

УДК 521.21

ПЕРИФЕРИЧЕСКИЙ МАГМАТИЧЕСКИЙ ОЧАГ БАЗАЛЬТОВОГО ВУЛКАНА ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК, КАМЧАТКА: ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ, ПОЛОЖЕНИЕ И ГЛУБИНА, РАЗМЕРЫ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ ПО ДАННЫМ О РАСХОДЕ МАГМ

© 2011 г. С. А. Федотов^{1,2}, И. С. Уткин¹, Л. И. Уткина¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123995 Москва, Бол. Грузинская ул., 10,
e-mail: isutliut@mail.ru, karetn@list.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9,
e-mail: fedotov@kscnet.ru

Поступила в редакцию 14.07.2011 г.

Наиболее мощным вулканическим центром на островных дугах и в зонах подвига литосферных плит является Ключевская группа вулканов (КГВ), Камчатка. В голоцене вулканическая деятельность в южной части КГВ сосредоточена в крупном базальтовом вулкане Плоский Толбачик (ПТ), высота 3085 м, и его Толбачинской зоне шлаковых конусов (ТЗ), длина 70 км, которые сходны с вулканами гавайского типа и их рифтами. Извергаются базальты разного типа с расходом 18×10^6 т/г. В работе приводятся сведения о периферическом магматическом очаге ПТ, полученные несколькими независимыми способами. Использовались данные о развитии, извержениях, расходе магм, деформациях, землетрясениях ПТ и ТЗ, а также расчеты размеров проточного магматического очага ПТ. По сейсмологическим и геодезическим данным этот очаг располагается под вершинной кальдерой ПТ, его поперечные размеры менее 6 км, кровля очага находится на глубине 2 км. По данным проведенных расчетов поперечный размер очага равен 4.9–5.8 км, вертикальный размер 3.2–3.9 км, объем очага 40–70 км³, а его центр находится на глубине около 4 км.

Приведенные сведения поясняют свойства этого источника глиноземистых базальтов ПТ и ТЗ, а также всей сложной магматической питающей системы КГВ.

ВВЕДЕНИЕ

Ключевская группа вулканов (КГВ), которая располагается на Камчатке в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг, является наиболее мощным вулканическим центром островных дуг и зон подвига литосферных плит на Земле [Влодавец, 1940; Влодавец, Пийп, 1940; Действующие вулканы ..., 1991; Федотов и др., 2010; Fedotov et al., 2010] (рис. 1).

В южной части КГВ находится массив двух крупных базальтовых стратовулканов возраста 40–50 тыс. лет – потухшего вулкана Острый Толбачик (ОТ) и действующего вулкана Плоский Толбачик (ПТ) (рис. 2).

Вулкан Плоский Толбачик, высота 3085 м, имеет ряд особенностей, которыми он отличается от других вулканов Курило-Камчатской дуги: вершинная кальдера гавайского типа, диаметр 3.5 км; появление лавового озера и выбросы базальтовых нитей (“волосы Пеле”) и кристаллов плагиоклазов в ней; две радиальные линейные зоны шлаковых конусов общей длиной 70 км; сходные с рифтами гавайских вулканов; волнистые базальтовые лавы

гавайского типа и лавовые трубы в Толбачинской зоне шлаковых конусов, и др. По своей продуктивности (17.4 млн т/год) ПТ относится к числу наиболее мощных вулканов Курило-Камчатской дуги вместе с вулканами Ключевской и Шивелуч.

Магматическая питающая система ПТ и Толбачинской зоны шлаковых конусов образует южную часть гигантской питающей магматической системы всей КГВ. В этой части находится периферический магматический очаг ПТ. В данной работе рассматриваются и рассчитываются свойства этого очага: источники магм, питание, деятельность, размеры очага и их изменения по данным о расходе магм вулкана со времени его образования.

В разделе 1 кратко рассматриваются вулканические сведения о формировании, развитии, деятельности и составе базальтов массива вулканов Острый и Плоский Толбачик и Толбачинской зоны шлаковых конусов и о вероятных свойствах их магматической питающей системы.

В разделе 2 приводятся вулканологические и геодезические данные о вершинной кальдере гавайского типа, ее свойствах, деятельности и круп-

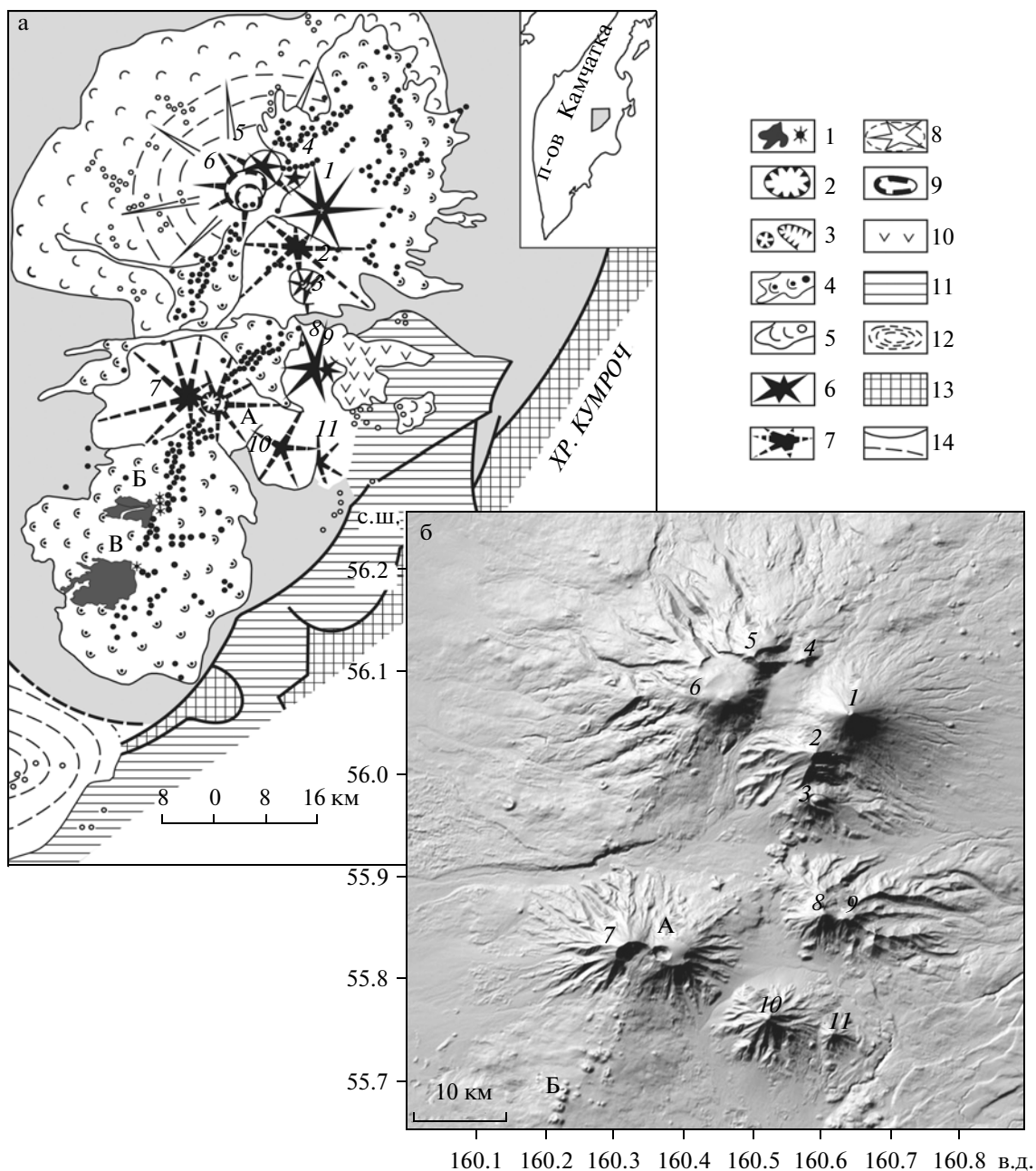


Рис. 1. Схематическая карта района извержения Ключевской группы вулканов (КГВ).

а – расположение активных и потухших вулканов: 1 – лавовые потоки Северного (Б) и Южного (В) прорывов БТТИ; 2 – свежая кальдера обрушения на вершине Плоского Толбачика, образовавшаяся в ходе БТТИ (А); 3 – крупнейшие кратеры; 4 – голоценовые шлаковые конусы и их лавовые потоки; 5 – позднеплейстоценовые шлаковые конусы и их лавовые потоки; 6 – крупные голоценовые стратовулканы; 7 – крупные позднеплейстоцен-голоценовые вулканы; 8 – щитовой вулкан в основании Ушковского и Крестовского вулканов; 9 – голоценовые кальдеры обрушения на вершинах вулканов Плоский Толбачик и Ушковский; 10 – сильно разрушенный вулкан Горный зуб; 11 – лавовые плато; 12 – щитовой вулкан Николка; 13 – дочетвертичные породы складчатого фундамента; 14 – разломы, выраженные в рельефе, и погребенные. Номера на рис. 1а обозначены вулканы: 1 – Ключевской, 2 – Камень, 3 – Безымянный, 4 – Средний, 5 – Крестовский, 6 – Ушковский, 7 – Острый Толбачик, 8 – Большая Зимина, 9 – Малая Зимина, 10 – Большая Удина, 11 – Малая Удина.

б – плановый космический снимок КГВ, номера вулканов те же.

ном проседании и оттоке магм, происходивших во время Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг.

В разделе 3 приводятся данные о местоположении и развитии роев землетрясений, происходивших под ПТ во время проседания его вершинной



Рис. 2. Вулканы Острый и Плоский Толбачик (ОТ и ПТ). Вид с юга вдоль Ключевской группы вулканов (см. рис. 1). На переднем плане: слева – ОТ, справа – вершинная кальдера ПТ, расстояние между вершиной ОТ и восточным краем кальдеры ПТ равно 7 км; в центре массива провал кальдеры диаметром 1.7 км, образовавшийся во время БТТИ в 1975–1976 гг. На заднем плане: слева – вулканы Ушковский и Крестовский, справа – вулканы Ключевской, Камень и Безымянный. Снимок В.Е. Гиппенрейтера [Действующие вулканы ..., 1991].

кальдеры во время Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг.

В разделе 4 на основании данных 1–3 выбирается модель проточного периферического магматического очага ПТ и по данным о расходе магм в течение его деятельности рассчитываются размеры и объем очага, их изменение во времени и современные размеры.

В заключительном разделе содержатся обсуждение результатов и краткие выводы.

1. ВУЛКАНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ, РАЗВИТИИ, ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И РАСХОДЕ МАГМ ВУЛКАНОВ ОСТРЫЙ И ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК, КГВ

История формирования, строение, деятельность, количество и петрология продуктов извержений массива Острого и Плоского Толбачиков и мощный голоценовый вулканизм шлаковых конусов Плоского Толбачика рассматривались в большом числе работ, начиная с 30-х годов [Влодавец, 1937; Попков, 1940; Пийп, 1946, 1954; Ермаков, Важеевская, 1973; Кирсанов, Пономарев, 1974; Гущенко, 1979; Поляк, Мелекесцев, 1981; Двигало и др., 1984, 1991; Брайцева и др., 1984; Федотов и др.,

1991; Кожемяка, 1994; Ермаков, Ермаков, 2006 и др.].

Данные названных и других исследователей по геологическим и вулканологическим данным показывают, что образование ОТ и ПТ началось 40–50 тыс. лет т. н. В основании этих стратовулканов находится щитовой базальтовый вулкан. В начале голоцена произошла перестройка деятельности ОТ и ПТ: ОТ затих, а в стороны от ПТ протянулась линейная Толбачинская зона шлаковых конусов, в которой к северо-востоку и югу от ПТ стали происходить основные следующие извержения.

Названные выше работы показывают, что в течение 50–10 тыс. лет до н. в. происходили сложное развитие и рост двойного стратовулкана ОТ и ПТ. Их массив сложен базальтами разного типа. Под ним могли существовать отдельные или связанные неглубокие магматические очаги и общий периферический очаг под средней частью массива.

Большие изменения в деятельности вулкана произошли около 10 тыс. лет назад в начале голоцена. У Плоского Толбачика образовалась очень крупная Толбачинская зона шлаковых конусов, протянувшаяся на 20 км на северо-запад от вершинной кальдеры ПТ и на 50 км к юго-западу от него, рис. 1, 3, 4 и 5. Она сходна с рифтами вулканов гавайского типа.

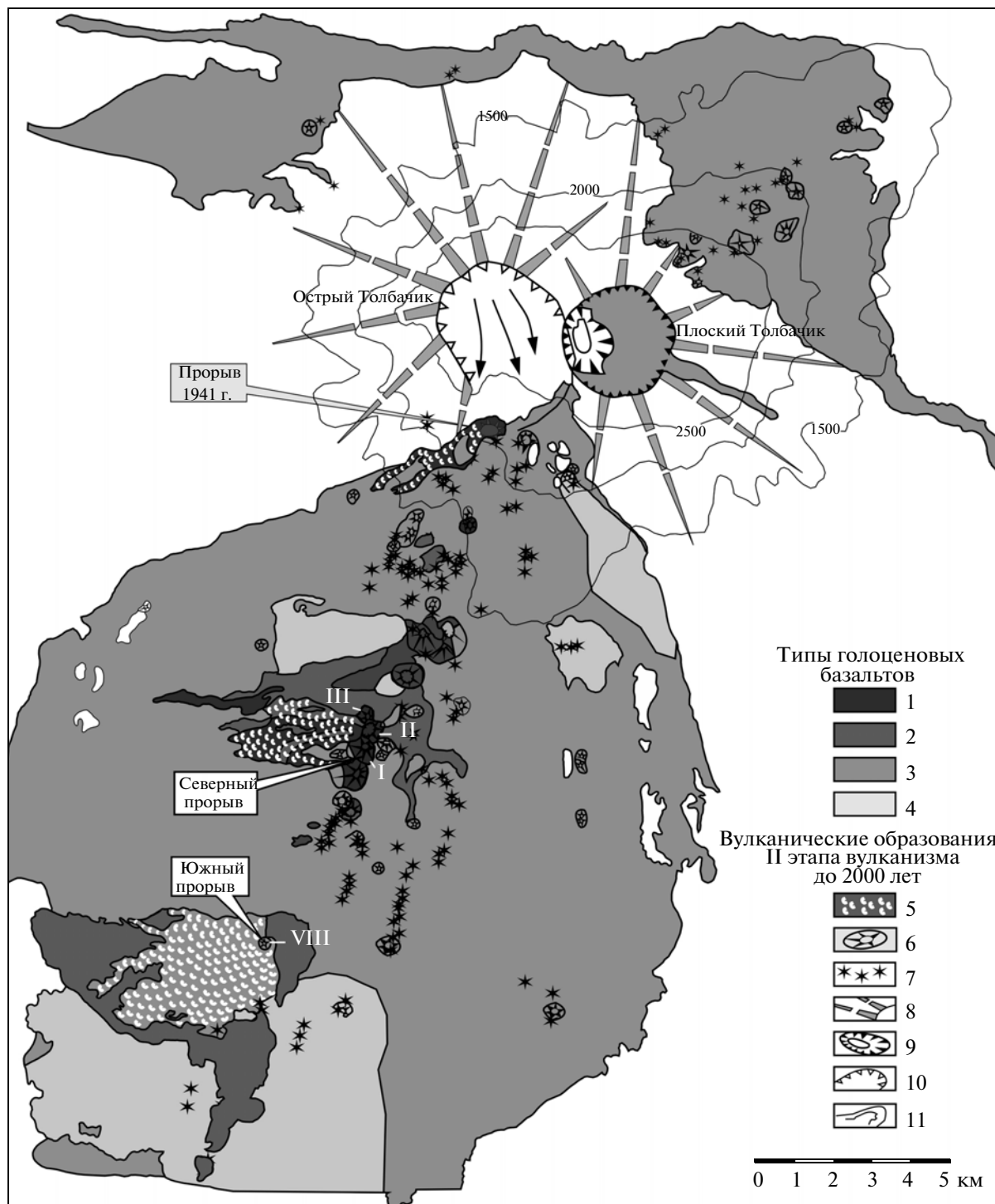


Рис. 3. Карта распространения глиноземистых и магнезиальных голоценовых базальтов в Толбачинской зоне шлаковых конусов.

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 – 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 вулкана Плоский Толбачик; 10 – стенки обвалных цирков; 11 – изолинии высот. Цифрами I, II, III и VIII обозначены конусы Северного и Южного прорывов 1975–1976 гг. Составлена по данным Г.Б. Флерова [Большое трещинное ..., 1984].



Рис. 4. Двойной стратовулкан Толбачик, вид с севера. Справа – Острый Толбачик (выс. 3682 м), слева – вершинная кальдера Плоского Толбачика (выс. 3085 м). Видно выделение газов из провала в кальдере ПТ. От средней части подножия ПТ протягивается северо-западная часть Толбачинской зоны шлаковых конусов. 1976 г. Снимок С.А. Федотова.

В голоцене в вершинной кальдере ПТ извергались только субщелочные глиноземистые базальты (характерные жидкие мегаплагиофировые лавы). Они же преобладали на всей площади обеих частей Толбачинской зоны шлаковых конусов, рис. 3. Их главным источником мог быть Плоский Толбачик и его периферический магматический очаг, из которого базальты этого типа могли внедряться по неглубоким зонам нейтральной плавучести на десятки км вдоль Толбачинской зоны шлаковых конусов. Данные о таких перемещениях приведены в работах [Федотов и др., 2010; Fedotov et al., 2010 и др.].

В течение всего времени деятельности Толбачинской зоны шлаковых конусов в ней преобладали субщелочные высокоглиноземистые базальты, весовая доля которых превышала 81%. Кроме них извергались 4% глубинных высокомагнезиальных базальтов и около 15% базальтов промежуточных типов [Брайцева и др., 1984].

Высокомагнезиальные базальты Толбачинского дола, наиболее глубинные изверженные породы Камчатки, поступают на поверхность в осевой части Толбачинской зоны к югу от ПТ. Это наблюдалось в историческое время в 1941 и 1975–1976 гг. (см. рис. 3) [Пийп, 1946, 1954; Большое трещинное ..., 1984]. Эти базальты поднимаются из нижних слоев коры и не были связаны с периферическим очагом ПТ [Федотов и др., 2010 и др.]. Около 15% базальтов Толбачинского дола, относящихся к промежуточным типам, могут об-

разоваться при смешении высокомагнезиальных и высокоглиноземистых базальтовых магм в южной части магматической питающей системы КГВ. Такое смешение может происходить в неглубоких коровых очагах, находящихся под ТЗ [Балеста и др., 1984].

Для дальнейших расчетов существенно то, что в голоцене более 80% магм ПТ и Толбачинской зоны шлаковых конусов могли проходить через периферический магматический очаг ПТ.

2. ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ПРОВАЛЕ ВЕРШИННОЙ КАЛЬДЕРЫ ПЛОСКОГО ТОЛБАЧИКА И ОТТОКЕ МАГМ ИЗ НЕЕ И ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО ОЧАГА ВО ВРЕМЯ БОЛЬШОГО ТРЕЩИННОГО ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ, 1975–1976 ГГ.

Важные данные о неглубоком магматическом очаге ПТ были получены при исследованиях во время Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ), 1975–1976 гг., которое произошло в южной части Толбачинской зоны шлаковых конусов. Северный и Южный прорывы извержения находились на расстоянии 18 и 28 км от вершинной кальдеры ПТ, рис. 1, 3. Извержение 2.2 км³ базальтов из Северного и Южного прорывов извержения сопровождалось, по геодезическим данным, проседанием дна вершинной кальдеры ПТ и опусканием его постройки общей величиной бо-



Рис. 5. Вид с юга вдоль Толбачинской зоны шлаковых конусов. На переднем плане конус VIII в Южном прорыве БТТИ, относительная высота около 160 м. В 10 км севернее него крупные конусы I и II Северного прорыва БТТИ, 1975 г. За ними вдали на расстоянии 28 км от конуса VIII двойной стратовулкан Толбачик. Парит провал 1975 г. в вершинной кальдере ПТ. 1976 г. Снимок С.А. Федотова.

лее 0.4 км^3 . Эти данные подтвердили представления о существовании большого периферического магматического очага под ПТ и показали минимальные размеры оттока глиноземистых базальтов из этого очага во время БТТИ [Большое трещинное ..., 1984; Двигало и др., 1984; Федотов и др., 1991, 2010; Fedotov et al., 2010; The great Tolbachik ..., 1983].

Примечательной особенностью Плоского Толбачика был провал кратера в его вершинной кальдере гавайского типа, за которым велись наблюдения в 1936–1975 гг. до начала БТТИ. Их описание приведено в работах [Двигало и др., 1984; Двигало и др., 1991 и др.]. Изменение этого провала во времени с 1936 до начала БТТИ 06.VII 1975 г., а также во время и после БТТИ показаны на рис. 6.

До БТТИ в этом кратере периодически наблюдалось лавовое озеро, единственное на Камчатке, и происходили небольшие извержения мегаплаггиофировых базальтов. С 1936 г. до 06.IX 1974 г. глубина провала возросла с 100 до 231 м, а объем увеличился до 0.01 км^3 (см. рис. 6). Примечательно, что в течение предшествующих 25 лет перед БТТИ, 1950–1974 гг., не было значительного роста провала, а его глубина увеличилась только с 221 до 231 м [Двигало и др., 1984].

Огромный рост провала произошел во время деятельности Северного прорыва БТТИ: через 50 дней после его начала глубина кратера увеличилась до 385 м, а объем провала достиг 0.269 км^3 (см. рис. 6).

Описание и снимки возникшего провала в вершинной кальдере ПТ приведены в книгах [Большой

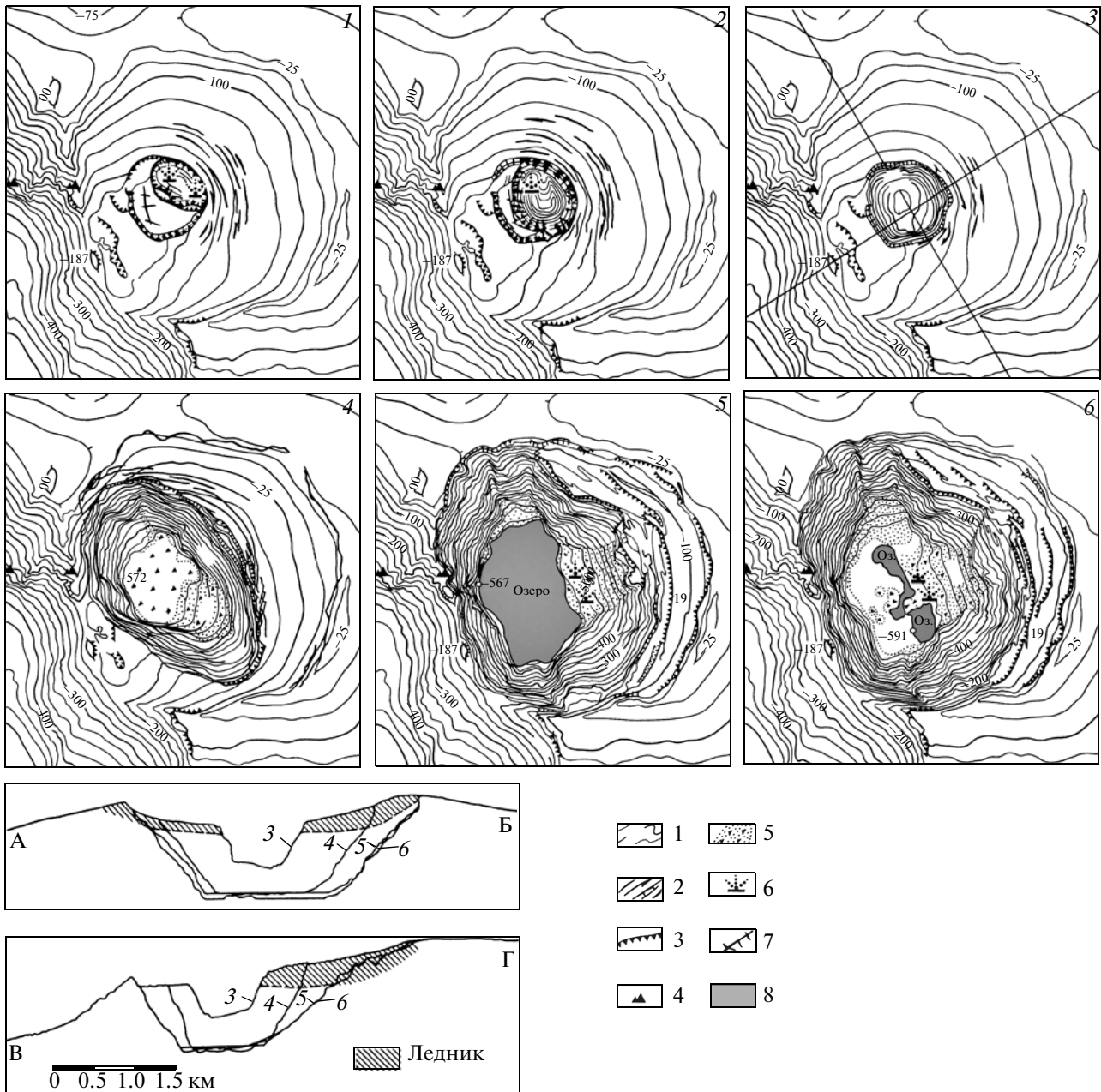


Рис. 6. Графические планы и профили вершинного кратера вулкана Плоский Толбачик.

Графические планы: 1 – 1936 г.; 2 – 1950 г.; 3 – 6.09.1974 г.; 4 – 25.08.1975 г.; 5 – 17.09.1976 г.; 6 – 26.09.1977 г. Положение профилей АБ и ВГ показано на плане 3. Вертикальный и горизонтальный масштабы одинаковы.

1 – горизонтали с условными отметками, м; 2 - трещины в леднике; 3 – обрывы; 4 – скалы-останцы; 5 – осыпи; 6 – фумаролы; 7 – трещины на лавовой площадке в кратере; 8 – озеро талых вод [Двигало и др., 1984].

шое трещинное ..., 1984; Действующие вулканы ..., 1991; Федотов, 2003 и др.]. После такого оттока мегаплагиофировых базальтов из кальдеры ПТ началось смешение начальных глубинных высокомагнезиальных и последовавших коровых высокоглиноземистых базальтов. В конце извержения Северного прорыва и начале извержения Южного порыва в сентябре 1975 г. произошло постепен-

ное изменение состава базальтов БТТИ от магнезиальных к глиноземистым, которые затем извергались в Южном прорыве БТТИ с сентября 1975 г. до окончания БТТИ 10.XII 1976 г. [Большое трещинное ..., 1984].

Во время деятельности Южного прорыва БТТИ продолжалось более медленное проседание провала кальдеры, объем которого к 17.IX 1975 г. возрос

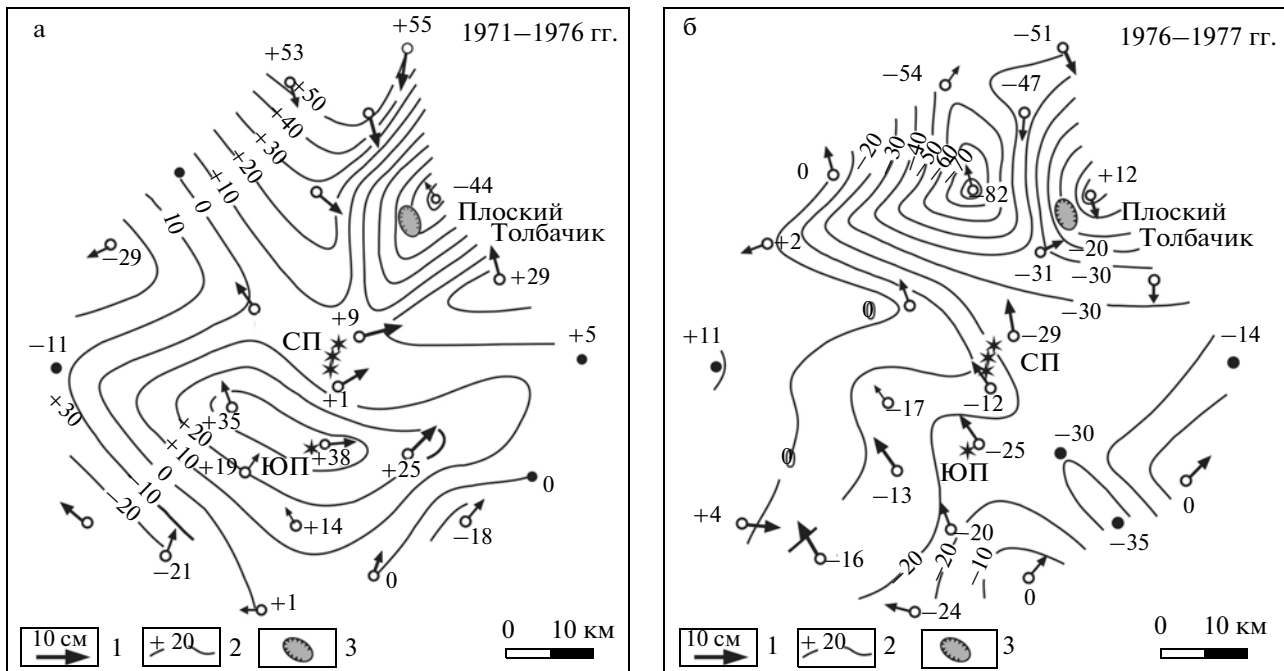


Рис. 7. Горизонтальные и вертикальные смещения поверхности в районе Плоского Толбачика и БТТИ по данным стационарных геодезических наблюдений 1971–1976 гг. и 1976–1977 гг.

а – смещения по данным стационарных наблюдений 1971–1973 гг. и 1976 г. б – горизонтальные и вертикальные смещения по данным 1976 и 1977 гг.

1 – вектор горизонтального смещения пункта; 2 – линии равных вертикальных смещений в см; 3 – положение провала в вершинной кальдере ПТ в 1975 г.; СП – Северный прорыв; ЮП – Южный прорыв (см. рис. 1, 3).

еще на величину 0.07 км^3 до 0.338 км^3 [Двигало и др., 1984 и др.] (см. рис. 6).

В дополнение к оттоку глиноземистых базальтов из вершинной кальдеры ПТ во время БТТИ происходило опускание его постройки, которое было определено по данным стационарных геодезических наблюдений, проводившихся в районе БТТИ и ПТ в 1971–1973, 1976 и 1977 гг. [Федотов и др., 1984 и др.]. Их результаты приведены на рис. 7а, б.

Максимальное опускание земной поверхности в 1971–1976 гг. на 44 см произошло в районе Плоского Толбачика. Размеры области опускания поверхности вокруг Плоского Толбачика в связи с БТТИ превысили 10 км, а объем опускания приблизительно равен 0.1 км^3 , рис. 7а.

Примечательно, что после окончания БТТИ в 1976–1977 гг. опускание земной поверхности сменилось на его подъем (см. рис. 7б).

Приведенные выше данные аэрофотосъемок и стационарных геофизических наблюдений (см. рис. 6, 7) согласуются между собой. Они показывают, что во время БТТИ в 1975–1976 гг. из вершинной кальдеры и из-под постройки Плоского Толбачика произошел отток 0.45 км^3 глиноземистых базальтов. Это количество равно примерно половине объема 0.968 км^3 лав глиноземистых базаль-

тов, которые были извергнуты с 18.IX 1975 г. до 10.XII 1976 г. во время деятельности Южного прорыва БТТИ [Федотов и др., 1984].

Надо отметить, что извержение Южного прорыва началось на абс. высоте 380 м и происходило на 2.2 км ниже дна провала в кальдере ПТ.

В целом данные этого раздела показывают, что под вершинной кальдерой Плоского Толбачика существует большой периферический магматический очаг.

Данные о других коровых магматических очагах в районе БТТИ и ПТ приводились в работах [Балеста, 1981; Балеста и др., 1984 и др.].

3. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ПОЛОЖЕНИИ И ГЛУБИНЕ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО ОЧАГА ВУЛКАНА ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК И ПЕРЕМЕЩЕНИИ МАГМ ИЗ НЕГО ВО ВРЕМЯ БТТИ, 1975–1976 ГГ.

Эти вопросы подробно рассматривались ранее в ряде работ [Федотов и др., 1984; 2010; Fedotov et al., 2010 и др.]. По данным сейсмологических наблюдений, проводившихся во время БТТИ, проседание дна вершинной кальдеры ПТ сопровождалось роями землетрясений. Положение их гипо-

центров показало, что кровля периферического магматического очага ПТ может находиться на глубине 2 км ниже уровня моря, а его поперечные размеры достигать 6 км.

На рис. 8 приведены карта эпицентров и вертикальные разрезы за 10–17.VIII 1975 г., проходящие через Плоский Толбачик и Северный прорыв (СП) БТТИ вдоль Толбачинской зоны шлаковых конусов. Это был один из наиболее напряженных периодов этого крупнейшего сложного базальтового извержения.

Деятельность I большого конуса БТТИ длилась с 6.VII по 8.VIII 1975 г. В течение 10 дней после окончания извержения I конуса происходили большие изменения в деятельности СП. 9.VIII началось образование II большого конуса, а 17.VIII 1975 г. рядом с ним возник III конус [Большое трещинное ..., 1984]. В период, начиная с 10.VIII 1975 г., усилились сейсмические явления под СП, совпавшие с началом деятельности II конуса и связанные с образованием провала в вершинной кальдере ПТ. При этом возник сильный рой землетрясений под ПТ (см. рис. 8). Этот рой показал вероятное положение и глубину кровли периферического магматического очага ПТ. Сейсмологические данные за этот и другие интервалы времени деятельности Северного прорыва подтверждают, что поперечные размеры периферического очага ПТ могут быть около 6 км, глубина кровли очага находится на глубине примерно 2 км ниже уровня моря, а центр очага – на глубине около 4 км [Федотов и др., 1984, 2010; Fedotov et al., 2010 и др.].

По геофизическим данным здесь на глубинах 2–6 км под КГВ залегают слои осадочных пород [Балеста и др., 1984; и др.].

При исследовании глубинного строения под БТТИ и ПТ проводилось сейсмическое просвечивание с использованием преломленных волн от границы кристаллического фундамента. Под ПТ на глубине кристаллического фундамента 7–8 км выявлена неоднородность размером 2–3 км, в которой повышено поглощение сейсмических волн. Предполагается, что она может быть связана либо с магматическим очагом, либо магмоводом ПТ [Балеста, 1981; Балеста и др., 1984]. Такая неоднородность может находиться близко от нижней границы периферического магматического очага ПТ, положение и глубина кровли которого показаны выше по сейсмологическим данным, рис. 8.

Необходимо отметить, что во время наиболее интенсивного увеличения провала в вершинной кальдере ПТ рой землетрясений происходили между ПТ и СП на глубинах менее 4 км (см. рис. 8а, б).

Данные, приведенные выше в разделах 1–3, применяются далее при выборе моделей для расче-

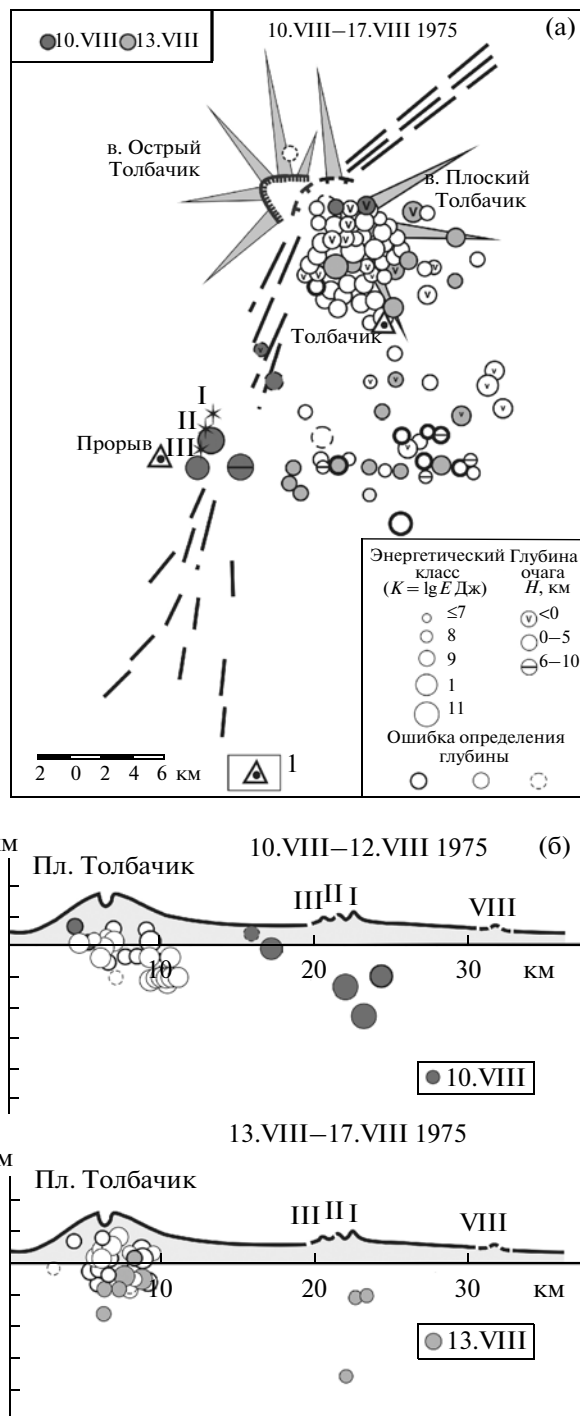


Рис. 8. Карта эпицентров землетрясений 10–17.VIII 1975 г., предвалявших образование III конуса БТТИ 17.VIII 1975 г. (а) и распределение очагов землетрясений этих дней в вертикальной плоскости, проходящей через вулкан Плоский Толбачик и Северный прорыв БТТИ (б).

1 – сейсмические станции. Римскими цифрами обозначены номера новых конусов I, II и III Северного прорыва БТТИ и конуса VIII Южного прорыва БТТИ. Условные обозначения даны на рис. 8а. Ошибки определения глубин, показанные в них, менее 5, 10 и 15 км соответственно. Землетрясения на рис. 8б нанесены из полосы шириной 10 км.

тов свойств, размеров периферического очага ПТ и их возможных изменений.

4. РАСЧЕТЫ РАЗМЕРОВ, ОБЪЕМА ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО ОЧАГА ВУЛКАНА ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК И ИХ ИЗМЕНЕНИЙ ВО ВРЕМЕНИ ПО ДАННЫМ О РАСХОДЕ МАГМ ВУЛКАНА И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТОЛБАЧИНСКОЙ ЗОНЫ КОНУСОВ

Сведения о ПТ и его магматическом очаге, необходимые для постановки расчетов. Геологические и вулканологические данные показывают, что зарождение и дальнейшее образование ОТ и ПТ началось 40–50 тыс. лет т. н. В основании этих стратовулканов находится щитовой базальтовый вулкан. В начале голоцена произошла перестройка деятельности ОТ и ПТ: ОТ затих, а в стороны от ПТ потянулась линейная Толбачинская зона шлаковых конусов, в которой стали происходить основные следующие извержения к северо-востоку и югу от ПТ, раздел 1.

Важные данные о магматическом очаге ПТ неглубокого заложения были получены при исследованиях во время Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ), 1975–1976 г., которое произошло в южной части Толбачинской зоны шлаковых конусов на расстоянии 18 и 28 км от вершинной кальдеры ПТ [Большое трещинное ..., 1984; The great Tolbachik ..., 1983 и др.]. Извержение 2.2 км³ базальтов из Северного и Южного прорывов извержения сопровождалось, по геодезическим данным, проседанием dna вершинной кальдеры ПТ и опусканием его постройки общей величиной более 0.4 км³. Эти данные подтвердили представления о существовании большого периферического магматического очага под ПТ и показали минимальные размеры оттока глиноземистых базальтов из этого очага во время БТТИ, раздел 2.

По данным сейсмологических наблюдений, проводившихся в районе извержения, проседание dna вершинной кальдеры ПТ сопровождалось рывками землетрясений. Положение их гипоцентров показало, что кровля периферического магматического очага ПТ может находиться на глубине 2 км ниже уровня моря, а его поперечные размеры достигать 6 км, раздел 3.

В данном разделе работы приводятся независимые расчетные оценки размеров, объема периферического очага ПТ и их изменений во времени по данным о расходе магм ПТ в течение всего периода деятельности ПТ и извержений Толбачинской зоны шлаковых конусов, начиная с их зарождения.

Модель проточного магматического очага. Применялась разработанная авторами расчетная модель динамики роста и развития проточных магматических очагов, по которой магма поступает в

очаг по коровому каналу с входной температурой T_1 и вытекает из него при извержениях более низкой выходной температурой T_2 . Тепло, остающееся в очаге, идет на нагрев окружающей среды и плавление стенок очага. В зависимости от расхода магмы через очаг происходит рост или уменьшение размеров очага во времени. Модель механизма образования и эволюции проточных магматических очагов, начиная от их зарождения, роста, достижения квазистационарной стадии и последующего медленного застывания была предложена С.А. Федотовым [Федотов, 1980, 2006; Fedotov, 1982 и др.]. Были приведены уравнения, определяющие размеры квазистационарных очагов. Эти представления послужили началом цикла работ по моделированию динамики роста и развития магматических очагов [Федотов, 1980, 2006; Уткин и др., 1999; Федотов и др., 2000; Utkin et al., 1999, Fedotov et al., 2000 и др.].

Решалась следующая задача. На известной глубине H под поверхностью Земли в момент времени t_0 возникает проточный магматический очаг, в который по известному закону изменения расхода $W(t)$ от времени поступает магма, что вызывает плавление стенок очага при температуре T_c^{sol} . Расход магмы во времени может прерываться на непродолжительное время, недостаточное для полного застывания магматического очага во время спада вулканической активности. Расплавленный материал стенок увеличивает объем очага и частично выносится на земную поверхность во время извержений вместе с протекающей через очаг магмой. Освобождающийся объем занимает магма, поступающая в очаг из глубин по нижнему питающему каналу с температурой T_1 большей T_c^{sol} . Размеры очага увеличиваются и достигают максимальных размеров. Расход магмы через очаг в среднем со временем медленно уменьшается, а сам очаг при этом еще длительное время сохраняет почти постоянные квазистационарные размеры. При дальнейшем уменьшении расхода магмы магматический очаг начинает остывать, на его стенках замерзает магма, и его размеры уменьшаются до полного исчезновения в момент времени t_3 . Отрезок времени $(t_0 - t_3)$ определяет длительность существования магматического очага. Рассчитываются изменения размеров очага во времени, оцениваются его максимальные размеры в прошлом и настоящем времени.

При плавлении стенок очага должны выполняться условия на его стенке [Карслоу, Егер, 1964]:

$$L \times \rho_c \frac{dr}{dt} = Q_m - Q_c,$$

где r — текущий радиус очага, t — текущее время, L — скрытая теплота плавления, ρ_c — плотность

вмещающих пород, Q_c — плотность теплового потока, направленного от стенки очага во вмещающие породы, Q_m — плотность теплового потока, направленного из магмы к стенке очага.

Метод расчета. Разработка методов расчета и численное моделирование эволюции размеров магматического очага при меняющемся во времени расходе магм велась и впервые описана в работе [Уткин и др., 1999]. В данном разделе приведены расчеты для очага, имеющего форму эллипсоида с малой вертикальной осью вращения.

Предполагается, что магматический очаг наполнен очень вязкой жидкостью и расположен в твердой вмещающей среде. Движение фронта плавления при убывании теплового потока, проходящего через стенки магматического очага, — возвратно-поступательное. Это соответствует фазам сначала быстрого, затем замедленного роста размеров очага за счет плавления его стенок, пребывания в квазистационарном состоянии, и последующего охлаждения очага и связанного с ним застывания и уменьшения его размеров. Поэтому в основе расчетов положено решение двухфазной задачи Стефана с возвратным движением фронта плавления по методу Р.И. Медведского для сферы или эллипсоида с вертикальной осью вращения [Медведский, 1987]. Применение этого метода дает возможность получения зависимости размеров магматического очага от времени, как решение системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений. Для проведения численного моделирования описанных процессов были разработаны оригинальные алгоритмы и программы, которые многократно совершенствовались, а их функциональные возможности расширялись. Так, от описания закона изменения расхода магмы первоначально кусочно-постоянными функциями стало возможным перейти к произвольному сплайновому описанию временных зависимостей расходов, испытывающих, в том числе, разрывы первого рода. Это дает, сохраняя возможность учитывать длительные паузы между извержениями, не приводящие к полному застыванию магматического очага, значительно точнее рассчитывать процесс накопления им тепла в окружающей среде с учетом эволюции его размеров [Федотов и др., 2007; Уткин и др., 2005, 2009].

Исходные данные для расчетов. При моделировании динамики изменения размеров очага используется небольшое число наиболее достоверных и доступных данных, характеризующих параметры очага и процессы, происходящие в нем.

При расчетах приняты величины расхода магмы вулканов Острый и Плоский Толбачик и Толбачинской зоны шлаковых конусов из работы [Брайцева и др., 1984] с учетом данных других работ, названных в разделе 1.

Очаг существовал и действовал под массивом ОТ и ПТ в период от 40–50 до 10 тыс. лет т. н. с расходом базальтов разного состава величиной 18.2×10^6 т/год. Эта величина равна 9.1×10^6 т/год, если считать, что через этот очаг протекала только половина магм всего массива, а другая половина изверглась близким очагом ОТ.

Далее в голоцене происходило поступление высокоглиноземистых базальтов с расходом 14×10^6 т/год из очага ПТ в Толбачинскую зону шлаковых конусов, в которой они составили более 80% изверженных магм. Расход был равен 15×10^6 т/год в течение 10–1 тыс. лет т. н. и 7.7×10^6 т/г в последней тысяче лет. На рис. 9а, б показаны величины объемных расходов магм, рассчитанные при плотности магм $\rho_m = 2.65 \times 10^3$ г/м³ [Аносов и др., 1978; Брайцева и др., 1984].

При расчетах использовались следующие свойства деятельности вулкана ПТ и его периферического магматического очага. Длительность формирования ≈ 45000 лет, объем магм, изверженных ПТ и ОТ, равен 294 км³. Глубина залегания его периферического магматического очага, в соответствии с сейсмологическими данными, оценивается немногим менее 4 км от уровня моря. Очаг предположительно имеет форму эллипсоида с вертикальной осью вращения.

На рис. 9а показана кусочно-постоянная зависимость расхода магмы от времени для вулкана Плоский Толбачик (по геологическим данным) $W(t)$ км³/год. Суммарный объем изверженных магм равен $\Omega = 294$ км³, если весь поток глубинных магм массива ПТ и ОТ до голоцена и образования Толбачинской зоны шлаковых конусов протекал через периферический магматический очаг ПТ. На рис. 9б показана зависимость $W(t)$ км³/год, когда до голоцена только половина потока магм протекала через очаг ПТ с суммарным объемом равным 174 км³.

Для проведения расчетов использовались теплофизические параметры магмы и вмещающих пород: удельная теплоемкость магмы c_m и вмещающих пород c_c , теплопроводность вмещающих пород λ_c , плотность ρ_m и ρ_c . Значения скрытой теплоты плавления стенки очага L ; температура втекающей в очаг магмы T_1 , температура вытекающей из очага магмы T_2 , температура плавления вмещающих пород T_c^{sol} , температура вмещающих пород T_c , температура начала кристаллизации той части магмы в очаге, которая кристаллизуется в очаге полностью T_M^{dic} , температура кристаллизации магмы T_M^{sol} , при которой в первом случае 30%, во втором — 20%, в третьем случае — 10% магмы в очаге полностью кристаллизуется. Все приведенные вы-

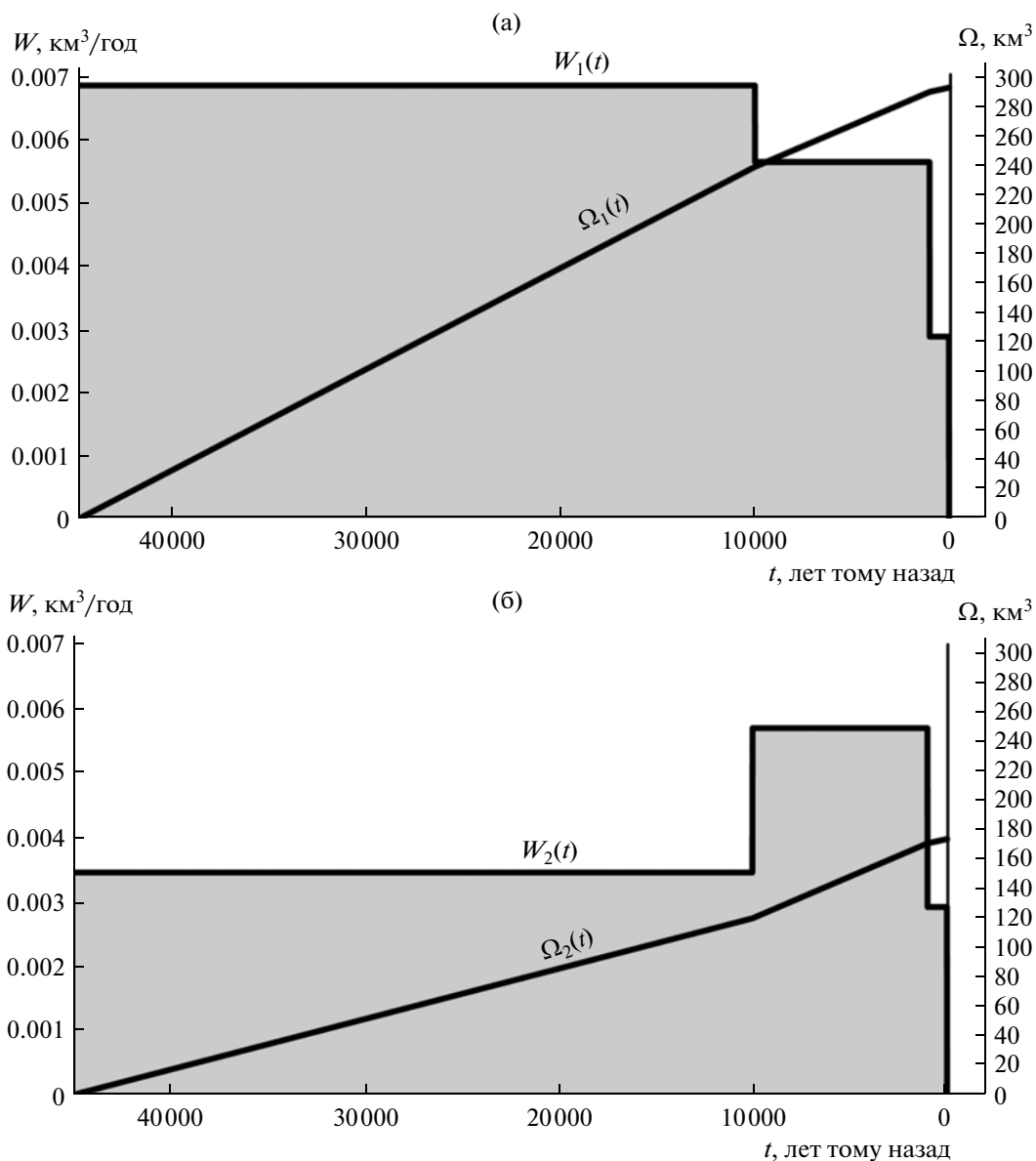


Рис. 9. Кусочно-постоянная зависимость $W(t)$ объемного расхода магм от времени для вулкана Плоский Толбачик (по геологическим данным).

а – $W_1(t)$ – изменение расхода магмы, если весь поток глубинных магм массива до голоцена и образования Толбачинской зоны шлаковых конусов протекал через периферический магматический очаг ПТ; б – $W_2(t)$ – изменение расхода магмы, если до голоцена только половина потока протекала через очаг ПТ. Зависимость объема изверженной магмы от времени: $\Omega(t) = \int W(t)dt$ $\text{km}^3/\text{год}$. Для а и б суммарный объем $\Omega = 294 \text{ km}^3$ и 174 km^3 , соответственно. Настоящий момент времени показан вертикальной линией.

ше параметры взяты из работ [Аносов и др., 1978; Справочник ..., 1969; Федотов, 1980, 1984; Федотов, Горицкий, 1980; Большое трещинное ..., 1984; Ермаков, Ермаков, 2006]. Начальная температура вмещающих очаг пород совпадает с температурой пород на глубине залегания магматического очага при отсутствии его теплового влияния. Численные значения указанных исходных величин, использованных при расчетах, приведены в таблице.

О теплоемкости магмы следует сказать особо. Величина теплоемкости магмы принималась с учетом того, что в периферическом очаге происходила кристаллизация не более 30% ее объема, находящегося в очаге [Флеров и др., 1984; Ермаков, Ермаков, 2006]. При этом в объеме очага в интервале разности температур кристаллизации магмы $T_M^{lic} - T_M^{sol} = 200^\circ\text{C}$ выделялось 100 ккал/кг скрытой теплоты плавления. Температура вытекающей

Исходные данные для расчета размеров магматического очага вулкана Плоский Толбачик

Длительность формирования очага, тыс. лет	Глубина залегания очага от уровня моря, м	Температура вмещающих пород, $T_c, ^\circ\text{C}$	Температура вытекающей в очаг магмы, $T_1, ^\circ\text{C}$	Температура вытекающей из очага магмы, $T_2, ^\circ\text{C}$	Температура плавления вмещающих пород, $T_c^{sol}, ^\circ\text{C}$	Плотность магмы, $\rho_m, \text{кг/м}^3$	Плотность вмещающих пород, $\rho_c, \text{кг/м}^3$	Теплопроводность вмещающих пород, $\lambda_c, \text{Дж/м год гр}$	Теплоемкость магмы с учетом скрытой теплоты плавления, $c_m^*, \text{Дж/кг гр}$	Теплоемкость вмещающих пород, $c_c, \text{Дж/кг гр}$	Скрытая теплота плавления стенки очага, $L, \text{Дж/кг}$
45	4000	150	1200	1050	1050	2.65×10^3	2.5×10^3	0.66×10^8	$c_m^{30} = 1760.0$ $c_m^{20} = 1466.0$ $c_m^{10} = 1257.0$	1047.5	4.187×10^5

Примечание. * – $c_m^{10}, c_m^{20}, c_m^{30}$ – теплоемкости магмы в периферическом очаге с учетом скрытой теплоты плавления при кристаллизации в очаге соответственно 30%, 20% и 10% объема магмы, протекающей сквозь очаг.

из очага магмы принималась равной $T_2 = 1050^\circ\text{C}$, совпадающей с температурой в истоках лав БТТИ. То. теплоемкость магмы в периферическом очаге с учетом скрытой теплоты плавления при кристаллизации в очаге 30% объема магмы, протекающей сквозь очаг, принималась заметно выше теплоемкости магмы без ее учета: $c_m^{30} = 1760 \text{ Дж/кг} \cdot \text{гр}$. Это на 68% больше теплоемкости магмы без учета скрытой теплоты плавления. Значение 30% считается верхней гранью оценки кристаллизации объема магмы в очаге. Если принять, более умеренную оценку 20%, то теплоемкость магмы в очаге с учетом скрытой теплоты плавления следует принять $c_m^{20} = 1466 \text{ Дж/кг} \cdot \text{гр}$, что на 40% выше теплоемкости магмы без ее учета. За нижнюю оценку объема магмы, кристаллизующейся в очаге, принимается величина 10%. В этом случае теплоемкость магмы с учетом скрытой теплоты кристаллизации следует принять: $c_m^{10} = 1257 \text{ Дж/кг} \cdot \text{гр}$, что на 20% больше ее значения без учета скрытой теплоты плавления (см. табл.).

Отдельно заслуживает внимания процесс плавления стенок очага, определяющего эволюцию его формы. Если характеристики пород окружения очага изотропны, то его форма остается сферической в течение всего периода эволюции размеров очага. Теплопроводность среды в горизонтальной плоскости может быть больше, чем в вертикальной, например в 1.5 раза, по причине трещиноватости пород, возникающей перед фронтом плавления

в горизонтальном радиальном от центра очага направлении [Глико, 1999]. Соотношение 1.5 указано потому, что форма аномальных по геофизическим показателям зон, отождествляемых с магматическими очагами, имеют примерно такое соотношение вертикальных и горизонтальных размеров. Преимущественно горизонтальная направленность трещин возникает тогда, когда плотность магмы и плотность вмещающих очаг пород становится на глубине образования очага примерно равными. Заметим также, что и глубина заложения магматического очага (при отсутствии других факторов) также может определяться этим же условием. Примем во внимание, что в толще пород Земли существует вертикальный градиент плотности пород, и внедрение магмы под избыточным давлением в холодные породы связано с термоупругими напряжениями и образованием мелких трещин в небольшом по мощности слое этих пород перед фронтом плавления [Глико, 1999]. Трещины, возникающие при внедрении магмы в окружающие очаг породы, преимущественно в горизонтальном направлении заполняются расплавом магмы, увеличивая теплоотдачу во вмещающие породы. При этом ускоряется продвижение фронта плавления стенок очага, возникающее при внедрении магмы в окружающие очаг породы. Такое объяснение эллипсоидальной формы магматического очага использовалось при расчетах. Тогда форма очага на стадии его роста соответствует вытянутому в горизонтальной плоскости эллипсоиду с вертикальной осью вращения. Соот-

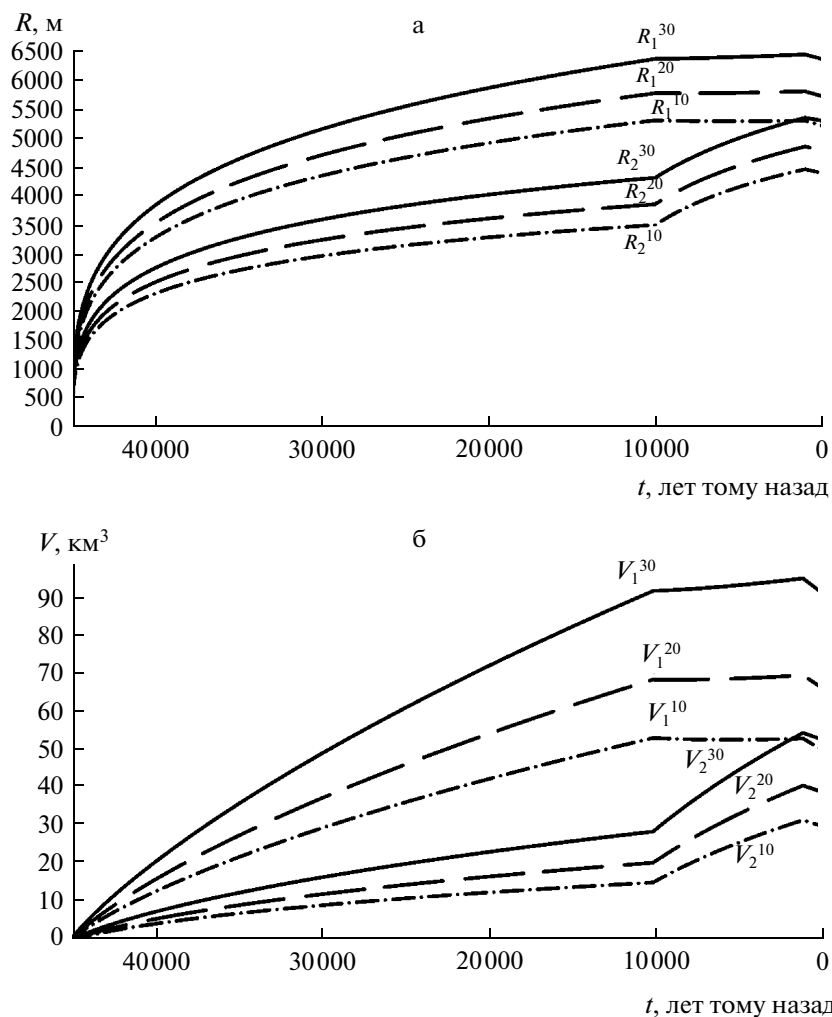


Рис. 10. Расчетные зависимости $R_1(t)$ и $R_2(t)$ размеров горизонтальной оси очага (а), $V_1(t)$ и $V_2(t)$ объема очага вулкана Плоский Толбачик (б), имеющего форму эллипсоида с вертикальной осью вращения, от времени с начала зарождения очага (45 тыс. лет тому назад) до настоящего времени. Убывание расхода магмы по зависимостям $W_1(t)$ и $W_2(t)$ приведено на рис. 9, что соответствует суммарным объемам изверженных магм $\Omega = 294$ и 174 км^3 . Вертикальная линия обозначает настоящий момент времени. Сплошными линиями показаны зависимости R_1^{30} , R_2^{30} , V_1^{30} , V_2^{30} , рассчитанные с учетом кристаллизации магмы в очаге равной 30% от ее объема. Пунктирными линиями показаны зависимости R_1^{20} , R_2^{20} , V_1^{20} , V_2^{20} , полученные при условии, что в очаге кристаллизуется 20% объема магм. Штрихпунктирными линиями показаны зависимости R_1^{10} , R_2^{10} , V_1^{10} , V_2^{10} при кристаллизации 10% магмы в очаге.

ношение длин горизонтальной и вертикальной оси при этом равно соотношению эффективной теплопроводности в вертикальном и горизонтальном направлении.

Результаты расчетов раздела и их обсуждение. Найдена зависимость изменения размеров очага во времени при заданном расходе магмы через очаг, и в частности определены размеры очага в настоящее время. Оцениваются длины вертикальной и горизонтальной осей эллипсоида магматического очага как функции времени.

Расчеты показали, что в настоящее время горизонтальный размер очага достиг 6.4 км, вертикальный размер 4.3 км, а его объем — 92.5 км^3 , если весь поток глубинных магм массива до голоцена и образования Толбачинской зоны шлаковых конусов (вариант 1) протекал через периферический магматический очаг ПТ. Длина горизонтальной оси очага равна 5.3 км, вертикальной оси — 3.6 км, объем равен 53.5 км^3 , если до голоцена только половина названного потока (вариант 2) протекала через очаг ПТ (рис. 10а, б). Эти результаты получены при

предположении, что количество закристаллизовавшейся магмы в очаге составляет 30% от объема очага.

Если объем закристаллизовавшейся магмы составляет только 20%, то горизонтальный размер и объем очага становятся соответственно меньше: 5.8 км и 67.3 км³ (вариант 1). Если этот поток магм был вдвое меньше, те же оценки становятся: 4.8 км и 39.7 км³ (вариант 2).

Наконец, если объем закристаллизовавшейся магмы составляет 10%, то горизонтальный размер очага и его объем становится соответственно 5.3 км и 51 км³, когда поток магмы через очаг был полным (вариант 1). При меньшем объеме потока магмы (вариант 2) получены оценки 4.4 км и 30.6 км³. Все эти результаты показаны на рис. 10а, б.

Данный пример подтверждает то, что за время своей деятельности магматические очаги существенно меняют свои размеры: растут с момента зарождения за счет плавления стенок, уменьшают свои размеры при длительных паузах в тысячи, первые десятки тысяч лет между извержениями за счет застывания магмы на стенках очагов. Эволюция размеров магматических очагов, ее продолжительность – временной масштаб прямо связана с интенсивностью расхода магмы, протекающей при извержениях через очаг, и скоростью изменения этого расхода.

Следует отметить устойчивость оценки объема магматического очага, получаемой в результате расчета эволюции его размеров к вариациям исходных данных, используемых для моделирования роста и развития магматического очага. Верхняя оценка объема магматического очага (при отсутствии продолжительных пауз между извержениями, приводящих к его замерзанию) в значительной степени определяется интегральными характеристиками расхода магмы через очаг, т.е. общим количеством изверженных магм за всю историю существования вулкана. Оценка размеров магматических очагов в настоящем и их эволюции в прошлом, начиная от зарождения очага, позволяет также выполнить моделирование процесса длительного накопления тепла во вмещающих очаг породах магматическими телами переменных размеров [Уткин и др., 2005, 2009; Федотов и др., 2007].

Примечательно, что приведенные независимые оценки размеров периферического очага ПТ оказались близкими к его поперечным размерам (6 км), которые показали рои землетрясений над очагом во время провала дна кальдеры над ним в 1975 г. при БТТИ, раздел 3.

Таким образом, уточнены размеры и место периферического очага ПТ, в котором происходят

важные магматические процессы в южной части КГВ. Здесь происходит накопление магм, поднимающихся из более глубоких слоев коры и, возможно, верхней мантии, образование интрузий, дифференциация магм, формирование характерных высокоглиноземистых мегаплагиофировых базальтов, перемещающихся при извержениях на десятки км вдоль Толбачинской зоны шлаковых конусов, сходной с рифтами гавайских вулканов.

Из результатов этого раздела можно сделать ряд выводов.

Проведено численное исследование динамики роста размеров корового магматического очага вулкана по данным о расходе изверженных магм, их составу и глубине очага. Выполненные расчеты позволяют сделать ряд выводов о росте, размерах и эволюции проточного магматического очага вулкана.

Коровый питающий магматический очаг крупного базальтового вулкана ПТ за 40–50 тыс. лет своего существования находится в фазе активного роста, и достиг своих максимальных размеров. Если существующий расход магмы существенно не изменится, то квазистационарная фаза его состояния, когда размеры магматического очага практически не меняются, будет сохраняться.

Приведены результаты расчетов величины и изменения во времени размеров и объема неглубокого магматического очага крупного базальтового вулкана, действующего на Камчатке, чей возраст около 40–50 тыс. лет, а полный объем изверженных магм 174–294 км³. Согласно расчетам очаг достиг своих максимальных размеров через 45 тыс. лет после своего образования.

Сопоставимость результатов оценки размеров магматического очага ПТ полученного разными методами косвенно подтверждает вывод о том, что эволюция размеров магматического очага ПТ прямо связана с интенсивностью расхода магмы, протекающей при извержениях через очаг. Максимальный размер очага, при отсутствии продолжительных пауз между извержениями, в сильной степени зависит от суммарного количества изверженного материала.

Полученные данные и результаты расчетов необходимы, для оценки тепла, содержащегося в породах, вмещающих магматический очаг вулкана ПТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Базальтовый вулкан Плоский Толбачик (ПТ) с Толбачинской зоной шлаковых конусов (ТЗ) является выдающимся объектом вулканологических исследований и одной из главных природных достопримечательностей мощной Ключевской груп-

пы вулканов (КГВ) на Камчатке. Этот третий по расходу изверженных продуктов вулканический центр Курило-Камчатской дуги, который в наибольшей мере среди 70 действующих вулканов дуги сходен с вулканами гавайского типа.

Во Введении и разделах 1–4 названо большое число работ, в которых изложены результаты многолетних всесторонних исследований КГВ, ПТ и ТЗ, проводившихся методами вулканологии, сейсмологии, геодезии, геофизики, петрологии, геохимии и других наук. В разделах 1–4 приведены данные вулканологии, геодезии, сейсмологии о свойствах ПТ и ТЗ и расчетов периферического магматического очага ПТ. Они являются продолжением исследований мощной и сложной магматической питающей системы КГВ и ее геофизической модели [Федотов и др., 2010; Fedotov et al., 2010]. Многие результаты отмечены в разделах 1–4.

Получены близкие независимые оценки положения и размеров периферического магматического очага ПТ: размещение его под вершинной провальной кальдерой ПТ, глубина кровли очага 2 км, поперечные размеры очага 4.9–5.8 км, вертикальные размеры 3.2–3.9 км, его объем 40–70 км³, глубина центра очага около 4 км. При Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. (БТТИ) из этого очага произошел отток 0.45 км³ глиноземистых базальтов. Эти сведения должны помочь при решении ряда следующих вопросов и задач.

Имеется мало данных о подъеме глубинных мантийных магм к периферическому очагу ПТ.

Неясно, почему извержение глиноземистых базальтов в 1939–1941 гг. на вершине ПТ завершилось прорывом глубинных магнезиальных базальтов в мае 1941 г., а при Большом трещинном Толбачинском извержении в 1975–1976 гг. наблюдалась противоположная последовательность типов извергавшихся базальтов [Двигало и др., 1984, 1991; Большое трещинное ..., 1984].

Мало исследованы изменения давления в обширной и сложной магматической питающей системе КГВ, которые произошли после проседания на 200 м dna вершинной кальдеры ПТ во время БТТИ, и другие.

Эти вопросы могут стать частью дальнейших фундаментальных исследований КГВ, ее магматической питающей системы и свойств магматических очагов вулканов.

В заключение приятно принести глубокую благодарность всем исследователям, которые 80 лет вели самое плодотворное всестороннее изучение КГВ, и пожелать замечательных успехов тем, кто будет продолжать его в следующие десятилетия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 4 фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 2.7, и проекта РФФИ № 11-05-00602-а.

Введение, Заключение, разделы 1–3 составлены С.А. Федоровым, раздел 4 – И.С. Уткиным и Л.И. Уткиной, рисунки подготовлены Л. И. Уткиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др.* Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 123 с.
- Балеста С.Т.* Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 133 с.
- Балеста С.Т., Zubin M.И., Каргопольцев А.А., Федорченко И.А.* Глубинное строение района извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. XV. С. 514–536.
- Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. // Отв. ред. С.А. Федотов.* М.: Наука, 1984. 683 с.
- Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б. и др.* Голоценовый вулканизм Толбачинской зоны шлаковых конусов // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. V. С. 177–222.
- Влодавец В.И.* Посещение кратера вулкана Плоский Толбачик 13 августа 1936 г. // Бюл. вулканол. станций. 1937. № 2. С. 27–32.
- Влодавец В.И.* Ключевская группа вулканов // Тр. вулканол. станции. 1940. Вып. 1. С. 86–98.
- Влодавец В.И., Пийп Б.И.* Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 5–95.
- Глико А.О., Петрунин А.Г.* Моделирование теплопереноса в системах черных курильщиков и их взаимодействия с магматическими камерами // Геофизика на рубеже веков. Избранные труды ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 60–69.
- Гущенко И.И.* Извержения вулканов мира: каталог. М.: Наука, 1979. 475 с.
- Двигало В.Н., Федотов С.А., Чирков А.М.* Вулкан Плоский Толбачик // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1 / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. Гл. 9. С. 200–211. (На русском и английском.)
- Двигало В.Н., Чирков А.М., Федотов С.А.* Новая вершинная кальдера Плоского Толбачика // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. II. С. 85–73.
- Действующие вулканы Камчатки. Т. 1 // Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Мархинин.* М.: Наука, 1991. 302 с. (На русском и английском.)
- Ермаков В.А., Вадеевская А.В.* Вулканы Острый и Плоский Толбачик // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 43–59.
- Ермаков В.А., Ермаков А.В.* Геолого-петрологические модели извержения 1975–1976 гг. на Толбачинском долу (Ключевская группа вулканов) // Геофизические

- исследования: сб. научн. тр. М.: Институт физики Земли, 2006. Вып. 5. С. 53–115.
- Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
- Кирсанов И.Т., Пономарев Г.П.* Извержение вулкана Плоский Толбачик и некоторые особенности его продуктов // Бюл. вулканол. станций. 1974. № 50. С. 53–63.
- Кожемяка Н.Н.* Действующие вулканы Камчатки: типы построек, длительность формирования, общий объем, продуктивность, состав вулканитов // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 3–16.
- Медведский Р.И.* Метод приближенного решения двухфазной задачи Стефана с возвратным движением фронта // ИФЖ. 1987. Т. 53. № 3. С. 467–474.
- Пийп Б.И.* Новый побочный кратер вулкана Плоский Толбачик // Бюл. вулканол. станций. 1946. № 13. С. 10–21.
- Пийп Б.И.* Вулкан Толбачик // Бюл. вулканол. станций. 1954. № 20. С. 67–71.
- Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В.* Продуктивность вулканических аппаратов // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22–37.
- Попков В.Ф.* Вулканическая деятельность Плоского Толбачика в 1940 г. // Бюл. вулканол. станций. 1946. № 12. С. 54–63.
- Справочник физических констант горных пород. М.: Мир, 1969. 544 с.
- Уткин И.С., Федотов С.А., Уткина Л.И.* Об эволюции и размерах магматических очагов вулканов // Вулканология и сейсмология. 1999. № 3. С. 7–18.
- Уткин И.С., Федотов С.А., Делемень И.Ф., Уткина Л.И.* Динамика роста и развития проточных магматических очагов Мутновско-Гореловской группы вулканов, их тепловые поля и накопленное ими подземное тепло // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 11–29.
- Уткин И.С., Федотов С.А., Уткина Л.И.* Оценка тепла, накопленного магматическим очагом вулкана Эльбрус во вмещающих его породах, и возможности его извлечения // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 3–23.
- Федотов С.А.* О входных температурах магм, образовании, размерах и эволюции магматических очагов вулканов // Вулканология и сейсмология. 1980. № 4. С. 3–29.
- Федотов С.А.* Большие трещинные извержения, их теория, механизм Большого трещинного Толбачинского извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. XVI. С. 537–575.
- Федотов С.А.* Большое трещинное извержение Толбачика // Наука и человечество. Междунар. ежегодник. М.: Знание, 1984. С. 95–118. (Повторное дополненное издание в книге: Федотов С.А. Исследования по вулканологии и сейсмологии. их развитие и значение на Камчатке, история отечественной науки. Статьи и очерки 1973–2002 гг. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2003. С. 30–40.)
- Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
- Федотов С.А., Балеста С.Т., Двигало В.Н. и др.* Новые Толбачинские вулканы // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1 / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. Гл. X. М.: Наука, 1991. С. 214–279.
- Федотов С.А., Горельчик В.И., Зобин В.М. и др.* Сейсмологические данные о механизме и развитии извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. XII. С. 389–342.
- Федотов С.А., Горицкий Ю.А.* Тепловой расчет цилиндрических питающих каналов и расхода магм для вулканов центрального типа. Часть II // Вулканология и сейсмология. 1980. № 1. С. 3–15.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3–35.
- Федотов С.А., Мархинин Е.К., Слезин Ю.Б., Цюрупа А.И.* Южный прорыв // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. III. С. 84–142.
- Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И.* Возможность использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 1–15.
- Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И.* Оценка размеров коровых очагов вулканов и изменение их размеров по данным о количестве, составе изверженных продуктов и глубине очага // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 3–14.
- Федотов С.А., Энман В.Б., Никитенко Ю.П. и др.* Геодезические исследования // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. XV. С. 472–513.
- Флеров Г.Б. и др.* Петрология продуктов извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. М.: Наука, 1984. Гл. VI. С. 223–284.
- The great Tolbachik fissure eruption: Geological and geophysical data, 1975–1976 / Eds chief Fedotov S.A., Marchinin E.K. Cambridge, L., N.Y.: Cambridge Univ. Press, 1983. 341 p.
- Fedotov S.A.* Temperatures of entering magma, formation and dimensions of magma chambers of volcanoes // Bull. Volcanol. 1982. V. 45. № 4. P. 333–347.
- Fedotov S.A., Utkin I.S., Utkina L.I.* Evaluation of the sizes of crustal magma chambers beneath volcanoes and their time behavior based on the volume and composition of the erupted material and chamber depth // Volcanol. and Seismol. 2000. V. 22. № 3. P. 239–258.
- Fedotov S.A., Zharinov N.F., Gontovaya L.I.* The Magmatic Feeding System of the Klyuchevskaya Group of Volcanoes Inferred from Data on Its Eruptions, Earthquakes, Deformation and Deep Structure // J. Volcanol. Seismol. 2010. V. 4. № 1. P. 3–32.
- Utkin I.S., Fedotov S.A., Utkina L.I.* On the evolution and dimensions of magma chambers of volcanoes // Volcanol. and Seismol. 1999. V. 21. № 3. P. 287–306.

The Peripheral Magma Chamber of Ploskii Tolbachik, a Kamchatka Basaltic Volcano: Activity, Location and Depth, Dimensions, and their Changes Based on Magma Discharge Observations

S. A. Fedotov^{a,b}, I. S. Utkin^a, and L. I. Utkina^a

^a *Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Bol. Gruzinskaya ul. 10, Moscow, 123995 Russia
e-mail: karetn@list.ru, isutliut@mail.ru*

^b *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
Bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia
e-mail: fedotov@kscnet.ru*

Abstract—The Klyuchevskoi group of volcanoes (KGV) in Kamchatka is the most powerful existing island arc and subduction zone volcanic center. The Holocene volcanic activity in the southern part of the KGV is concentrated in a large basaltic volcano, Ploskii Tolbachik (PT), altitude 3085 m and in its Tolbachik zone of cinder cones (TZ), length 70 km, which are similar to Hawaiian-type volcanoes and their rifts. A variety of different basalt types are erupted at a rate of 18×10^6 t/yr.

This paper provides information on the PT peripheral magma chamber obtained by several independent methods. We used data on the evolution, eruptions, magma discharge, deformation, and earthquakes in the PT and TZ, as well as calculations that give the size of the PT flow-through magma chamber. The use of seismological and geodetic data places the chamber under the PT summit caldera, gives its transverse size as below 6 km, and the top of the chamber at a depth of 2 km. Our calculations give 4.9–5.8 km for the transverse chamber dimension, 3.2–3.9 km for its vertical dimension, 40–70 km³ for chamber volume, and about 4 km for the depth of chamber center.

The information we provide makes the properties of this source of PT and TZ alumina-rich basalts clear, as well as those of the entire KGV complex plumbing system.