулкану близки данным из [10], хотя там изучено другое извержение этого вулкана. Материалы геофизических исследований в районе Ключевской группы вулканов, свидетельствующие о существовании на глубине 25–35 км низкоскоростной зоны, которая ассоциируется с вероятным магматическим очагом в нижней части земной коры [23], также не противоречат нашим оценкам.

Выводы

- В результате применения титаномагнетитового метода удалось определить глубины современных магматических очагов вулканов Авачинский,

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

объекты	$T_C, ^\circ\text{C}$	Авторская глубина очага, км, [источник]	Глубина очага по номограмме, км
базальты Толбачинского извержения 2012–13 гг.	240±10		42±6
лава Авачинского вулкана 1991 г.	520±5		5±3
тефра Авачинского вулкана 3 т.л.н.	326±3	[данная работа]	30±5
тефра Авачинского вулкана 5 т.л.н.	440±9		14±6
лава Ключевского вулкана 1987 г.	320±5		31±6
базальты Толбачинского вулкана	250–275	[1]	32–45
	275	[10]	32–42
Северный прорыв БТТИ	350	30–40 [10]	22–32
Южный прорыв БТТИ	220	30–40 [10]	40–50
главный конус Ключевского вулкана	275	[10]	32–42
пепел Ключевского вулкана	350–400	[6]	15–32
пепел вулкана Шивелуч	430–450	[6]	9–20
андезиты пиропотока в. Шивелуч	525	[1]	5±3
некоторые андезиты Удинских вулканов	525	[1]	5±3
ранние извержения в. Ильинский	250–275	[2]	32–45
поздние извержения в. Кошелева	300–400	20–40 [2]	15–38
о. Парамушир	350–375	[2]	18–32
о. Симушир	250	45–55 [2]	35–45
о. Кунашир (Тятя, Головнина, Менделеева)	250	45–55 [2]	35–45

Ключевской, а также Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг..

- Имеющиеся петрологические и геофизические данные о существующем периферическом очаге Авачинского вулкана хорошо согласуются с результатами, полученными нами по титаномагнетитовому методу.
- Периферический очаг Авачинского вулкана содержит равновесную для своей глубины магму. т. е., очаг с магмой существует достаточно долго и это не промежуточный резервуар, где произошло временное накопление магмы при подъёме.
- Изученный образец из лавовой пробки Авачинского вулкана состоит из лавы только периферического очага. Признаков подмешивания глубинной магмы в периферическом очаге пока не выявлено.
- Получены сведения о глубинах двух древних магматических очагов Авачинского вулкана, не противоречащие данным проведённых ранее геофизических исследований.
- Параметр T_C может использоваться не только для грубых прикидок глубин очагов, но и для точного определения принадлежности или непринадлежности продуктов извержения определённого магматическому очагу.
- Выяснилось, что при применении титаномагнетитового метода возможно успешное использование не только лав, но и тефры. Однако, этого

опыта недостаточно. Желательны сравнительные исследования.

- Несмотря на невысокую точность, титаномагнетитовый метод может иметь большие перспективы при изучении строения вулканических аппаратов благодаря неперемому присутствию титаномагнетитов в практически любых вулканических продуктах и невысокой затратности термомагнитных анализов.
- Независимое выявление титаномагнетитовым методом трёх магматических очагов Авачинского вулкана, действовавших в последние 6 тысяч лет, говорит о возможности изучения этим методом истории развития вулканического аппарата. Это важно для выявления связи с периодами вулканической активности и прогноза вулканической деятельности.

Благодарности

Благодарим исследователей, поделившихся с нами образцами вулканитов Камчатки: П. Ю. Плечова, Н. А. Малик. Благодарность также И. Грибоедовой за предоставление данных микросондового анализа зёрен титаномагнетита и В. В. Попову за помощь в проведении термомагнитного анализа. Спасибо А. О. Волынец за содействие в поисках данных по составу титаномагнетитов. Особая благодарность Д. М. Печерскому за консультации по применению методики.

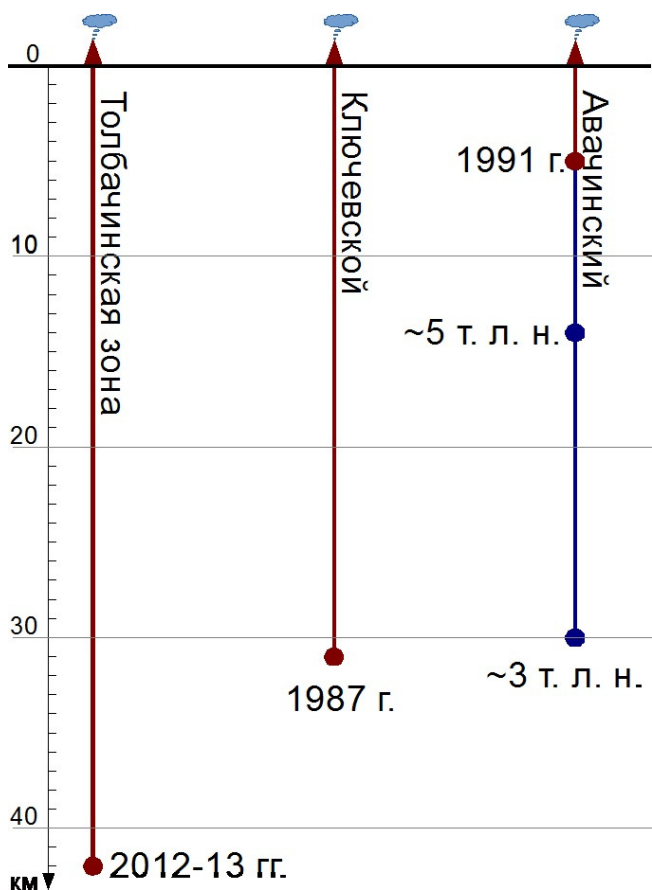


Рис. 7. Сравнительная схема вулканических аппаратов изученных вулканов.

Список литературы

1. Алытова О. М. Термомагнитное 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-Камчатской островной дуги по данным термомагнитных исследований вулканических пород // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1971. № 5. С. 57–68.
3. Базанова Л. И., Брайцева О. А., Дирксен О. В. и др. 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., Гонтовая Л. И., Гринь Н. Е., Сенюков С. Л. Возможности сейсмического метода при изучении зон питания современных вулканов // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 42–53.
5. Балеста С. Т., Гонтовая Л. И., Каргопольцев А. А. и др. Сейсмическая модель Авачинского вулкана (по данным КМПВ-ГСЗ) // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 43–55.
6. Гендлер Т. С., Диденко А. Н., Кирьянов В. Ю., Земцов А. Н. Магнитная минералогия пеплов Камчатки; возможности 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.
7. Гонтовая Л. И., Ризниченко О. Ю., Нурждина 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.
8. Грачев А. Ф., Печерский Д. М., Цельмович В. А. Титаномагнетиты и ильмениты из раннекайнозойских базальтов и лимбургитов Северного Тянь-Шаня // Физика Земли. 2011. № 6. С. 13–25.
9. Двигало В. Н., Свирид И. Ю., Шевченко А. В. Первые количественные оценки параметров трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 3–21.
10. Ермаков В. А., Печерский Д. М., Шаронова З. В. Петромагнитная характеристика четвертичных вулканических пород Центральной Камчатки // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли. 1982. № 12. С. 76–87.
11. Зубов А. Г., Ананьев В. В. О методике определения глубин магматических палеоочагов по составу и магнитным свойствам титаномагнетитов // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29–30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 194–200.
12. Зубин М. И., Козырев А. И. Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. № 1. С. 81–94.
13. Карпов Г. А., Силаев В. И., Анисин Л. П. и др. Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 3–20.
14. Лыков А. В., Печерский Д. М. Экспериментальное исследование связи магнитных свойств базальтов с условиями их образования // Изв. АН СССР, сер. Физика Земли. 1977. № 4. С. 65–74.
15. Мороз Ю. Ф., Гонтовая Л. И. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 3–10.
16. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 348 с.
17. Печерский Д. М. Петромагнетизм и палеомагнетизм // М.: Наука, 1985. 128 с.
18. Печерский Д. М., Диденко А. Н. Палеоазиатский океан; петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 298 с.
19. Печерский Д. М., Попов А. А., Шаронова З. В. Петромагнитная характеристика четвертичных лав вулкана Эльбрус // Изв. АН СССР, сер. Геологическая. 1980. № 9. С. 37–48.
20. Фарберов А. И. Магматические очаги вулканов Восточной Камчатки по сейсмологическим данным. Новосибирск: Наука, 1974. 88 с.
21. Федотов С. А., Потапова О. В. Предварительная карта тел на глубинах 30–100 км в верхней мантии под Камчаткой, экранирующих Р – и S-волны // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. М.: Наука, 1974. С. 176–179.

22. Федотов С. А., Сугробов В. М., Уткин И. С., Уткина Л. И. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло – и электроснабжения // Вулканология и сейсмология. 2007. №1. С. 32–46.
23. Хубуня С. А., Гонтовая Л. И., Москалёва С. В. Малоглубинный очаг вулкана Ключевской (по данным петрологии и геофизики). // Материалы конференции, посвящённой Дню вулканолога, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2008. С. 291–304.
24. Buddington, A. F., Lindsley, D. H. Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology* 5. 1964. 310–357.
25. Lattard, D., Engelmann, R., Kontny, A., Sauerzapf, U. Curie temperatures of synthetic titanomagnetites in the Fe–Ti–O system: Effects of compositions, crystal chemistry, and thermomagnetic methods. *Journal of Geophysical Research*. 2006. 111, B12S28, doi:10.1029/2006JB004591.
26. Maximov A., Puzankov M., Bazanova L. The Plumbing System at the Initial Period of the Young Cone Formation, Avachinsky Volcano (Kamchatka) // Abstracts of IUGG XXIV General Assembly. 2007. 10 358.
27. Viccaro, M., Giuffrida, M., Nicotra, E., Ozerov, A.Yu. Magma storage, ascent and recharge history prior to the 1991 eruption at Avachinsky Volcano, Kamchatka, Russia: Inferences on the plumbing system geometry. *Lithos* 2012. 140–141, 11–24