

УДК 551.21

*Посвящается памяти замечательных исследователей,  
вулканологов Георгия Степановича Горшкова, Артура  
Николаевича Сирина, Клары Михайловны Тимербаевой и  
сейсмолога Павла Ивановича Токарева*

## **МАГМАТИЧЕСКАЯ ПИТАЮЩАЯ СИСТЕМА КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ (КАМЧАТКА) ПО ДАННЫМ ОБ ЕЕ ИЗВЕРЖЕНИЯХ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ, ДЕФОРМАЦИЯХ И ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ**

© 2010 г. С. А. Федотов<sup>1,2</sup>, Н. А. Жаринов<sup>1</sup>, Л. И. Гонтовая<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН, Москва, 123995

Поступила в редакцию 21.10.2009 г.

Изучение магматических питающих систем вулканов, корней вулканов, является одной из основных задач вулканологии. К числу главных объектов таких исследований принадлежит Ключевская группа вулканов (КГВ) наиболее мощная на островных дугах и в зонах поддвига литосферных плит. Сообщается о всесторонних исследованиях, которые ведутся здесь с 1931 г. Приводится ряд показательных результатов, полученных с 1960-х годов при изучении источников магм, извержений, землетрясений, деформаций и глубинного строения КГВ. При их рассмотрении учитываются данные физической вулканологии о механизме вулканической деятельности и данные петрологии о формировании магм. В магматической питающей системе КГВ и ее геофизической модели выделяются следующие пять частей: источник энергии и вещества у верхней границы тихоокеанского сейсмофокального на глубине около 160 км, область подъема магм в астеносфере, область накопления магм в коромантийном слое на глубинах 40–25 км, магматические очаги и каналы в земной коре, основания построек вулканов. Рассматриваются и объясняются свойства, связь этих частей, механизм деятельности вулканов и магматической питающей системы КГВ в ее современном состоянии. Имеются способы расчета магматических каналов, очагов, количества магмы в системе и других ее свойств.

### **ВВЕДЕНИЕ: ПРОБЛЕМА КОРНЕЙ ВУЛКАНОВ, ИССЛЕДОВАНИЯ НА КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЕ ВУЛКАНОВ**

Вулканизм является одним из наиболее мощных планетарных геологических процессов. Вулканы, кроме Земли, известны на Луне, Венере, Марсе, спутниках Юпитера. В результате вулканической деятельности образовались, в большой мере, земная кора, гидросфера и атмосфера. Природа вулканической деятельности, источники, перемещение и накопление магм, строение корней или магматических питающих систем вулканов (МПС) были среди первых и главных вопросов вулканологии с начала ее становления как науки. Они изучаются в разных вулканических регионах при наземной и подводной вулканической деятельности. Исследования ведутся широким комплексом методов геологии, геофизики, геохимии и связанных с ними наук, сейсмологии, геодезии, петрологии, математического моделирования, физической и химической вулканологии, по терминологии В.И. Влодавца [8].

Знания о магматических питающих системах вулканов собраны в книгах, в которых последовательно излагаются сведения о сложных явлениях

вулканизма. Среди них отметим книги А. Ритмана (A. Rittman) [35], И.В. Лучицкого [28, 29], Х. Вильямса и А. Макберни (H. Williams and A. McBirney) [80].

История и данные изучения корней вулканов изложены в книге И.В. Лучицкого “Палеовулканология” (т. 2, гл. “Корни вулканов”) [29]. В ней приведен впечатляющий обзор развития взглядов на связи вулканов с глубинными очагами, которое происходило со второй половины XVIII в. до 1971 г., сведения о корневых зонах современных и древних вулканов, механизме образования кольцевых структур, даек и пластовых залежей. Ряд книг посвящен специально МПС [56, 77 и др.].

Показательно, что Генеральная Ассамблея Международной Ассоциации Вулканологии и Химии Недр Земли (IAVCEI), которая состоялась в Рейкьявике, Исландия, 22–27 августа 2008 г., имела название “Понимание вулканов” (Understanding Volcanoes).

Одним из главных объектов исследований корней вулканов, МПС, является Ключевская группа вулканов (КГВ) на Камчатке, наиболее мощная на островных дугах и в зонах подвига литосферных

плит в мире. Она находится в северной части Курило-Камчатского вулканического пояса вблизи пересечения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Столь высокая активность КГВ обусловлена интенсивностью глубинных геодинамических процессов, происходящих в этой области [38, 39 и др.].

В КГВ имеются четыре действующих вулкана центрального типа, рис. 1: базальтовый стратовулкан Ключевской — крупнейший действующий вулкан Евразии, высоты до 4.8 км; известный андезитовый вулкан Безымянный; базальтовые вулканы Плоский Толбачик, высота 3.1 км, и Ушковский, высота 4.1 км. Общий вид КГВ показан на рис. 2. На вершинах вулканов Плоский Толбачик и Ушковский находятся большие кальдеры, а на их склонах — линейные зоны шлаковых конусов, сходные с вершинными кальдерами и рифтами гавайских вулканов. На расстоянии 40 км к юго-западу от вершины Плоского Толбачика протягивается активная Толбачинская зона шлаковых конусов и трещинных извержений. Вулканы Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик и Толбачинская зона шлаковых конусов расположены вдоль осевой линии КГВ, рис. 1. Кроме них в КГВ имеются потухшие вулканы, сотни моногенных шлаковых конусов и лавовые экструзии. Область вулканов, шлаковых конусов и лавовых экструзий КГВ имеет форму эллипса размерами 100 × 55 км.

КГВ образовалась в четвертичное время, ее возраст несколько сотен тыс. лет, объем вулканитов более 6500 км<sup>3</sup>. Расход магм в КГВ был наибольшим в течение последних 50 тыс. лет. В КГВ один только Ключевской вулкан извергает в среднем  $60 \times 10^6$  т/г базальтов, что равно 1/2 годового расхода ювенильных продуктов и 1/4 расхода всех изверженных продуктов 70 активных вулканов Курило-Камчатского пояса. (Данные о количестве продуктов извержений вулканов Ключевской, Плоский Толбачик и Безымянный за 1930–2008 гг. приведены в следующих разделах статьи.) На вулканах Ключевской, Плоский Толбачик, шлаковых конусах по всей площади КГВ и в Толбачинском долу извергаются базальты, которые преобладают в КГВ, а в средней части КГВ на вулкане Безымянный — андезиты. Сведения о строении, возрасте и истории развития, извержениях, продуктах, петрологии, землетрясениях, деформациях, механизме деятельности вулканов КГВ собраны в книге “Действующие вулканы Камчатки” [19].

С 1930-х годов прошлого века КГВ является первым объектом вулканологических исследований в нашей стране. Их начало было связано именами таких выдающихся ученых как академики Ф.Ю. Левинсон-Лессинг и А.Н. Заварицкий, В.И. Влодавца, член-корреспондент АН СССР Б.И. Пийп, С.И. Набоко и другие. В 1931–1935 гг. на КГВ работало несколько вулканологических экспедиций, а 1 сентября 1935 г. в пос. Ключи у северного подножия Ключевского вулкана была от-

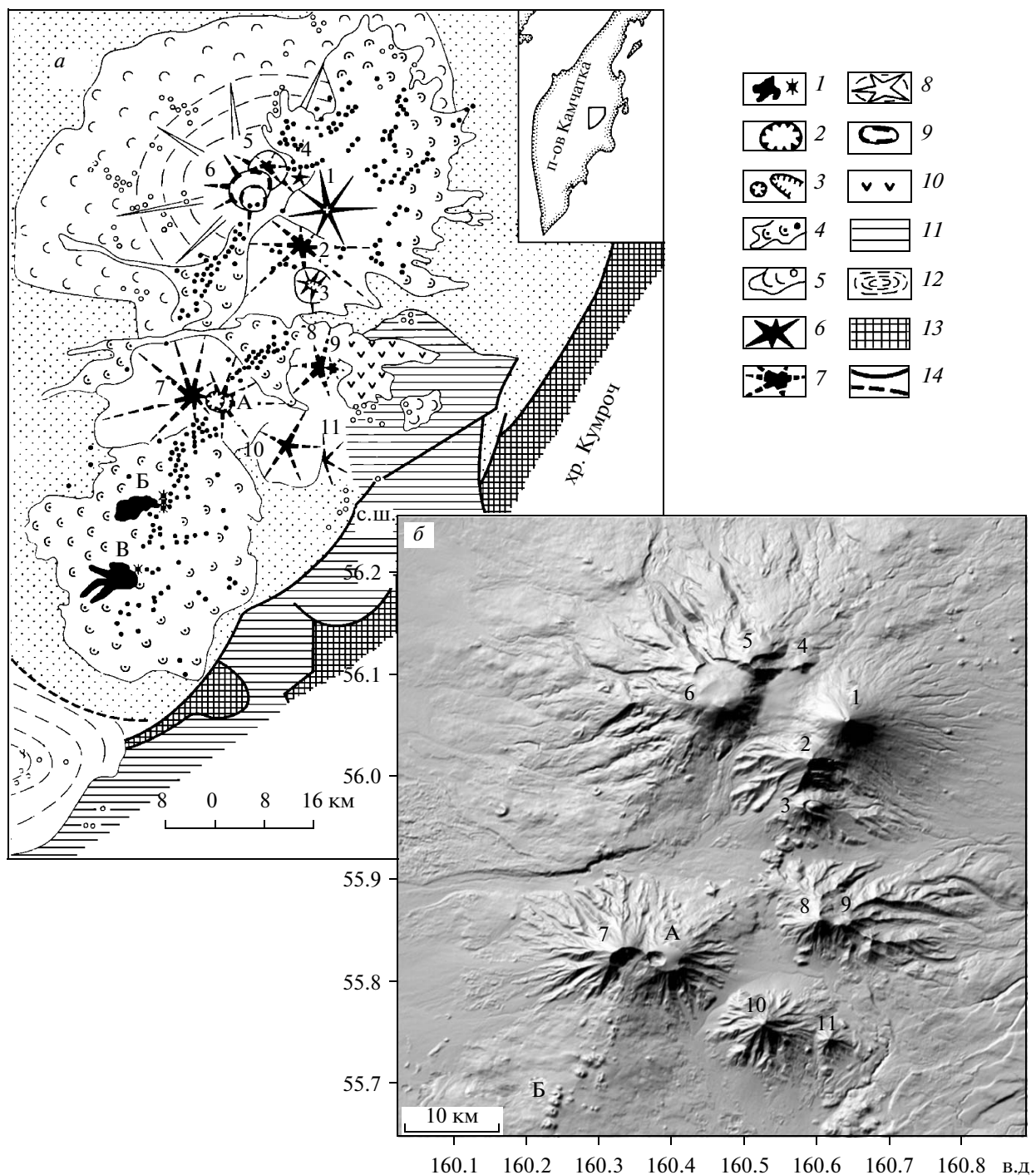
крыта Камчатская вулканологическая станция АН СССР, которая с тех пор ведет непрерывные ценнейшие наблюдения за вулканами КГВ. Исследования расширились после организации Лаборатории вулканологии АН СССР с Камчатской вулканологической станцией, 1945–1962 гг., затем успешно продолжались в 1960-х годах прошедшего века после организации в 1962 г. Института вулканологии СО АН СССР в г. Петропавловске-Камчатском [9]. К настоящему времени извержение вулканов КГВ длится уже почти 80 лет. Во время их фундаментальные научные результаты дало всестороннее изучение крупных извержений. Такими были пароксизмальное вершинное извержение вулкана Ключевской в 1944–1945 гг. [33], катастрофическое извержение и направленный взрыв андезитового вулкана Безымянный в 1955–1956 гг. [17], Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг., крупнейшее базальтовое извержение исторического времени на Камчатке [6].

Общие представления о магматических источниках КГВ были получены с 1931 до 1960-х годов при изучении геологического строения, извержений вулканов, петрографии и петрохимии изверженных пород, развития вулканической деятельности в КГВ в голоцене и предшествующие периоды. Результаты приведены в трудах основоположников отечественной вулканологии А.Н. Заварицкого [24], В.И. Влодавца [7], Б.И. Пийпа [33] и других.

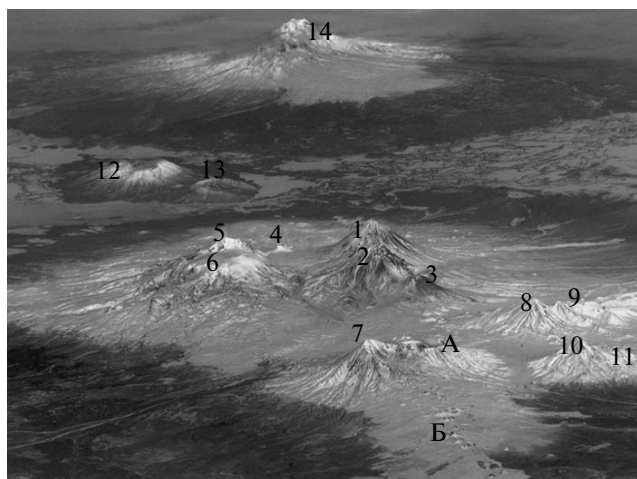
Деятельность КГВ началась в верхнечетвертичное время около 300 тыс. лет тому назад и прошла несколько стадий в своем развитии. В ее начале происходила ареальная вулканическая деятельность. Затем образовались крупные щитовые вулканы, сотни моногенных конусов и 12 вулканов центрального типа. В голоцене прекратились извержения на четырех из них — на вулканах Крестовский, Камень, Большая Удина и Малая Удина, — но возникли новые вулканы — Безымянный и Ключевской, рис. 1, 2 [30, 42, 43 и др.]

Изверженные продукты КГВ относятся к двум сериям или формациям: базальт-андезибазальтовая и андезитовая. Объем пород КГВ выше уровня моря около 5000 км<sup>3</sup>. Состав пород первой серии меняется от высокомагнезиальных базальтов до андезибазальтов, а второй — от базальтов до дацитов. Объем пород второй серии меньше, чем первой, и равен приблизительно 1000 км<sup>3</sup>.

Породы обеих серий размещаются закономерным образом по площади КГВ. Высокомагнезиальные базальты извергаются по краям осевой линии КГВ, базальты по всей площади КГВ, а андезиты сосредоточены в ее средней части. Такое важное свойство вулканизма КГВ видно на карте расположения базальтовых и андезибазальтовых шлаковых конусов КГВ, построенной А.Н. Сириным [42], и карте андезитовых экструзивных куполов КГВ, построенной К.М. Тимербаевой [43], рис. 3а,б. Длина полосы экструзий около 45 км при ширине 10 км [30].



**Рис. 1.** Схематическая карта Ключевской группы вулканов (КГВ). *a* – расположение активных и потухших вулканов [6]: 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 Ушковского вулкана; 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. Номерами на рис. 1*a* обозначены вулканы: 1 – Ключевской, 2 – Камень, 3 – Безымянный, 4 – Средний, 5 – Крестовский, 6 – Ушковский, 7 – Острый Толбачик, 8 – Большая Зимица, 9 – Малая Зимица, 10 – Большая Удина, 11 – Малая Удина. *б* – плановый космический снимок КГВ, номера вулканов те же.



**Рис. 2.** Северная группа вулканов Камчатки. 1 – Ключевской (действующий), 2 – Камень (потухший), 3 – Безымянный (действующий), 4 – Средний (потухший), 5 – Крестовский (потухший), 6 – Ушковский (действующий), 7 – Острый Толбачик (потухший), 8 – Большая Зимина (потухший), 9 – Малая Зимина (потухший), 10 – Большая Удина (потухший), 11 – Малая Удина (потухший), А – Плоский Толбачик (действующий), Б – шлаковые конуса северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) 1975–1976 гг., 12 – Харчинский, 13 – Заречный, 14 – Шивелуч (действующий).

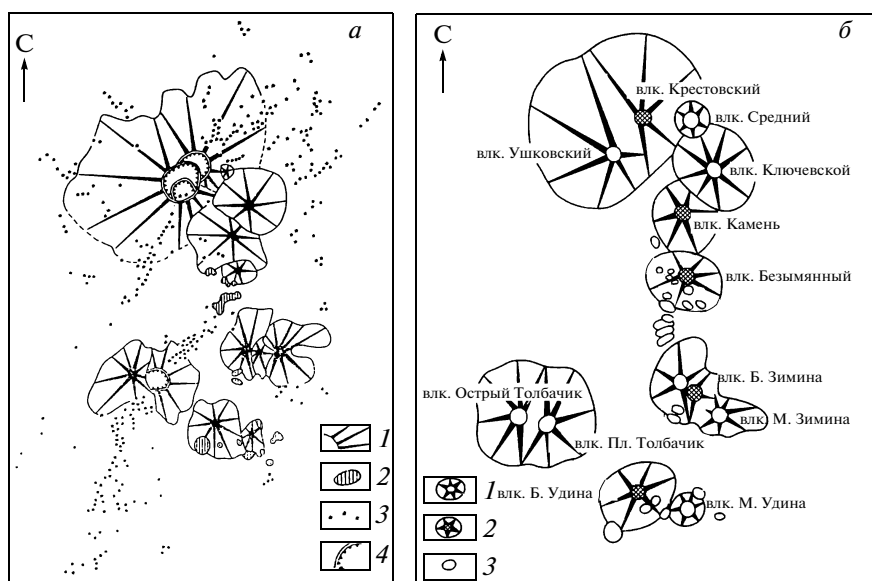
Значительные изменения состава пород происходили в течение всей деятельности отдельных вулканов, а также во время извержений. Примечательно, что, по данным [42, 43], в конце деятельности базальтовых вулканов Крестовский и Камень на их

вершинах появились андезитовые экструзии. Б.И. Пийп пришел к выводу о том, что под всей КГВ должен быть единый базальтовый глубинный очаг, а под каждым вулканом КГВ имеется собственный длительно существующий источник питания [33]. Эти представления подтверждались в книгах [42, 43] и других работах 1960-х годов.

Дальнейшие разносторонние петрологические и геохимические исследования КГВ продолжались в течение всех последующих лет. Основные результаты, полученные к 1991 г., приведены в книге [19]. В заключительном разделе данной статьи учитываются сведения из работ последних лет об образовании, дифференциации, формировании магм и магматических каналов и очагах КГВ.

Важнейшие результаты были получены в начальный период исследований на основании сейсмологических данных. А.Н. Заварицкий в 1946 г. в своей известной работе [25] обратил внимание на то, что вулканическая деятельность в области Курило-Камчатской дуги связана с геодинамикой, землетрясениями и глубинными процессами, происходящими под ней на глубинах 100–200 км. В последующие годы эту зависимость исследовали П.И. Токарев, С.А. Федотов и другие [45, 50, 52 и др.].

Первые данные о магматическом очаге Ключевского вулкана были опубликованы Г.С. Горшковым в 1956 г. [16]. Он нашел по данным об экранировании поперечных сейсмических волн японских землетрясений, что этот очаг находится в верхней мантии под вулканом на глубине около 60 км и имеет размеры до 30 км. Затем Г.С. Горшковым была предложена успешная международная программа исследования корней вулканов.



**Рис. 3.** Карты расположения шлаковых конусов (а) и экструзивных куполов (б) Ключевского дола [42, 43]. На карте а показаны: 1 – вулканы центрального типа; 2 – крупные экструзии; 3 – шлаковые конусы; 4 – кальдеры. На карте б показаны: 1 – стратовулканы; 2 – стратовулканы с вершинным куполом; 3 – боковые купола.

Большие сейсмологические наблюдения и исследования землетрясений КГВ продолжали П.И. Токарев, В.И. Горельчик и многие другие [44, 45 и др.].

В 1960-х годах и последующих десятилетиях глубинное строение и магматические очаги КГВ изучались методами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), сейсмического просвечивания, гравиметрии, электромагнитными и другими геофизическими методами [2–5, 11–13, 47, 48 и др.]. Обзор больших результатов этих исследований выходит за пределы данной работы. Отметим лишь один из главных среди них.

Под Ключевским вулканом при сейсмическом просвечивании обнаружена аномальная почти вертикальная столбообразная зона поперечником 2 км, поднимающаяся с глубины 50 км. Предполагается, что это главный “магмовод” КГВ. Под вулканом Безымянный на глубине 10–20 км имеется андезитовый магматический очаг, соединяющийся с магмоводом базальтового Ключевского вулкана [2, 3 и др.]. Земная кора наращивается снизу магмой, поступающей из мантии [5, 26, 49].

С начала 1960-х годов в число основных направлений исследований входят изучение связей вулканизма с сейсмичностью, геодинамикой и свойствами верхней мантии, механизма вулканической деятельности, свойств магматической питающих систем вулканов и вулканических центров [11, 36, 56 и др.]. После образования Института вулканиологии ДВНЦ АН СССР в 1962 г. [9] и начала детальных сейсмологических исследований на Камчатке в 1961 г. [55, 57 и др.] произошло большое усиление работ по комплексному изучению извержений, исследованиям сейсмичности и деформаций вулканов и вулканических центров, теории механизма вулканической деятельности. В книге [56] приводятся и обобщаются результаты 124 работ С.А. Федотова 1961–2004 гг., в которых исследовались связи вулканизма с сейсмичностью и свойствами верхней мантии, подъем магм в астеносфере и литосфере, строение и механизм деятельности магматических питающих систем вулканов, рассчитывались свойства магматических очагов и каналов, выяснялся механизм примечательных извержений. В главе о механизме вулканической деятельности на Камчатке, Курило-Камчатской дуге и в сходных структурах [52] в книге [19] и в заключении о природе и механизме вулканической деятельности в книге [56] приведена модель магматических питающих магматических систем вулканов центрального типа и вулканических центров Курило-Камчатской дуги и сходных структур.

Важной и интересной задачей этого направления исследований является комплексное изучение извержений, землетрясений и деформаций, модели деятельности и возможного развития гигантского Ключевского вулкана, главного вулкана КГВ, наиболее мощного вулкана Курило-Камчатской дуги. Работы последовательно развивались. Десятки ра-

бот на эту тему были выполнены и опубликованы в 1987–2008 гг., в их числе [1, 20, 21, 53, 60, 62, 63, 65, 66, 68, 71 и др.]. Модель магматической питающей системы Ключевского вулкана была предложена и рассматривалась в работах [53, 60–62 и др.]. В [62] были привлечены данные сейсмотомографии.

В настоящей работе рассматриваются механизм вулканической деятельности, свойства магматической питающей системы и ее модель для всей Ключевской группы вулканов. Используются имевшиеся и новые данные. Основы работы изложены в [56]. Статья состоит из четырех частей.

*Раздел 1.* Рассматриваются сейсмологические данные о следующих явлениях: источники вещества и энергии, начало образования магм КГВ в верхней части сейсмофокального слоя; источники двух базальтовых магм Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ), подъем, смешение магм и их перемещение вдоль КГВ, связь магматических очагов КГВ во время этого извержения; подъем землетрясений сквозь земную кору от промежуточного магматического очага Ключевского вулкана к его постройке до и во время его вершинных извержений.

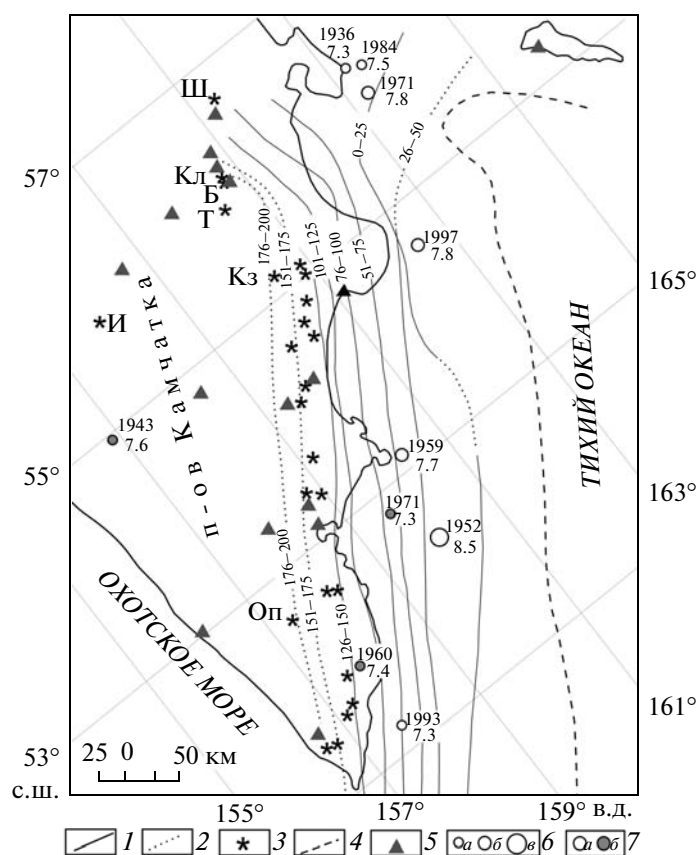
*Раздел 2.* Рассматриваются данные о состоянии, извержениях Ключевского вулкана и результаты анализа вертикальных деформаций его конуса и подножья, определенных при повторных геодезических измерениях в 1978–2009 гг. Приводятся данные о поступлении магм по главному магмоводу КГВ из мантии в промежуточный очаг Ключевского вулкана на глубине около 25 км и последующем перетекании магм из него в очаг на глубине около 3 км под постройкой вулкана при его вершинных и побочных извержениях. Оцениваются размеры интрузивной деятельности.

*Раздел 3.* Рассматриваются данные сейсмотомографии о глубинных источниках магм КГВ и связей между коровыми очагами ее вулканов.

*Раздел 4.* На основании сведений предыдущих разделов, других данных о механизме вулканической деятельности и глубинном строении, а также сведений об истории развития КГВ, о петрологии пород, образовании и дифференциации магм КГВ дается геофизическая модель магматической питающей системы КГВ. При этом используются и дополняются такие модели, имеющиеся для вулканических центров Курило-Камчатской дуги и Ключевского вулкана.

## 1. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ГЛУБИННОМ ИСТОЧНИКЕ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ, ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ МАГМ ПРИ БОЛЬШОМ ТРЕЩИННОМ ТОЛБАЧИНСКОМ ИЗВЕРЖЕНИИ И ПОД КЛЮЧЕВСКИМ ВУЛКАНОМ

Во Введении сказано, что непрерывные сейсмологические наблюдения на КГВ ведутся и развива-



**Рис. 4.** Карты изоглубин очагов землетрясений Камчатки за 1962–1982 гг. [52] и расположение эпицентров землетрясений с  $M \geq 7.3$  за 1930–2008 гг. 1 – средние линии для указанных глубин; 2 – менее точные участки; 3 – вулканы: Ш – Шивелуч, Кл – Ключевской, Б – Безымянный, Т – Толбачик, И – Ичинский, Кз – Кизимен, Оп – Опала; 4 – глубоководный желоб; 5 – сейсмостанции; 6 – эпицентры землетрясений с  $M = 7.3–7.5$  (а), с  $M = 7.6–8.0$  (б), с  $M > 8.0$  (в); 7 – эпицентры землетрясений глубиной меньше 100 км (а), эпицентры землетрясений с  $M \geq 7.3$  глубиной больше 100 км (б).

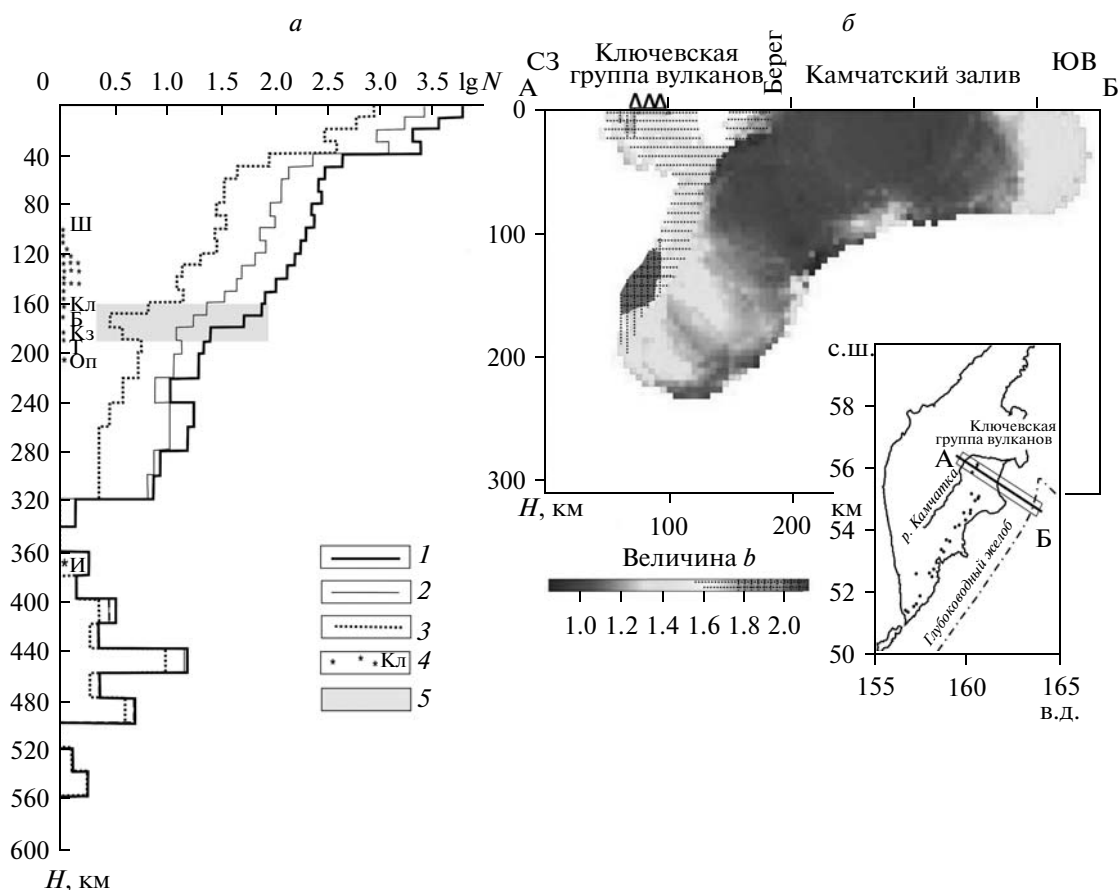
ются с 1946 г. За это время накоплено огромное количество данных и выполнены сотни исследований. В этом разделе приводятся сведения о ряде основных свойств вулканической деятельности и магматической питающей системы КГВ, полученные при сейсмологических исследованиях.

**1.1. Связи сейсмичности с вулканизмом в области Курило-Камчатской дуги. Источник вещества и энергии вулканов на глубинах 100–220 км.** При детальных сейсмологических исследованиях, проводящихся на Курильских островах и Камчатке с 1957 г. [55, 57], получены точные данные о размещении очагов землетрясений под Курило-Камчатским вулканическим поясом. Была показана связь вулканической деятельности с сейсмичностью, свойствами верхней мантии и процессами, происходящими на глубинах 100–220 км. Ниже приводятся такие данные из [52, 56, 59].

На рис. 4 приведены линии изоглубин, показывающие среднее положение гипоцентров землетрясений Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны на Камчатке в разных интервалах глубин от 0 до 200 км, построенные по данным детальных сей-

смологических наблюдений на Камчатке за 1962–1982 гг., нанесены действующие вулканы и эпицентры землетрясений 1930–2008 гг. с  $M \geq 7.3$ . Примечательно, что КГВ, наиболее мощный вулканический центр Курило-Камчатской дуги, находится вблизи поворота сейсмофокальной зоны Курило-Камчатской дуги в области ее сочленения с Алеутской дугой.

На рис. 5а показано изменение числа землетрясений с глубиной на Камчатке по данным детальных сейсмологических наблюдений за 1962–1982 гг. [52]. Интенсивность сейсмической деятельности достигает здесь наивысшего уровня, существующего на Земле. Средняя плоскость сейсмофокальной зоны находится на глубинах 100–210 км под действующими вулканами Камчатки. Наиболее быстрое уменьшение числа землетрясений с глубиной происходит в сейсмофокальной зоне под вулканическим поясом. Примечателен минимум значений числа относительно сильных землетрясений энергетических классов  $K_5 \geq 10.5$  на глубинах 170–190 км. Он показывает, что в той части сейсмофокальной зоны, где средняя плоскость зоны находится на глубинах 170–



**Рис. 5.** Распределение числа землетрясений Камчатки  $N$  по глубине  $H$  (а) [52] и изменения величины  $b$  ( $\log N = a - bM$ ) по профилю АБ, проходящему вкост Камчатки через Ключевскую группу вулканов (б) [62]. На рис. 5а: 1 – график  $N(H)$  для землетрясений с  $K_S \geq 8.5$ ; 2 – то же для  $K_S \geq 9.5$ ; 3 – для  $K_S \geq 10.5$ ; 4 – положение проекций вулканов (рис. 4) на среднюю плоскость фокальной зоны; 5 – наиболее вероятный интервал глубин, в котором происходит начальное плавление в сейсмофокальном слое.

190 км под действующими вулканами Камчатки, наиболее быстро снижается прочность среды.

Дополнительные данные, подтверждающие эти оценки, были получены в последние годы при изучении изменений величины параметра  $b$  под Камчаткой. Параметр  $b$  определяет величину наклона графика повторяемости землетрясений: соотношение между числом землетрясений и их магнитудами выражается зависимостью  $\log N = a - bM$ , где  $N$  – число землетрясений,  $M$  – их магнитуда,  $a$  – постоянная величина. Увеличение  $b$  означает относительное возрастание числа слабых землетрясений, что происходит при уменьшении прочности среды. На рис. 5б показаны изменения  $b$  в вертикальном разрезе, проходящем через КГВ вкост Курило-Камчатской дуги по данным 1971–2003 гг. [62]. Наибольшие величины  $b$  наблюдаются в верхней части сейсмофокальной зоны, находящейся под КГВ на глубинах 120–160 км.

Скорость погружения литосферной плиты под Курило-Камчатскую дугу должна быть одинаковой на разных глубинах в верхней области субдукции. Однако сейсмическая активность (нормированное

число землетрясений) на глубинах около 150 км в 100 раз меньше, чем на глубинах 0–40 км. Самое быстрое уменьшение числа землетрясений происходит на глубинах от 40 до 220 км, рис. 5а. Здесь столь же быстро должны нарастать с глубиной доля неупругих деформаций и соответствующее выделение тепла [52, 56]. Средний годовой объем ювенильных изверженных продуктов на Курило-Камчатской дуге приблизительно равен 1% годового объема пород, уходящих на глубину с погружающейся плитой. Все действующие вулканы Курило-Камчатской дуги извергают в среднем около  $120 \times 10^6$  т/год ювенильных продуктов, соответствующий вынос тепла равен приблизительно  $2 \times 10^{17}$  Дж/г. В то же время очаги Курило-Камчатских землетрясений ежегодно выделяют в среднем сейсмическую энергию, равную сейсмической энергии землетрясения с  $M = 7.8$  или  $1.8 \times 10^{16}$  Дж/г. Сейсмическая энергия составляет менее 1/10 полной энергии, выделяющейся в очагах землетрясений. Приведенные оценки показали, что тепловой энергии, выделяющейся при землетрясениях и неупругих деформациях в погружающейся плите, может быть достаточно для того,

чтобы у верхней границы плиты началось образование магм [52, 56].

Приведенные данные показывают, что начальный источник энергии и вещества, магм КГВ может находиться у верхней границы сейсмофокальной зоны на глубине около 160 км.

**1.2. Источники, перемещение и смешение магм, связь магматических очагов КГВ при Большом трещинном Толбачинском извержении.** Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ) происходило с 6 июля 1975 г. до 10 декабря 1976 г. в Толбачинской зоне шлаковых конусов к югу от вулкана Плоский Толбачик [6], рис. 1. Это было крупнейшее базальтовое извержение исторического времени на Камчатке. С 6 июля по 15 сентября 1975 г. оно происходило в Северном прорыве (СП) БТТИ в 18 км от вершинной кальдеры вулкана Плоский Толбачик (ПТ), рис. 1. Здесь образовались цепь новых конусов высотой до 330 м, I, II, III, VIII (Новые Толбачинские вулканы), малые конусы и лавовые потоки площадью 9 км<sup>2</sup>. Их общий объем равен 1.2 км<sup>3</sup>. Извергались вязкие глубинные высокомагнезиальные базальты [6].

Во время работы Северного прорыва в августе 1975 г. в вершинной кальдере вулкана Плоский Толбачик, рис. 1, образовался провал диаметром до 1600 м, глубиной 400 м и объемом 0.35 км<sup>3</sup>. В предыдущие годы здесь возникло кратерное лавовое озеро, заполненное мегаплагиофировыми высокоглиноземистыми базальтами. 28 июня 1975 г. за несколько дней до начала БТТИ в вершинной кальдере происходили небольшие выбросы таких базальтов [6]. За пять дней до окончания извержения в Северном прорыве началось изменение извергавшихся базальтов по составу от высокомагнезиальных к высокоглиноземистым. Смещение магм и переход к извержению высокоглиноземистых базальтов происходили далее в течение месяца в Южном прорыве БТТИ [6].

Извержение в Северном прорыве прекратилось 15 сентября 1975 г. Оно возобновилось 17 сентября 1975 г. в Толбачинской зоне конусов в Южном прорыве (ЮП) БТТИ в 10 км от Северного прорыва и 28 км от вершинной кальдеры Плоского Толбачика, рис. 1. Здесь до 10 декабря 1976 г. шло более спокойное непрерывное извержение жидких мегаплагиофировых базальтов, образовались шлаковый конус высотой 160 м и лавовый покров площадью 36 км<sup>2</sup> общим объемом 1 км<sup>3</sup> [6]. Сразу после окончания извержения в Южном прорыве в декабре 1976 г. возникли рои землетрясений, которые распространились на 20 км от него далее на юг вдоль Толбачинской зоны конусов на глубинах 3–6 км. Но магмы более не выходили на поверхность [58].

Сейсмологические наблюдения дали редкие важные сведения о механизме и развитии этого крупного сложного извержения, источниках и перемещении магм, о магматической питающей системе и связи магматических очагов КГВ [6]. В [58]

приведены результаты детальных исследований сейсмичности КГВ и района БТТИ в течение четырех с половиной лет перед извержением (1971–26.06.1975 г.), во время предшествовавшего роя землетрясений (27.06.–05.07.1975 г.), во время деятельности Северного и Южного прорывов извержения (6.07.1975 – 10.12.1976 гг.) и в течение двух лет после извержения (11.12.1976–1978 гг.). Далее кратко приводится часть этих сведений, рис. 6–10.

В период 1971–26.06.1975 гг. повышение сейсмической активности в КГВ было только в районе Ключевского вулкана, на котором в течение трех месяцев с 28.08.1974 г. происходило побочное извержение [19], а также в зоне ареального вулканизма у северо-восточного подножья Ключевского вулкана, где извергаются высокомагнезиальные базальты, наиболее основные по составу в КГВ. Район БТТИ был спокойным.

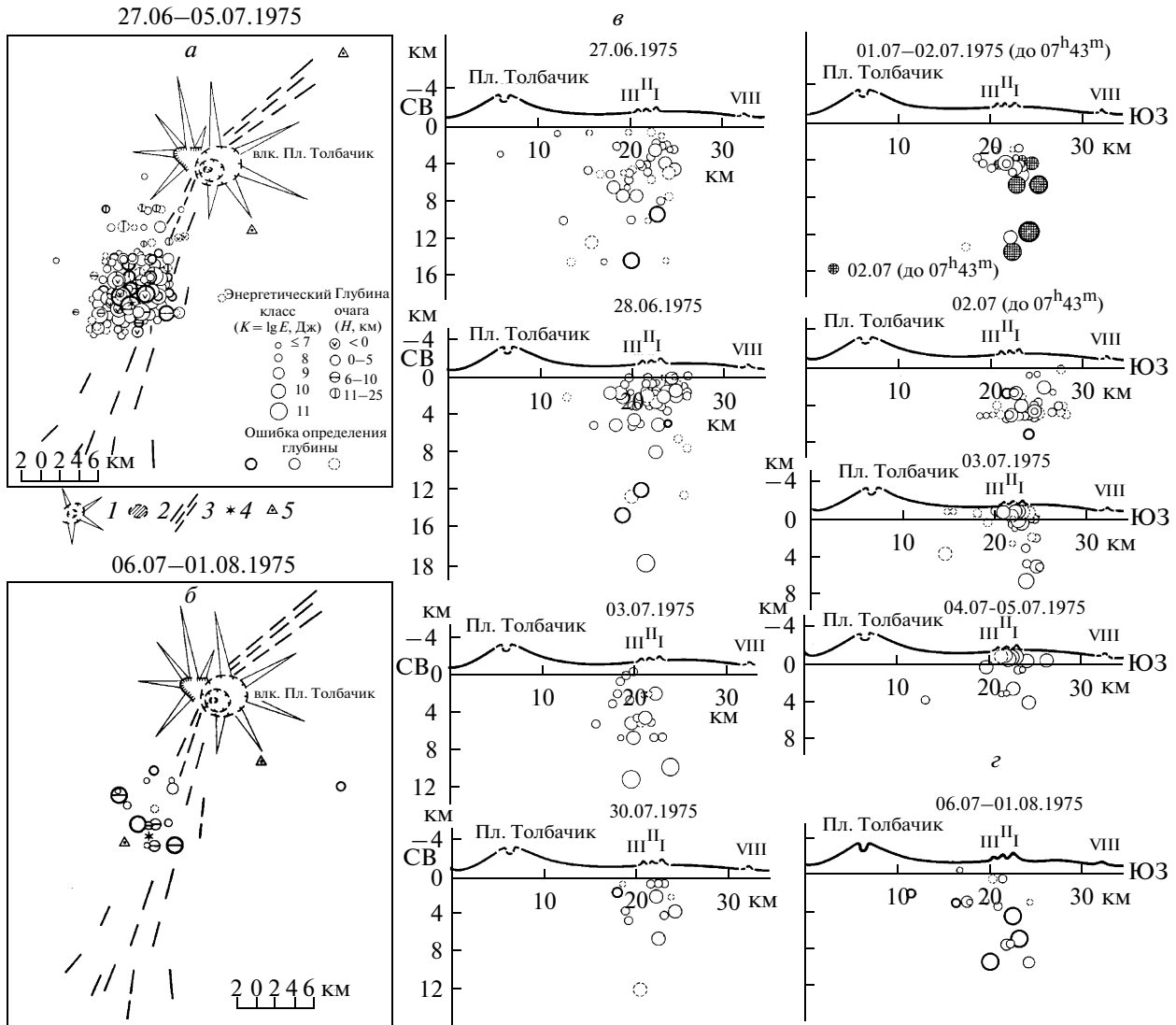
На рис. 6 приведена карта эпицентров землетрясений КГВ с глубинами очагов  $H \leq 40$  км за время предшествовавшего роя (27.06–5.07.1975 г.) и извержения Северного прорыва (6.07–17.09.1975 г.). Необычно сильный рой землетрясений, предшествовавших БТТИ, произошел в месте Северного прорыва 27.06–05.07.1975 г. По нему был дан и опубликован точный прогноз извержения [46]. Два наиболее сильных землетрясения с магнитудой  $M_LH = 5$  были отмечены под Северным прорывом 02.07.1975 г. на глубине 10–20 км. Примечательно, что сейсмичность в остальных районах КГВ была пониженной в период мощного прорыва и извержения основных магнезиальных базальтов.

На рис. 7–9 приведены карты эпицентров землетрясений для района извержения и распределение очагов землетрясений в вертикальной плоскости, проходящей от вулкана Плоский Толбачик к Северному, Южному прорывам и далее вдоль южного окончания Толбачинской зоны конусов, для трех интервалов времени, в которых происходили большие изменения в ходе извержения.

На рис. 7а,б показаны такие данные для землетрясений, предвалявших извержение 27.06–05.07.1975 г. и сопровождавших извержение его Первого конуса 07.07–01.08.1975 г. Они показывают, что источник первых высокомагнезиальных базальтов БТТИ находился под Толбачинской зоной шлаковых конусов на глубине 15–18 или более км, откуда базальты поднялись в течение недели вертикально вверх к поверхности земли.

Первый конус БТТИ достиг высоты 330 м за 34 дня и закончил свое извержение 09.08.1975 г. После этого 09.08.1975 г. и 17.08.1975 г. образовались новые Второй и Третий конусы извержения. Они продолжали извергать высокомагнезиальные базальты. Трещины, на которых они возникли, сдвигались вдоль Толбачинской зоны конусов от Северного прорыва к вершинной кальдере вулкана Плоский Толбачик [6, 58].



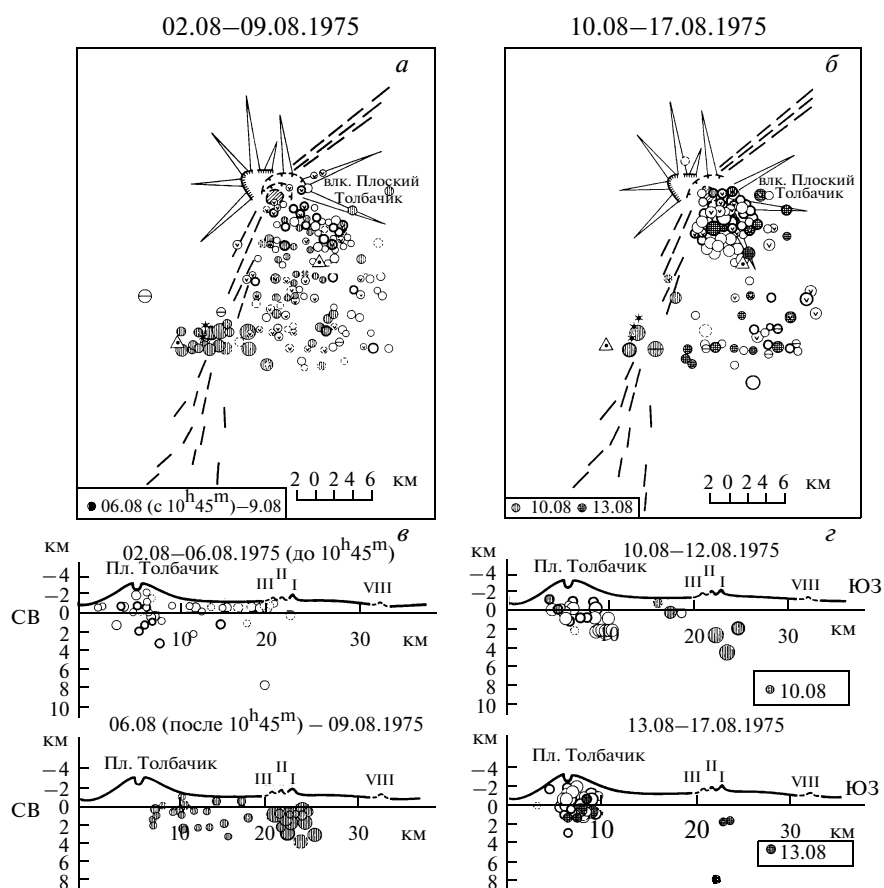


**Рис. 7.** Карты эпицентров землетрясений, предвалявших извержение с 27.06 по 05.07. 1975 г. (первый рой) (а), и сопровождавших извержение Первого конуса с 06.07. по 01.08.1975 г. (б); распределение землетрясений в вертикальной плоскости, проходящей через вулкан Плоский Толбачик и Северный прорыв БТТИ за неделю до начала БТТИ (с 27.06 по 05.07.1975 г.) (в), и во время извержения Первого конуса с 06.07.1975 по 01.08.1975 г. (г). На разрезах нанесены землетрясения из полосы шириной  $\pm 5$  км.

В последние дни июля – первой половине августа 1975 г. началось очевидное перемещение других магм КГВ. Появился и стал расти провал в вершинной кальдере гавайского типа на вулкане Плоский Толбачик, под которой должен быть неглубокий магматический очаг, содержащий высокоглинозистые мегалагиофировые базальты. К 25.08.1975 г. диаметр провала достиг 1200 м, его глубина – 400 м, а объем провала –  $0.27 \text{ км}^3$  [6]. Как видно на рис. 8а,б, в это время продолжались землетрясения на глубинах до 6 км под Северным прорывом, появились землетрясения на глубинах до 4 км между Северным прорывом и Плоским Толбачиком, а также интенсивный рой землетрясений на глубинах до 2 км под Плоским Толбачиком. Судя по этим дан-

ным, магнезиальные и глинозистые базальты перемещались в это время между Северным прорывом и Плоским Толбачиком на глубинах менее 5 км.

Во время образования такого большого провала в вершинной кальдере Плоского Толбачика происходило уменьшение магматического давления в его неглубоком магматическом очаге. Причиной возникновения роя землетрясений под Плоским Толбачиком в это время могли быть растрескивание кровли этого очага и внедрение в нее пластовых и других интрузий жидких мегалагиофировых магм этого вулкана. Судя по рис. 8г, кровля периферического мегалагиофирового очага под Плоским Толбачиком может находиться на глубине около 2 км, а поперечные размеры очага достигать 6 км, рис. 8б.



**Рис. 8.** Карты эпицентров землетрясений, предвалявших (2–09.08.1975 г.) образование Второго конуса (а), затем (10–17.08.1975 г.) образование Третьего конуса Северного прорыва БТТИ и провал вершинной кальдеры Плато Толбачика (б); распределение очагов в вертикальной плоскости, проходящей через вулкан Плоский Толбачик и Северный прорыв в дни, указанные на рис. в и г. На разрезах нанесены землетрясения из полосы шириной ±5 км. Условные обозначения ошибок определения глубины, см. рис. 7.

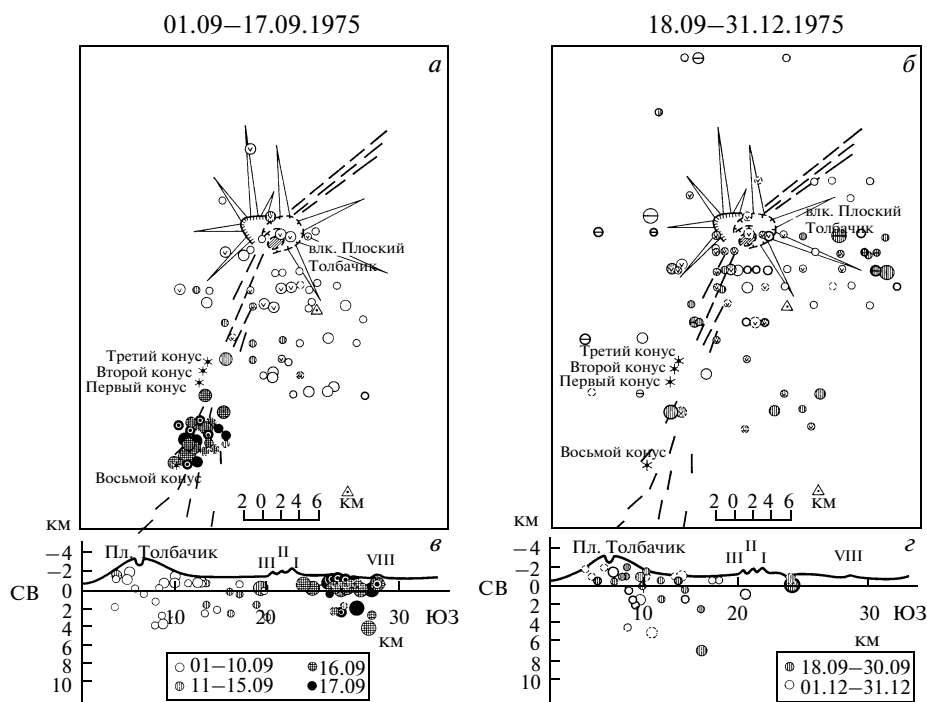
На рис. 9а показано размещение землетрясений в течение последних 15 дней деятельности Северного прорыва БТТИ, 01–15.09.1975 г., и двух дней перед образованием 17.09.1975 г. в 10 км от него Южного прорыва БТТИ. В Южном прорыве стал расти Восьмой конус БТТИ.

01–10.09.1975 г. землетрясения происходили под Плоским Толбачиком на глубинах меньше 4 км. 11–15.09.1975 г. они продолжались в полосе между Северным прорывом и Плоским Толбачиком. Затем в течение двух дней перед Южным прорывом, 16–17.09.1975 г., произошел рой землетрясений, очаги которых перемещались от Северного прорыва к месту Южного прорыва на глубинах менее 4 км, рис. 9а. Таким образом, при образовании Южного прорыва магмы БТТИ внедрились на малых глубинах далее на расстояние 10 км вдоль Толбачинской зоны шлаковых конусов, сходной с рифтами гавайских вулканов.

Примечательно, что к этому времени дно провала в вершинной кальдере Плато Толбачика опустилось с начала извержения примерно на 150 м до

высоты около 2700 м над уровнем моря. Здесь происходил отток глиноземистых базальтов. Извержение магнезиальных базальтов Северного прорыва началось до этого 6.07.1975 г. на высоте 880 м на расстоянии 18 км от кальдеры Плато Толбачика, а глиноземистых базальтов Южного прорыва – 17.09.1975 г. на высоте 380 м на расстоянии 28 км вершинной кальдеры после образования провала в ней [6].

В течение двух недель до окончания извержения Северного прорыва началось смешение магнезиальных базальтов Северного прорыва с мегаплагиофировыми глиноземистыми базальтами, которое продолжалось около двух недель в Южном прорыве. В дальнейшем, с начала октября 1975 г. до окончания БТТИ, 10.12.1976 г., в Южном прорыве извергались мегаплагиофировые базальты. Существенно, что вязкость лав этих базальтов была на два порядка меньше вязкости лав магнезиальных базальтов Северного прорыва. Минимальные значения вязкости, полученные при измерениях вблизи истоков лав, равнялись и  $3 \times 10^6$  Пз в Северном прорыве и  $(1-2) \times 10^4$  Пз в Южном прорыве [6].



**Рис. 9.** Карты эпицентров и вертикальные разрезы области очагов БТТИ перед образованием Южного прорыва (1–17.09.1975 г.) и в начале его деятельности (18.09–31.12.1975 г.): *a* – землетрясения, предвалявшие извержение; *б* – землетрясения сопровождавшие начало извержения; *в*, *г* – вертикальные разрезы по профилю вулкан Плоский Толбачик – Южный прорыв; (дни землетрясений указаны на рис.). На разрезах нанесены землетрясения из полосы шириной  $\pm 5$  км. Условные обозначения см. рис. 7.

С начала до конца извержения Южного прорыва, 17.09.1975–10.12.1976 гг., из его конуса и многочисленных лавовых бокк и истоков непрерывно вытекали потоки жидких мегаплагиофировых базальтов со средним расходом  $4.83 \times 10^6$  т/сут [6].

Показательно, что землетрясения в районе Южного прорыва прекратились после его начала на время его мощного извержения. На рис. 9б видно, что в период времени 18.09–31.12.1975 г. слабые землетрясения в районе БТТИ происходили, в основном, под постройкой Плоского Толбачика. Карты эпицентров землетрясений для района всей КГВ в течение извержения Южного прорыва, 17.09.1975–10.12.1976 гг., приведены в работе [58]. Они показывают, что во время непрерывного излияния базальтов Южного прорыва БТТИ сейсмичность была пониженной во всей КГВ.

Сейсмичность района БТТИ и всей КГВ резко изменилась после окончания извержения Южного прорыва. С 11.12.1976 г. до конца 1977 г. произошло несколько примечательных роев землетрясений, рис. 10. 11.12–31.12.1976 г., сразу после прекращения извержения в Южном прорыве, произошел рой землетрясений в полосе, протянувшейся на 20 км далее на юг до окончания Толбачинской зоны шлаковых конусов, рис. 10. Наиболее вероятно то, что здесь было новое внедрение мегаплагиофировых базальтов, которые не смогли выйти на поверхность из-за снижения давления магм к концу извержения

[51]. Судя по сейсмологическим данным, внедрение магм во время БТТИ происходило на протяжении 50 км вдоль Толбачинской зоны конусов.

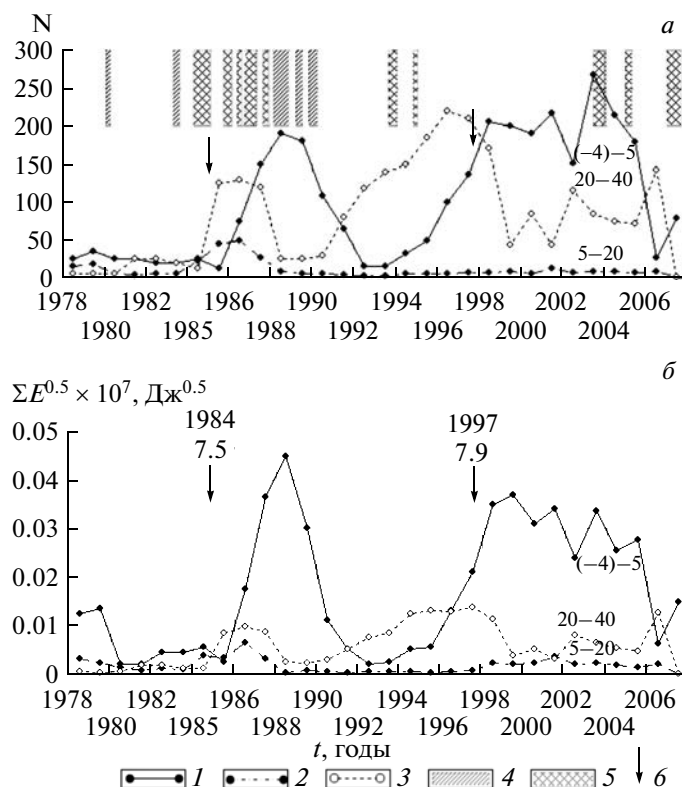
В 1978 г. началась сильная сейсмическая активизация в районе Ключевского вулкана и районе ареальных извержений магнезиальных базальтов у его северо-восточного подножья, в которых почти не было землетрясений во время БТТИ [58].

Приведенные уникальные данные о развитии и изменениях сейсмичности в КГВ, происходивших до, в течение и после БТТИ, показывают, что во время БТТИ, при извержении  $2.2 \text{ км}^3$  ювенильных пород и максимальном наблюдавшемся истечении базальтов из магматической питающей системы КГВ, проявилась связь магматических очагов и каналов, источников магм в большей части КГВ [51].

Расход базальтов в течение 15 мес извержения Южного прорыва, равный  $1763 \times 10^6$  т/г, или  $25 \text{ м}^3/\text{с}$  был в 30 раз больше среднего расхода Ключевского вулкана, наиболее продуктивного вулкана КГВ, который составляет  $60 \times 10^6$  т/г. В таких условиях сейсмическое затишье во всей КГВ во время мощного монотонного извержения Южного прорыва могло быть вызвано тем, что уменьшение давления из-за оттока магм происходило в большей части магматической питающей системы КГВ.

По геодезическим данным во время БТТИ было определено, что давление магмы в питающих дайках извержения при их прорывах на земную поверх-





**Рис. 11.** Изменение среднегодовых значений  $N$  числа землетрясений района Ключевского вулкана (с координатами  $56.00^{\circ}$ – $56.155^{\circ}$  с.ш.;  $160.55^{\circ}$ – $160.755^{\circ}$  в.д.) энергетического класса  $K_S \geq 5.5$  (а) и условных деформаций для этих землетрясений  $\Sigma E^{0.5}$  (б). Глубины очагов: 1 – (+4)–5, 2 – 5–20, 3 – 20–40 км, 4 – временные интервалы побочных извержений, 5 – временные интервалы вершинных извержений; б – даты двух наиболее сильных землетрясений с  $M = 7.5$ , 28.12.1984 г. и  $M = 7.9$ , 05.12.1997 г. (рис. 4).

дования сейсмичности Ключевского вулкана ведутся с 1940-х годов до нашего времени [16, 40, 44, 63]. Результаты изучения землетрясений Ключевского вулкана и их связи были приведены В.И. Горельчик в [63, 68, 71]. В них показано, что под Ключевским вулканом происходит гораздо больше землетрясений, чем под другими вулканами КГВ, и что основные скопления землетрясений находились под ним в нижних слоях коры или коро-мантийном слое на глубине 20–35 км, а также в постройке вулкана и подстилающих его породах выше глубины 5 км. На этих глубинах должны находиться места накопления магм, промежуточный и неглубокий магматические очаги Ключевского вулкана.

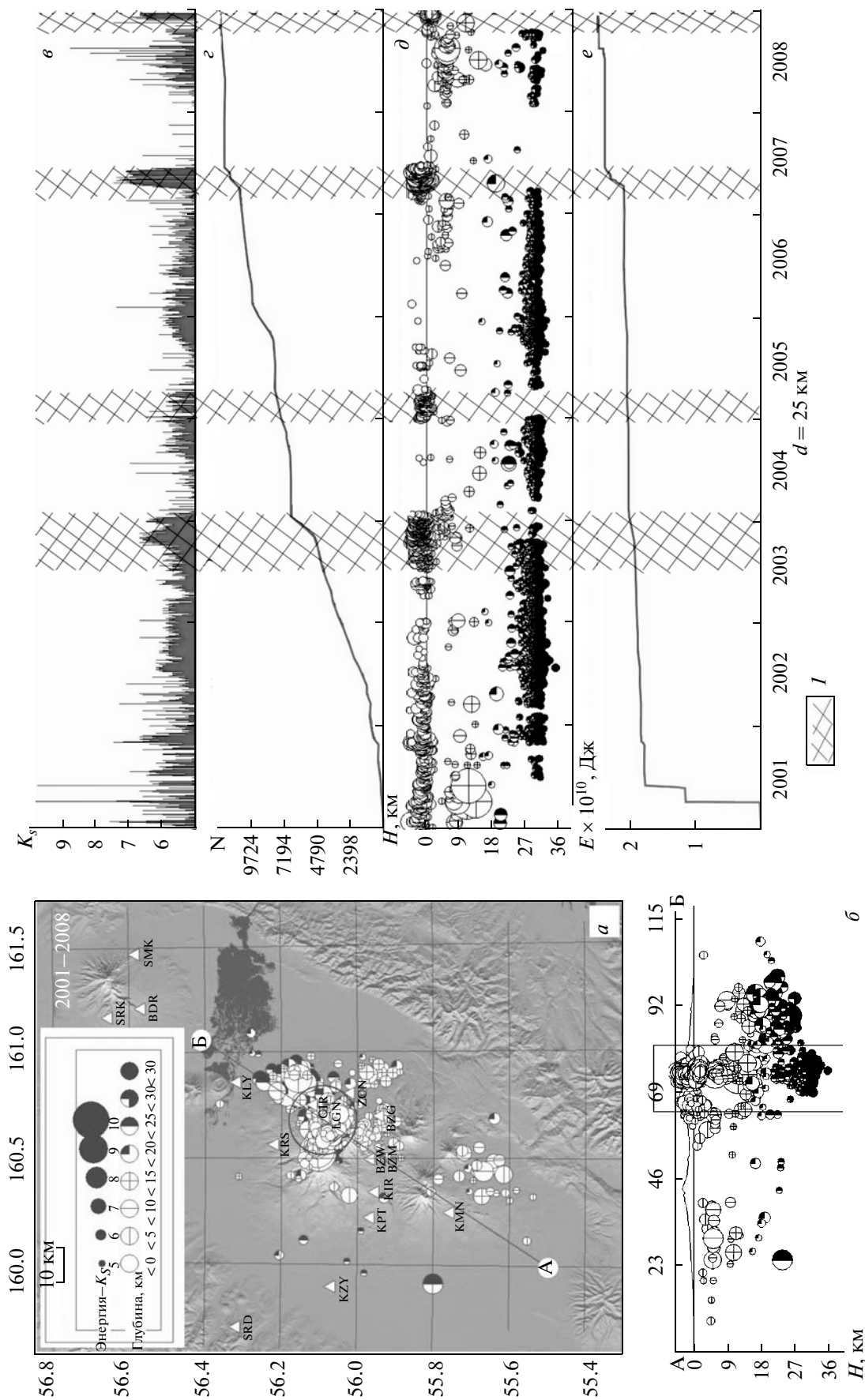
На рис. 11 и 12 приведен ряд данных за 1978–2008 гг. о землетрясениях КГВ и Ключевского вулкана.

На рис. 11а,б для района Ключевского вулкана показаны годовые значения числа землетрясений  $N$  энергетического класса  $K_S \geq 5.5$  ( $K_S = 1.5M + 4.6$ , где  $M$  – магнитуда) и суммы условных деформаций  $\Sigma E^{0.5}$ , где  $E$  – сейсмическая энергия землетрясений, для интервалов глубин очагов (–4)–5, 5–20 и 20–40 км. Нанесены периоды побочных и вершинных извержений Ключевского вулкана. Указано время двух наиболее близких к КГВ сильнейших землетрясений, которые произошли в 1978–2008 гг.

в Камчатском заливе в северной части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны 28.12.1984,  $M = 7.5$  и 5.12.1997,  $M = 7.9$ , рис. 4.

Показательна связь сейсмических и вулканических процессов, которая дважды наблюдалась в 1978–2008 гг., рис. 11а. Были близки по времени моменты сильнейших землетрясений в сейсмофокальной зоне с  $M \geq 7.5$  и максимумы годовых чисел слабых землетрясений на глубинах 20–40 км, которые должны появляться при увеличении притока мантийных магм в промежуточный очаг Ключевского вулкана. Затем в течение нескольких лет максимум сейсмичности перемещался вверх на глубины менее 5 км, и начинались извержения со значительным расходом магм.

Более подробные сведения о связи сейсмичности и извержений Ключевского вулкана получены по данным за 2001–2008 гг., рис. 12. Приведено следующее: карта эпицентров КГВ для глубин менее 40 км, рис. 12а; вертикальный разрез области очагов землетрясений, проходящий вдоль оси КГВ через вершины вулканов Ключевской и Плоский Толбачик, рис. 12б; энергетические классы землетрясений  $K_S$ , рис. 12в; накопление числа землетрясений  $N$  и суммарной энергии землетрясений во времени, рис. 12г,е, и изменения распределения землетрясе-



**Рис. 12.** Карта, распределение по глубине и во времени землетрясений в эпицентральной зоне вулкана Ключевской (диаметр зоны 25 км) за 2001–2008 гг. *a* – карта эпицентров и выделенная эпицентральной зона; *б* – разрез по линии АБ; *в*–*е* – изменение во времени в эпицентральной зоне энергетических классов, количества, глубины и суммарной энергии землетрясений; на карте (*a*) показано расположение телеметрических сейсмических станций (треугольники), кругом обозначена центральная эпицентральной зона вокруг вулкана Ключевской (диаметр зоны 25 км); в условных обозн. *a* показаны величины энергетических классов  $K_5$  и глубины землетрясений. На *б* вертикальным прямоугольником показан разрез центральной эпицентральной зоны вулкана, выделенной на *a*. Для построения использованы данные каталога КФ ГС РАН. *Г* – штриховкой показаны периоды верхинных извержений.

ний по глубине в 2001–2008 гг., рис. 12*д*. Построения сделаны по каталогам Камчатского филиала Геофизической службы (КФ ГС) РАН. На рис. 12 показаны интервалы времени 4 больших вершинных извержений Ключевского вулкана, которые были в 2001–2008 гг. Рис. 12*в–е* построены для эпицентральной зоны диаметром 25 км, находящейся вокруг Ключевского вулкана.

Увеличение числа землетрясений, их рои под вулканами указывают места накопления магм, повышения давления, деформаций и внедрения магм в окружающую среду.

Данные, приведенные на рис. 12, аналогичные построения, сделанные в предыдущие годы [63, 68, 71] а также сведения из других работ [56] показывают следующие свойства и особенности магматической питающей системы Ключевского вулкана.

Поступление глубинных магм из мантии дважды значительно увеличивалось через несколько лет после сильных землетрясений, происходивших в сейсмофокальной зоне на эпицентральных расстояниях 150–250 км от КГВ.

Местом накопления глубинных мантийных магм под Ключевским вулканом является его промежуточный магматический очаг на глубинах 20–35 км. Поступление глубинных магм в этот очаг не происходит непрерывно и равномерно. Судя по длительности роев землетрясений в нем, в 1983–1987 гг. интенсивное поступление происходило в течение 1/4 времени, а в 2001–2008 гг., в период 4 сильных вершинных извержений, – в течение 3/4 времени.

Перед 7 вершинными извержениями Ключевского вулкана, которые были в 1983–1987 и 2001–2008 гг., наблюдались подъем очагов землетрясений от промежуточного очага к постройке вулкана в течение нескольких месяцев, затем сильные рои землетрясений в постройке вулкана во время вершинных извержений. При этом во время вершинных извержений прекращались рои землетрясений в промежуточном очаге, рис. 12, и данные [63]. Это означает, что во время вершинных извержений происходил отток магм из промежуточного очага. Судя по длительности роев землетрясений на глубинах около 30 км и перерывов между ними, рис. 12, в 2001–2008 гг. продолжительность времени интенсивного поступления магм в промежуточный очаг перед вершинными извержениями было примерно в 4 раза больше времени оттока магм из этого очага во время извержений.

Сведения об основных свойствах вулканической деятельности и магматической питающей системы КГВ, приведенные в разделах 1.1, 1.2 и 1.3, обобщаются в разделе 4 при описании геофизической модели этой системы.

## 2. МАГМАТИЧЕСКАЯ ПИТАЮЩАЯ СИСТЕМА КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА ПО ДАННЫМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ В 1978–2009 гг.

Перемещение магм из мест их накопления к поверхности может начинаться за несколько месяцев, иногда и лет до начала извержения. Подъемы склона вулкана, предваряющие извержение, свидетельствуют об этих перемещениях магмы. Прямые данные, указывающие на перемещения магмы под вулканом – это изменения высот реперов вдоль радиального по отношению к вулкану профиля. Систематические геодезические измерения на СВ склоне вулкана Ключевской выполняются с 1978 г. [23]. Схема полигона с расположением геодезических пунктов представлена на рис. 13. Представительные результаты получены при измерении вертикальных деформаций земной поверхности на радиальном по отношению вулкана нивелирном профиле вдоль р. Киргурич [60 и др.], рис. 14. Максимальная величина вертикальных смещений за 30 лет наблюдений на ближайшей к кратеру вулкана площадке достигла 23 см. Ошибка определения вертикальных смещений равна  $\pm 1$  мм  $L^{1/2}$  ( $L$  – длина нивелирного профиля в км). В начале работы выполнялись на профиле протяженностью 28 км, в дальнейшем длина профиля была сокращена до 15 км, учитывая малость смещений на больших удалениях от вулкана. Нулевой репер расположен на площадке Р1 в 26 км от центра кратера вулкана, ближайший к кратеру репер находится на площадке Р5 в 11 км от центра кратера.

В вулканологии при моделировании деформаций земной поверхности над магматическими очагами принимается, что источник давления, вызывающий эти деформации, имеет форму шаровой полости, горизонтального диска или цилиндрической полости [78, 81]. В предыдущей работе [60] допускалось применение осесимметричной модели на Ключевском вулкане. Результаты геодезических наблюдений использованы для оценки глубины центра эффективного избыточного магматического давления и его величины [60]. Было получено, что центр эффективного источника давления перемещался в ходе деятельности вулкана в 1981–2006 гг. в интервале глубин 25–3 км от вероятной области накопления глубинных магм в промежуточном очаге до периферического очага и слоев, подстилающих постройку вулкана. В отличие от предыдущих исследований, интерпретация, обработка данных о вертикальных деформациях в разделе 2 выполнена двумя способами.

Важным свойством магматической питающей системы Ключевского вулкана является то, что в ней существуют два главных источника избыточного магматического давления – промежуточный и периферический очаги, глубины которых не меняются и равны 25 и 3 км, соответственно, раздел 1.3, рис. 12 [60 и др.]. На этом основании во втором спо-

собе интерпретации данных о вертикальных деформациях поверхности Ключевского вулкана рассматриваются два источника давления, расположенных на разных глубинах. Глубины источников давления выбраны из анализа полученных ранее сейсмологических и геодезических наблюдений.

По сейсмологическим данным одно из двух главных скоплений землетрясений под Ключевским вулканом находится в нижних слоях коры или коро-мантийном слое на глубинах 20–35 км. Другой максимум наблюдается в постройке вулкана и подстилающих породах. Положение промежуточного магматического очага определяется также по глубине центра эффективного источника давления из геодезических данных. Исходя из этого, глубины двух сферических источников давления были приняты соответственно равные 25 и 3 км. При наличии двух сферических источников давления, расположенных на глубинах  $H_1$  и  $H_2$  ( $H_2 > H_1$ ), смещения земной поверхности  $U$  будут равны сумме смещений от двух источников:

$$U_N = U_{N1} + U_{N2}. \quad (1)$$

Для расчета смещений взяты соотношения, полученные в [20, 78, 81]

$$U_N = \left\{ -2\Delta P_1 \frac{1-\nu^2}{C} R_1^3 \frac{H_1}{(r_i^2 + H_1^2)^{3/2}} \right\} + \left\{ -2\Delta P_2 \frac{1-\nu^2}{C} R_2^3 \frac{H_2}{(r_i^2 + H_2^2)^{3/2}} \right\}. \quad (2)$$

В выражении (2) обозначим:

$$a_i = \frac{H_1}{(r_i^2 + H_1^2)^{3/2}}, \quad b_i = \frac{H_2}{(r_i^2 + H_2^2)^{3/2}}, \quad (3)$$

$$x = A_{3 \text{ км}} = -2\Delta P_1 \frac{1-\nu^2}{C} R_1^3, \quad (4)$$

$$y = A_{25 \text{ км}} = -2\Delta P_2 \frac{1-\nu^2}{C} R_2^3.$$

В первом способе обработки данных вначале определялась глубина  $Z_0$  одного эффективного источника давления, а затем вычислялся множитель  $A^1$ , учитывающий избыточное давление  $\Delta P$ , геометрические размеры источника давления и упругие свойства окружающей среды. По полученным значениям  $Z_0$  и  $A^1$  оценивалось относительное изменение объема эффективного источника магматического давления  $V^1$  [60].

Во втором способе глубины фиксированы, а множители  $A_{3 \text{ км}}$  и  $A_{25 \text{ км}}$  определялись непосредственно из решения условных уравнений (5). В выражениях (2–4) принято:  $C$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $r_i$  – расстояние от вертикальной оси, проходящей через центр вулкана (через кратер) до точки наблюдения (до соответствующей нивелирной площадки),  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы сферических очагов с глубинами  $H_1 = 3$  и  $H_2 = 25$  км,  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  – избыточное давление на глубинах  $H_1$  и  $H_2$ . Для

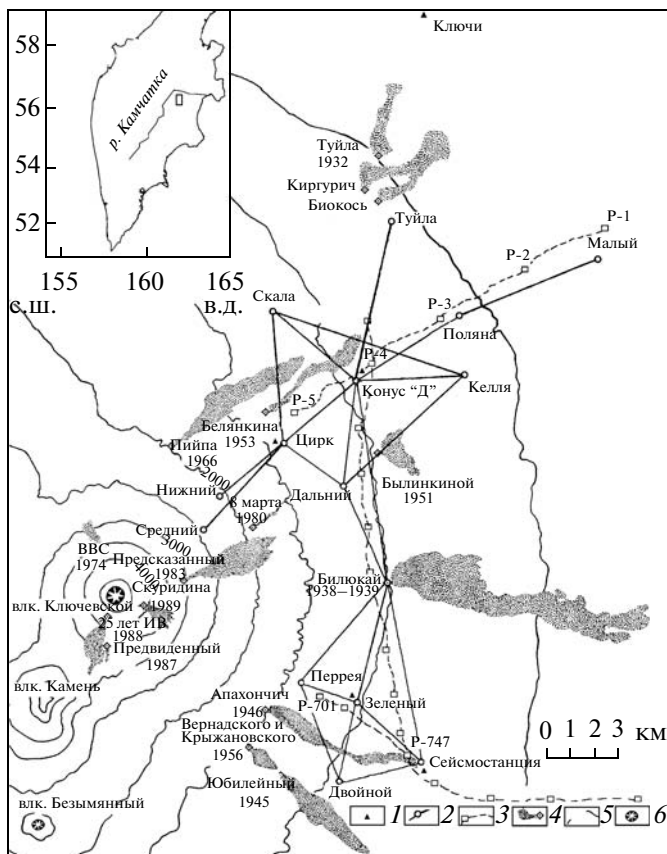


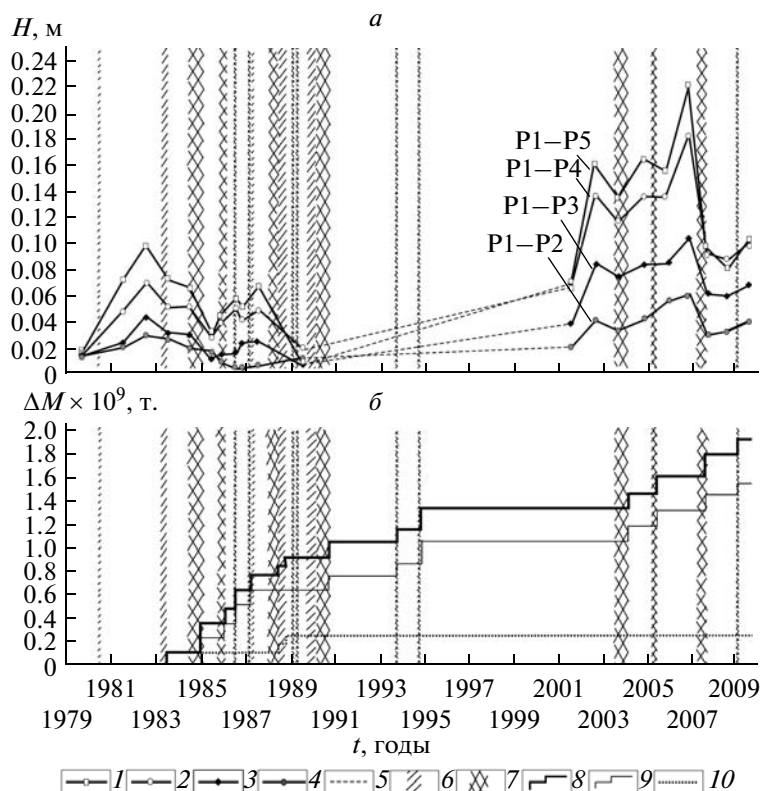
Рис. 13. Схема района исследований, расположения побочных извержений вулкана Ключевской 1932–1989 гг., размещения нивелирных профилей, линий геодезических сетей и сейсмических станций. 1 – сейсмостанции; 2 – пункты линейных измерений; 3 – реперы нивелирных профилей; 4 – лавовые потоки побочных извержений, указаны их названия и годы; 5 – горизонтали; 6 – кратер действующего вулкана.

нахождения неизвестных  $x$  и  $y$  составим на каждый год наблюдений систему условных уравнений:

$$a_1x + b_1y = U_{1i}, \quad a_2x + b_2y = U_{2i}, \quad a_3x + b_3y = U_{3i}. \quad (5)$$

Величина  $U$  соответствует изменению превышений между исходным репером  $P_1$  и репером соответствующей площадки  $P_i$  за период времени от начала измерений (1979 г.) до соответствующего года повторных измерений. В уравнениях (5) величина  $U_{1i}$  – разность превышений между реперами  $P_1$  и  $P_3$ ,  $U_{2i}$  – между реперами  $P_1$  и  $P_4$ ,  $U_{3i}$  между реперами  $P_1$  и  $P_5$ .

Из решения уравнений (5) на каждый год наблюдений получены значения  $x$  и  $y$ . Используя найденные значения  $x$  и  $y$ , выполним оценку объемов эффективных источников давлений  $V_1$  и  $V_2$ . В первом приближении будем считать постоянными в небольшие интервалы времени величины  $\nu$  и  $C_{1,2}$ , зависящие от свойств среды. Избыточные давления  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  меняются на глубинах  $H_1 - H_2$ .



**Рис. 14.** Вертикальные смещения на профиле “Киргурич” за 1979–2009 гг., северо-восточный склон вулкана Ключевской: 1–4 – изменения во времени вертикальных смещений между нулевым репером – P1 и реперами P2, P3, P4 и P5, рис. 13; 5 – перерывы в наблюдениях; 6 – периоды побочных извержений; 7 – периоды вершинных извержений; 8 – график суммарного накопления продуктов извержений вулкана Ключевской за 1979–2009 гг. для вершинных и побочных извержений; 9 – то же для вершинных извержений; 10 – то же для побочных извержений.

Введем обозначения:

$$K_1 = -8.38\Delta P_1 \frac{1-v^2}{C_1}, \quad K_2 = -8.38\Delta P_2 \frac{1-v^2}{C_2}. \quad (6)$$

Так как объем сферы радиуса  $R$  равен  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ , учитывая выражения (2) и (6), значения объемов  $V_1$  и  $V_2$  будут равны:

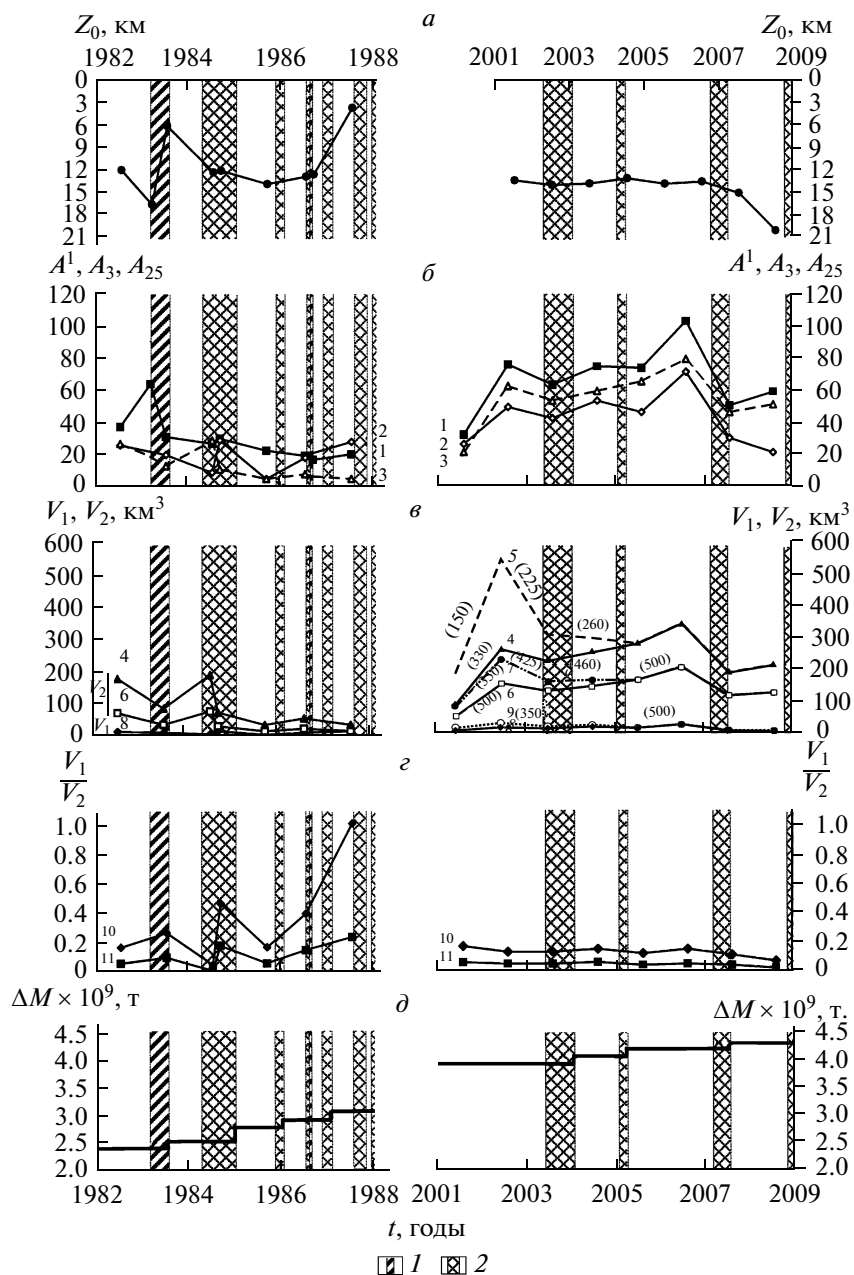
$$V_1 = x/K_1 \quad \text{и} \quad V_2 = y/K_2, \quad (7)$$

где  $V_1$  – объем источника давления в области периферического, неглубокого очага на глубине 3 км,  $V_2$  – объем источника давления в области промежуточного очага на глубине 25 км.

На глубинах 25–5 км находится непрерывный магматический канал, по которому магма перемещается из промежуточного очага к периферическому очагу и кратеру Ключевского вулкана. Избыточное магматическое давление на глубине 3 км в этом канале может достигать 300–500 бар и снижаться на 100–150 бар, когда дно вершинного кратера опускается на глубину 600 м, [53, 60]. Для расчета объемов промежуточного и неглубокого периферического очагов взяты следующие значения избыточного магматического давления:  $\Delta P_1 = 500$  бар – избыточное давление в периферическом очаге на глубине 3 км,  $\Delta P_2 = 300$  и 500 бар – избыточное давление в проме-

жуточном очаге на глубине 25 км. Для вычисления модулей Юнга  $C_1$  и  $C_2$ , соответствующих глубинам 3 и 25 км, взяты средние значения скоростей поперечных волн ( $V_S = 1.40$  км/с для верхних слоев коры мощностью 3 км,  $V_S = 3.03$  км/с для слоев коры мощностью 25 км), а также средние плотности  $\rho_1 = 2.20$  г/см<sup>3</sup> для слоя мощностью 3 км и  $\rho_2 = 2.57$  г/см<sup>3</sup> для слоя мощностью 25 км. Получены следующие значения:  $C_1 = 0.108 \times 10^6$  и  $C_2 = 0.590 \times 10^6$ .

На рис. 15а–д представлены характеристики магматической питающей системы вулкана Ключевской, полученные при обработке данных геодезических наблюдений двумя названными способами: а – изменение глубины  $Z_0$  эффективного источника магматического давления под вулканом, б – значения множителя  $A^1$ , показывающего зависимость величины деформаций для одного эффективного источника магматического давления от избыточного давления, свойств окружающей среды и объема источника (4), а также значения аналогичных множителей  $A_3$  и  $A_{25}$  для двух сферических источников магматического давления с фиксированными глубинами  $H = 3$  и  $H = 25$  км, в – вероятные значения объемов эффективных источников магматического давления  $V_1$  и  $V_2$  для этих же глубин, г – изменение



**Рис. 15.** Характеристики магматической питающей системы вулкана Ключевской по геодезическим данным за 1982–1988 и 2001–2008 гг.: *a* – глубина  $Z_0$  центра эффективного источника давления при одном центре давления; *б* – изменения параметра  $A$ , учитывающего избыточное давление, размеры источника давления и упругие свойства среды: 1 –  $A^1$  для магматического очага с переменной глубиной центра давления, 2 и 3 –  $A_3$  и  $A_{25}$  для двух центров магматического давления, расположенных на глубинах 3 и 25 км (размерность параметра  $A$  единицы объема, его значения на *б* даны в условных величинах); *в* – возможные объемы источников давления в области промежуточного ( $V_2$ ) и периферического ( $V_1$ ) очагов, цифрами у кривых обозначены различные значения избыточных магматических давлений; 4 –  $\Delta P_2 = 300$ , 5 –  $150 \leq \Delta P_2 \leq 300$ , 6 –  $\Delta P_2 = 500$ , 7 –  $350 \leq \Delta P_2 \leq 500$ , 8 –  $\Delta P_1 = 500$ , 9 –  $350 \leq \Delta P_1 \leq 500$  бар; *г* – отношения объемов источников давления (периферического к промежуточному), в периферическом источнике избыточного давления  $\Delta P_1 = 500$  бар, в промежуточном источнике  $\Delta P_2 = 500$  и  $\Delta P_2 = 200$ , 10 –  $V_1(500)/V_2(500)$ , 11 –  $V_1(500)/V_2(200)$ ; *д* – суммарный объем продуктов извержений вулкана Ключевской за 1982–2009 гг. Периоды вершинных и побочных извержений: 1 и 2.

во времени показателя того, какая доля магм системы находится в неглубоком, периферическом очаге (отношение объемов  $V_1$  к  $V_2$ ),  $\Delta M$  – накопление продуктов извержений Ключевской группы вулканов за 1982–2008 гг.

Деятельность вулкана в 1978–2008 гг., можно разделить на два периода [60, 62].

Во время первого периода, с 1978 по 1990 гг., происходил постепенный подъем абсолютных высот побочных прорывов к вершине вулкана, в ходе по-

бочных и вершинных извержений произошло переполнение вершинного кратера, лава длительное время поступала на склоны вулкана. Центр эффективного давления во время этих событий в 1978–1988 гг. перемещался в интервале глубин от 3 до 17 км и находился на наименьшей глубине в 1988 г., перед прекращением побочных извержений вулкана, рис. 15а.

В период покоя, 1995–2002 гг., происходили подъем склона вулкана и накопление магм в промежуточном очаге на глубинах 25–30 км, рис. 14, 15б. Коэффициенты  $A^1$ ,  $A_3$ ,  $A_{25}$ , характеризующие эффективное избыточное давление в одном источнике давления с переменной глубиной и двух источниках с центрами давления на глубинах 3 и 25 км, вновь увеличились и в 2001 г. оказались на уровне 1983 г., который был перед сильной серией извержений 1983–1990 гг., рис. 15б,в.

Во время второго периода активности, с 2001 по 2009 гг., происходили только вершинные извержения, рис. 14, 15д. При этом центр эффективного давления магмы был на одной глубине, близкой 15 км, и только к завершению серии вершинных извержений произошло увеличение глубины центра магматического давления до 21 км, рис. 15а. Ошибки определения глубины центра эффективного давления лежат в пределах 1–3 км [60]. В этом периоде наблюдалось значительное накопление магмы и могло происходить увеличение избыточного давления в питающей системе вулкана, рис. 14, 15б.

Был выполнен расчет объемов возможных источников давления. Расчетные значения объемов источников давления  $V_1$  и  $V_2$  определяются принятыми значениями избыточных магматических давлений в этих очагах (4), рис. 15в. Сферический эффективный источник магматического давления является наиболее простой моделью. В действительности давление магмы может создаваться группой связанных магматических очагов, существенно возрастать при притоке магм, внедрении новых интрузий и уменьшаться при оттоке магм, застывании интрузий и временной изоляции отдельных магматических тел. Поэтому рассчитываемые величины объемов  $V^1$ ,  $V_3$  и  $V_{25}$  и их отношения могут также быть показателями интенсивности интрузивных процессов в области промежуточного и периферического очагов.

Отношение объемов периферического и промежуточного очагов  $V_1/V_2$  изменяется от 0.1 до 1.0 при постоянном избыточном давлении в неглубоком очаге ( $\Delta P_1 = 500$  бар) и переменном избыточном давлении в промежуточном очаге (принято, что  $\Delta P_2$  в 2001–2009 гг. увеличивалось при притоке магм от 300 до 500 бар), рис. 15г.

В случае равного избыточного давления в периферическом и промежуточном очагах,  $\Delta P_1 = \Delta P_2 = 500$  бар, средние величины объемов источников по 15 измерениям 1982–2009 гг. равнялись  $V_1 = (15.2 \pm 8.4)$  км<sup>3</sup> и  $V_2 = (95.0 \pm 64.6)$  км<sup>3</sup>, а их отношение равно 0.16, рис. 15. Избыточное давление в периферическом очаге при проседании дна крате-

ра на глубину до 600 м менялось на ограниченную величину от 500 до 350 бар. Потому рассчитанные изменения величины  $V_1$  должны были определяться, главным образом, изменениями размеров источника давления, появлением и застыванием новых даек и силлов в нем.

Во время наибольшей активности вулкана Ключевской в период чередования побочных и вершинных извержений (1983–1990 гг.) расход изверженных продуктов равнялся 175 млн. т. в год и был в 2.1 раза выше, чем в последующий период вершинных извержений (2002–2008 гг.), рис. 14, 15д. Средний расход Ключевского вулкана равен  $60 \times 10^6$  т/г.

Рис. 15г показывает, что в 1983–1988 гг. наиболее интенсивно происходили увеличение относительных размеров источника давления в области периферического очага и перетекание магм с больших глубин к поверхности из промежуточного в периферический очаг.

В годы выполнения геодезических измерений (1979–1989 и 2001–2008 гг.) произошла большая перестройка в деятельности Ключевского вулкана, происходившей в период с 1930 по 2009 гг., [60, 62, 68]. Результаты выполненных в указанные годы геодезических наблюдений выявили тенденцию подъема СВ склона вулкана, связанную с накоплением магмы в питающей системе вулкана, рис. 14а. Значительный подъем склона чередовался опусканиями, сопровождавшими извержения вулкана, как побочные так и вершинные. При обработке и интерпретации результатов измерений применена методика, при использовании которой по непосредственно измеренным вертикальным смещениям получены оценки объемов магматических очагов Ключевского вулкана — промежуточного на глубине 25 км и неглубокого, периферического на глубине 3 км. Выявлены большие изменения в магматической питающей системе вулкана. В 1983–1990 гг., когда произошла с большим расходом магм серия из 10 побочных и вершинных извержений, определены значительный отток магм из промежуточного очага и перемещение центра давления в периферический очаг. В 2003–2009 гг., когда были только вершинные извержения, происходил приток и накопление магм в промежуточном очаге.

Проведенные приближенные оценки объемов  $V_1$  и  $V_2$  эффективных источников избыточного магматического давления показывают, рис. 15, что размеры интрузивной деятельности в коромантийном слое и нижних слоях коры на глубинах близких 25 км были в 1982–2009 гг. в среднем в 6 раз больше, чем в верхних слоях коры на глубинах около 3 км. Во время серии побочных и вершинных извержений Ключевского вулкана 1983–1988 гг. это соотношение равнялось приблизительно 4, а во время вершинных извержений Ключевского вулкана в 2003–2009 гг. оно равнялось приблизительно 7.

### 3. ДАННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ И ИСТОЧНИКАХ МАГМ КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

В настоящее время одним из самых современных и продуктивных геофизических методов является метод сейсмической томографии, который дает возможность по особенностям распространения сейсмических волн землетрясений восстанавливать трехмерное изображение скоростной структуры земной коры и верхней мантии в области ее пересечения лучевыми траекториями [34, 37 и др.]. Сходные в своей основе методы применялись на Камчатке с 1956 г. для изучения скоростных неоднородностей земной коры и верхов мантии и обнаружения магматических очагов [16, 41, 48, 64 и др.]. Они получили дальнейшее развитие в томографических исследованиях глубинного строения и геодинамики Камчатского звена Курило-Камчатской островной дуги, области ее пересечения с Алеутской дугой и вулканических центров Камчатки, в частности Ключевской группы вулканов [14, 72, 73, 75, 76, 79 и др.].

В разделе 3 представлены результаты сейсмографических построений, полученные группой исследователей Института вуканологии и сейсмологии ДВО РАН, Института геодинамики геосфер РАН, Университета г. Цюрих (Швейцария) [79 и др.]. Объемные скоростные изображения рассчитывались по единой методике с использованием станционных данных (времен прихода  $P$  и  $S$ -волн), взятых из различных каталогов Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН). Скоростная (региональная) модель земной коры и верхней мантии построена по данным региональных землетрясений, зарегистрированных камчатской сетью станций за период 1971–2003 г. Одновременно, строилась более детальная (локальная) скоростная модель земной коры непосредственно для района Ключевской группы вулканов. В качестве исходных при ее построении были приняты цифровые данные вулкано тектонических (ВТ) землетрясений КФ ГС РАН, зарегистрированные 12-ю телеметрическими станциями за период 2000–2004 гг.

Интерпретация времен вступлений  $P$  и  $S$  сейсмических волн состояла из нескольких основных этапов, включающих расчеты станционных поправок и оптимальных одномерных скоростных моделей, которые дают минимальное среднее значение среднеквадратичной ошибки времени пробега для всех землетрясений (1), переопределения на их основе координат гипоцентров выбранных из каталога землетрясений (2), оценок разрешающей способности и моделирования пространственной скоростной структуры (3). Особенности отбора землетрясений, положение которых уверенно определено имеющейся сетью станций, изложены в [79]; при расчете региональной модели из каталога выбрано 6561 событий, локальной – 11357. Вы-

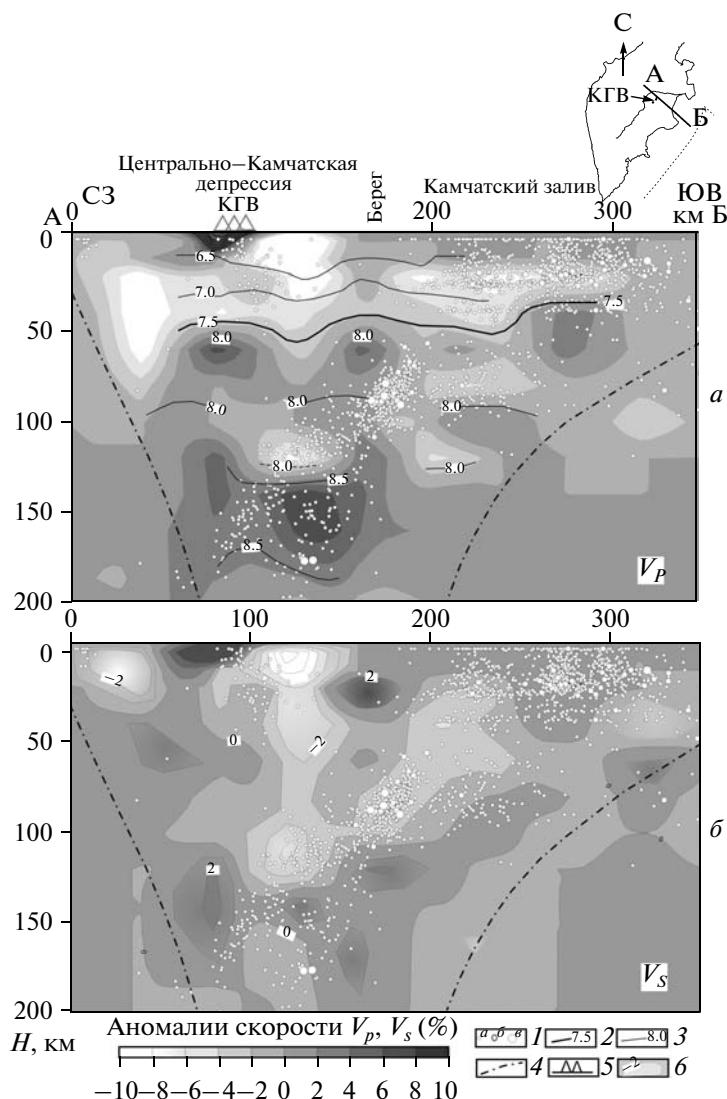
числения одномерных моделей для Восточной Камчатки и Ключевской группы вулканов проводились с помощью программы VELEST [74]. Далее координаты всех гипоцентров были переопределены согласно новым годографов, рассчитанных с использованием полученных скоростных моделей; вычисления проводились с помощью широко используемой в настоящее время программы SIMULPS14. При построении трехмерных изображений была выбрана следующая параметризация, осреднение свойств среды – прямоугольные блоки с длиной ребер  $30 \times 30 \times 20$  км для региональной модели и  $10 \times 10 \times 5$  км – для локальной. При выборе размеров ячеек принимались во внимание значения частот сейсмических сигналов от региональных и вулкано тектонических землетрясений (1 и 5 Гц, соответственно), априорных погрешностей использованных данных и особенностей глубинного строения исследуемых объектов. На таких частотах длины продольных волн равны 8 и 1.5 км, и не могут выделяться тела меньшего размера.

Траектории рассчитанных сейсмических лучей покрывают исследуемую область коры и верхней мантии таким образом, что наилучшая разрешенность достигается в интервале глубин 20–120 км в районе Восточной Камчатки и в интервале 5–40 км – под Ключевской группой вулканов.

Трехмерные изображения глубинных скоростных моделей, полученные по  $P$  и  $S$ -волнам в виде распределения параметров  $V_p$ ,  $V_s$  и  $V_p/V_s$ , представлены в данной работе их вертикальными сечениями, на которые спроецированы землетрясения с полосы шириной  $\pm 10$  км на региональные профили и  $\pm 5$  км – локальные, соответственно, рис. 16 и 17.

Рис. 16 иллюстрирует разрез вдоль профиля, который в направлении с северо-запада на юго-восток пересекает Ключевскую группу вулканов, расположенную в северной части Центрально-Камчатской депрессии, акваторию Камчатского залива и практически доходит до Курило-Камчатского желоба. Здесь значительно изменяется геометрия сейсмофокальной зоны и свойства Тихоокеанской плиты [38, 39, 59 и др.]. Это, вероятно, связано с максимальным приближением структуры подводных Императорских вулканических гор в районе Камчатского залива к побережью полуострова. Для данного района предлагается целый ряд различных геодинамических реконструкций, имеющих целью объяснить мощный вулканизм Северной группы вулканов Камчатки [38, 73 и др.].

Из скоростного разреза  $V_p$ , рис. 16а, следует, что мощность мантийной литосферы в рассматриваемом районе незначительна и составляет 20–30 км. Астеносферный слой, с которым связаны корни мантийного магматического питания Ключевских вулканов, четко выделяется по аномалии пониженной скорости в интервале глубин 80–130 км, начинающемся практически от кровли высокоскоростного фокального слоя. В пределах последнего ско-



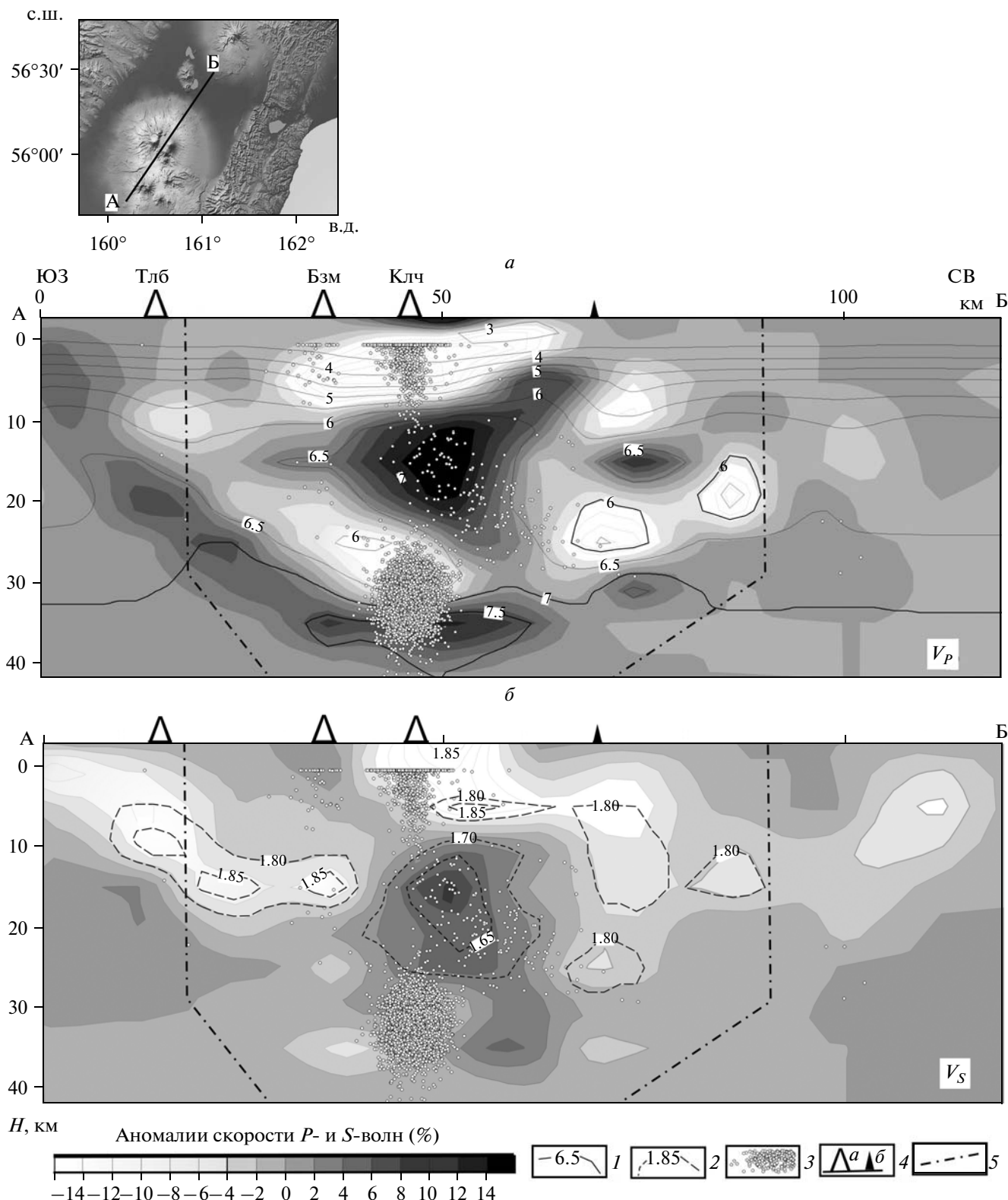
**Рис. 16.** Вертикальные сечения пространственной сейсмографической модели земной коры и верхней мантии вдоль профиля АБ, построенной по временам вступлений  $P$  и  $S$ -волн региональных камчатских землетрясений (а и б), соответственно. 1 – гипоцентры землетрясений энергетических классов  $K_S \approx 10-11$  (а),  $K_S \approx 11-13$  (б),  $K_S > 13$  (в); 2 – изолиния скорости  $V_p = 7.5$  км/с, соответствующая разделу Мохо; 3 – другие изолинии значений  $V_p$  в литосфере и астеносфере; 4 – линии, ограничивающие на разрезе область надежных построений; 5 – вулканы; 6 – выделенные аномалии  $V_s$ . На врезке показано положение профиля АБ и Ключевской группы вулканов (КГВ). Гипоцентры взяты в полосе шириной  $\pm 10$  км.

рость  $V_p$  аномально высокая – 8.5–8.7 км/с, что может быть обусловлено скоростной анизотропией.

На скоростном сечении  $V_s$ , рис. 16б, выделена практически вертикальная аномалия пониженной скорости – вероятно, высокопроницаемая зона, с которой связаны каналы поступления высокотемпературного вещества (магм, флюидов, расплавов) в земную кору с глубины 120–130 км.

Скоростное строение земной коры непосредственно под Ключевской группой вулканов, полученное по данным вулканотектонических землетрясений, иллюстрирует вертикальный профиль, секущий объемные модели  $V_p$  и  $V_s$  в северо-восточном направлении вдоль осевой линии вулканов (рис. 17а,б). Структура земной коры четко отобра-

жена в контрастах аномалий скоростей. Наиболее интенсивная низкоскоростная аномалия приурочена к низам коры, ее центр расположен на глубине ~25 км, мощность около 7–10 км, интенсивность аномалии по  $V_p$  составляет 8–10% (рис. 17а). По  $V_s$  – она менее отчетлива, около 2–4%, рис. 17б. К этой аномалии приурочены длиннопериодные землетрясения, в записях которых четко видны  $S$ -волны [15]. Совместный анализ скоростных данных и сейсмичности позволяет связать выявленную аномальную зону с промежуточным магматическим очагом Ключевских вулканов. Вторая интенсивная низкоскоростная аномалия (до 14–16%) выделена в осадочно-вулканогенном слое, ее центр расположен на глубине около 5 км. Эта аномалия (с учетом



**Рис. 17.** Вертикальные сечения пространственной скоростной модели земной коры, рассчитанной по временам вступлений  $P$  и  $S$ -волн вулканотектонических землетрясений ( $a$  и  $b$ ), соответственно. 1 – изолинии абсолютных значений  $V_p$ , км/с; 2 – изолинии значений параметра  $V_p/V_s$ ; 3 – гипоцентры вулканотектонических землетрясений ( $K_S \geq 5.5$ ); 4 – вулканы:  $a$  – Толбачик (Тлб), Безымянный (Бзм), Ключевской (Клч),  $b$  – конус Киргурич; 5 – линии, ограничивающие на разрезе область надежных построений. На врезке показано положение профиля АБ. Гипоцентры взяты в полосе  $\pm 5$  км. Вулканы и арельный конус Киргурич нанесены на рис. 1 и 13.

петрологических данных) интерпретируется как малоглубинный периферический очаг Ключевского вулкана [69].

Вариант расчета пространственной скоростной модели  $V_p$  приведен также в [75, 76]. Аномалию пониженной скорости в нижней коре, конической формы, выделенной в интервале глубин 35–22 км, авторы связывают с промежуточным магматическим очагом. Таким образом, скоростная аномалия в нижней коре является достаточно контрастной и четко выделяется при использовании различных исходных данных (полученных в аналоговом и цифровом вариантах) и методов их интерпретации.

Выявленные в результате сейсмотомографических построений зоны пониженных значений скоростных параметров  $V_p$  и  $V_s$  и аномалий параметра  $V_p/V_s$ , совместно с ранее полученными данными контролируемых источников (КМПВ-ГСЗ) [2, 4, 14 и др.], позволяют составить схему расположения магматических очагов питания под Ключевской группой вулканов, возможных путей подъема магм из верхней мантии в промежуточные и периферические очаги, а также связи и перемещения магм в земной коре между очагами и источниками магм вулканов Ключевской группы.

#### 4. СВОЙСТВА МАГМАТИЧЕСКОЙ ПИТАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КГВ

Как отмечалось во Введении, свойства магматических питающих систем вулканов Курило-Камчатской дуги и Ключевского вулкана рассматривались ранее в работах [52, 53, 56, 60, 61]. Были представлены их геофизические модели. Последнее описание такой модели дано в [60, 62]. Исследования велись на основе данных об извержениях, сейсмичности, деформациях и других геофизических данных, теории механизма вулканической деятельности. В данном разделе аналогичным образом рассматриваются особенности, свойства и механизм деятельности магматической питающей системы всей КГВ. Используются и обобщаются результаты, изложенные в разделах 1–3, сведения из предыдущих работ, дополнительные сведения о свойствах магматических питающих систем, а также данные о глубинном строении КГВ и петрологии ее пород. В магматической питающей системе КГВ выделяются, как и в предыдущих работах, 5 основных частей. В данном разделе совместно рассматриваются свойства двух верхних частей этой системы, находящиеся в земной коре и в постройках вулканов. Система сильно менялась в течение длительного развития КГВ. Рассматривается ее современное состояние. При этом приводятся дополнительные сведения и оценки.

**Верхняя часть погружающейся Тихоокеанской плиты, глубина около 160 км под КГВ. Источник вещества и энергии.** В разделе 1 приводились сейсмологические данные о том, что здесь находится источник энергии и летучих, необходимых для зарождения магм, рис. 4. Тепло, выделяющееся при деформациях

в сейсмофокальной зоне, может быть достаточным для начала частичного плавления. Надо заметить, что имеются иные мнения по этому вопросу. Например, в книге [77] приведен вывод о том, что такой разогрев не является главной причиной плавления у верхней границы погружающейся плиты. Однако при этом не учитывалась в должной мере огромная энергия очагов происходящих здесь землетрясений.

На рис. 18 приведены данные о масштабах вулканической и магматической деятельности под КГВ и их связи с процессами, происходящими в сейсмофокальной зоне Камчатки. На рис. 18а–г показаны графики накопления суммарного веса ювенильных вулканических пород, изверженных в 1930–2008 гг. вулканами Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик с Толбачинской зоной моногенных конусов и всей КГВ. Суммарный средний расход магм этих вулканов КГВ (155 млн. т/г) составлял более половины общего расхода магм всех 70 действующих вулканов Курило-Камчатской дуги (250 млн. т/г). Основная масса пород появилась при следующих извержениях: 1938 г. – Билоукай, крупнейший побочный прорыв Ключевского вулкана, 1945 г. – пароксизмальное извержение Ключевского вулкана, 1956 г. – взрыв андезитового вулкана Безымянный, 1975–1976 гг. – Большое трещинное Толбачинское извержение [19], рис 18. Примечательно то, что редкое катастрофическое извержение гигантского андезитового вулкана Шивелуч, который находится в 80 км к северо-востоку от вулкана Ключевской, произошло в 1964 г. [18, 19].

На рис. 18г указаны годы и магнитуды землетрясений с  $M \geq 7.3$ , которые произошли на Камчатке в 1930–2008 гг. Основные данные о них приведены в таблице, эпицентры показаны на рис. 4. Всем четырем названным выше крупнейшим извержениям КГВ за 2–4 года до них предшествовали землетрясения с  $M \geq 7.3$  в сейсмофокальной зоне Камчатки. Землетрясение с  $M = 7.7$ , которое было 04.05.1959, рис. 4, табл., предшествовало катастрофическому взрыву вулкана Шивелуч, который был 12.11.1964 г. [18, 19]. После землетрясений 28.12.1984 г.,  $M = 7.5$ , и 05.12.1997 г.,  $M = 7.9$ , которые произошли в районе КГВ, рис. 4 и табл., наблюдалось большое усиление вершинной деятельности Ключевского вулкана, рис. 11 и 18. Наиболее яркое явление такого рода наблюдалось на Камчатке в начале XX в. 25.03.1904 г. у тихоокеанского побережья Южной Камчатки произошли два землетрясения с  $M = 7.7$ , а 28.03.1907 г. в 100 км от этого места в кальдере Ксудач произошло сильнейшее извержение начала XX в. на Камчатке, при котором было выброшено 3 км<sup>3</sup> пород [18, 31]. Приведенные данные показывают, что сильнейшие извержения в КГВ появлялись через несколько лет после больших землетрясений и активизации глубинных процессов в сейсмофокальной зоне Камчатки.

Участок сейсмофокальной зоны под КГВ, в котором начинаются процессы магнообразования, имеет протяженность около 100 км вдоль Курило-Камчатской дуги. По сейсмологическим данным, мощность поддвигающейся плиты равна 50 км [59]. По геодезическим данным, скорость движения плиты равна 8–10 см в год. В таком случае под КГВ ежегодно погружается часть плиты объемом примерно  $0.5 \text{ км}^3$  весом  $1.5 \times 10^9 \text{ т}$ . По данным раздела 2 и рис. 18, средний годовой расход наиболее мощного вулкана КГВ, Ключевского, равен  $60 \times 10^6 \text{ т/г}$ , а всей КГВ в очень активный период 1930–2008 гг. был равен  $155 \times 10^6 \text{ т/г}$ . Таким образом, вес изверженных пород КГВ составляет от 4 до 10% веса пород погружающейся плиты. Для верхней границы плиты эта доля может быть больше в несколько раз.

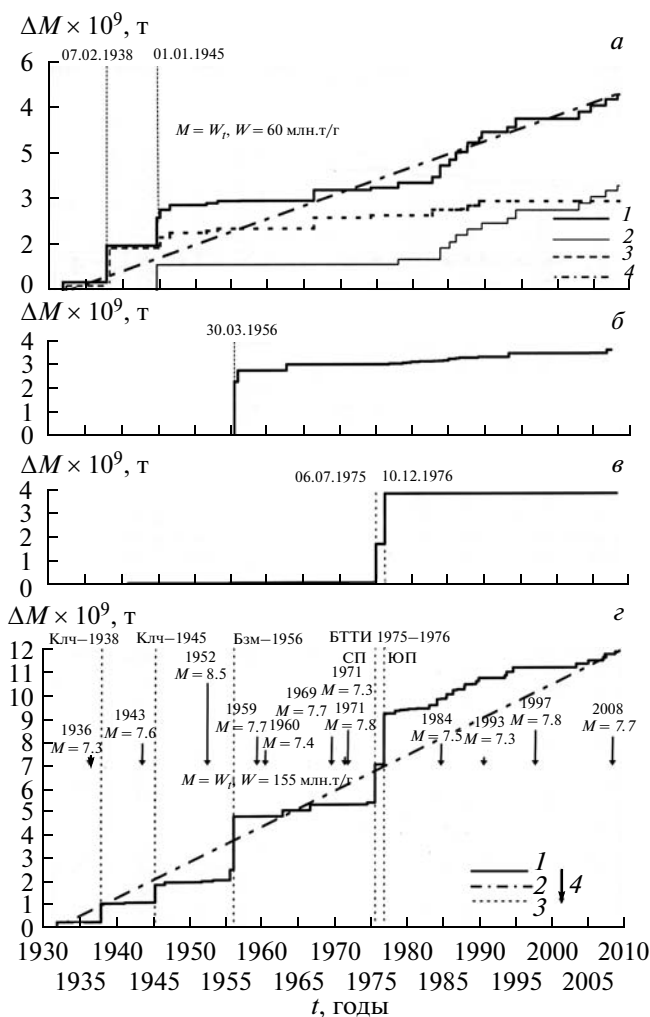
Площадь сейсмофокальной зоны, находящаяся под КГВ, в 10 тыс. раз больше площади кратеров активных вулканов КГВ. При подъеме магм в астеносфере и литосфере происходит огромная концентрация вещества и энергии. Этот процесс может начинаться от верхней границы сейсмофокального слоя.

**Астеносфера, область образования и подъема магм к промежуточным магматическим очагам КГВ, глубины 160–40 км.** По геофизическим и геохимическим данным, частичное плавление вещества мантии и образование глубинных магм под КГВ происходят в нижней части астеносферы. Плавление возрастает при поступлении летучих из погружающейся плиты и из-за декомпрессии, происходящей при подъеме плавящегося вещества. Главной силой, вызывающей подъем магм, является уменьшение плотности пород при их плавлении. Подъем магм в астеносфере может происходить путем гравитационной конвекции в диапирах, астенолитах, магматических астеносферных колоннах и струях. Наиболее быстрый подъем может происходить в протяженных астеносферных магматических колоннах. Ведутся расчеты их размеров, скоростей и расхода магмы в них [56 и др.].

Подъем магм по вертикальному цилиндрическому каналу в силъновязкой вмещающей среде может происходить также в солитонах [22]. Подъем магм по тонким вертикальным трещинам мало вероятен выше зоны первичного плавления из-за быстрого застывания таких трещин.

Данные сейсмотомографии показывают, что в районе КГВ имеется область пониженных скоростей поперечных волн, которая протягивается вверх от сейсмофокальной зоны к земной коре, раздел 3, рис. 16б.

Величина избыточного магматического давления зависит от разности плотностей магм и окружающих пород и от вертикальной протяженности магматических каналов. Разница плотностей кристаллических пород и их расплавов близка к  $0.1 \text{ г/см}^3$  при плавлении половины вещества пород [80 и др.]. При такой малой разности плотностей избыточное



**Рис. 18.** Увеличение суммарного веса ювенильных изверженных продуктов всей КГВ и ее главных действующих вулканов, Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик. а – графики для вулкана Ключевской: 1 – расход всех извержений вулкана, 2 – расход побочных извержений, 3 – расход вершинных извержений, 4 – средний график для всех извержений; б – график для вулкана Безымянный; в – график для вулкана Плоский Толбачик и Толбачинской зоны шлаковых конусов; г – график для всей КГВ: 1 – суммарный график, 2 – его средняя линия, 3 – даты наиболее крупных извержений, 4 – годы и магнитуда камчатских землетрясений с  $M \geq 7.3$  в 1930–2008 гг. (карта на рис.4).

магматическое давление  $\Delta P$  в верхней части астеносферного канала будет превышать 300 бар, если его высота более 30 км. Такие оценки показывают минимальные значения  $\Delta P$  под подошвой земной коры при подъеме ультраосновных магм. В тех случаях, когда основание астеносферной магматической колонны находится на глубине 150 км или в них поднимаются базальтовые или андезитовые магмы и разность плотностей магм и окружающих пород  $\Delta \rho$  около  $0.5 \text{ г/см}^3$ , то избыточное давление глубинных магм на подошве земной коры равно 1000–2000 бар

**Таблица.** Камчатские землетрясения 1930–2008 гг. с  $M \geq 7.3$ 

Дата: год, мес., число	Время: ч, мин	Сев. широта, град	Вос. долгота, град	Глубина, км	Магнитуда $M$
1936.11.13	12 31	56.2	163.3	10–40	7.3
1943.11.28	17 11	54.9	156.8	350	7.6
1952.11.04	16 58	52.3	161.0	10–40	8.5
1959.05.04	07 15	53.1	160.3	20	7.7
1960.10.28	13 18	51.8	157.8	110	7.4
1969. 11.22	23 09	57.8	163.6	20	7.7
1971.11.24	19 35	52.7	159.5	125	7.3
1971.12.15	08 30	55.9	163.4	30	7.8
1984. 2.28	10 38	56.2	163.4	19	7.5
1993.06.08	13 03	51.2	157.8	40	7.3
1997.12.05	11 35	54.6	162.5	10	7.8
2008.07.05	02 12	54.1	152.2	650	7.7

Примечание. Карта эпицентров на рис. 4.

[56]. Базальтовые и андезитовые магмы должны быстро выжиматься из-под земной коры. Вероятно, что избыточное давление глубинных магм на подошве земной коры часто находится в интервале 500–1500 бар.

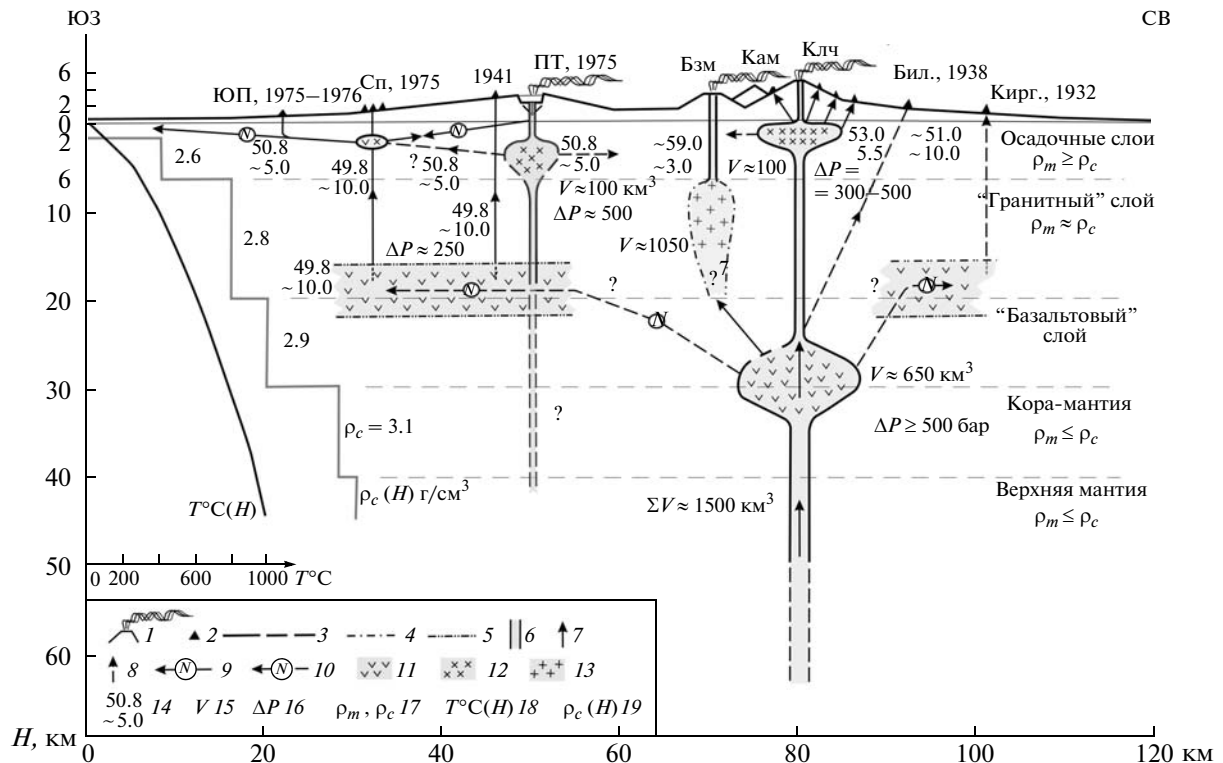
Приближенные оценки величины избыточного магматического давления показывают, что при средней плотности магмы, равной  $2.85 \text{ г/см}^3$ , основание непрерывного магматического канала, протягивающегося из астеносферы до кратера Ключевского вулкана, должно быть на глубине около 60 км [62 и др.]. Главный мантийный магмовод КГВ в наше время находится под Ключевским вулканом, возраст которого около 6000 лет. По нему поступают более 3/4 мантийных магм КГВ. В плейстоцене другой мантийный магмовод должен был существовать под огромным Ушковским вулканом, затихающим в голоцене. Второй действующий вулкан гавайского типа, Плоский Толбачик, вместе с его Толбачинской зоной шлаковых конусов (Введение и раздел 1.2) в голоцене по своей продуктивности является вторым в КГВ после Ключевского вулкана. По данным [6, 19] в голоцене здесь извергаются в среднем  $20 \times 10^6 \text{ т/г}$  базальтов. Свой мантийный магмовод мог бы быть под Плоским Толбачиком, но нет определенных геофизических данных о его существовании в наше время.

**Коромантийные слои и нижняя кора, промежуточный магматический очаг, глубины 40–25 км.** По данным о глубинном строении КГВ [2, 3 и др.], средняя глубина нижней границы коромантийного слоя под КГВ равна 40 км, кристаллическая часть земной коры находится на глубинах 25–7 км, а осадочные слои земной коры лежат выше 7–5 км. Характер магматической деятельности под КГВ меняется над этой границей. Под ней, в верхней мантии, происходят начальное плавление и подъем магм. Выше нее происходят накопление магм, образование про-

межуточного магматического очага КГВ, магмоводов, коровых магматических очагов ее отдельных вулканов и питающих каналов извержений.

Схема строения и геофизическая модель верхних частей магматической питающей системы КГВ, находящихся над мантией, приведены на вертикальном разрезе, проходящем вдоль осевой линии КГВ через действующие вулканы Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик, рис. 19. На нем показаны свойства среды под КГВ: средние глубины коромантийного, “базальтового”, “гранитного” и осадочного слоев, изменение с глубиной температуры и плотности пород, а также рельеф земной поверхности вдоль профиля. Нанесены положение и размеры магматических очагов вулканов и их вертикальные каналы, области накопления магнезиальных базальтов, питающие каналы побочных и ареальных извержений, наблюдавшиеся и предполагаемые пути перемещений магм вдоль КГВ по слоям нейтральной плавучести. Рис. 19 поясняет, каким образом могут быть связаны между собой магматические очаги КГВ. Указаны приблизительные объемы магматических очагов, избыточное давление магмы в них, а также содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}\%$  в разных местах магматической питающей системы КГВ. Далее рассматривается ряд свойств модели.

В коромантийном слое плотность пород уменьшается с  $3.2\text{--}3.3 \text{ г/см}^3$  в верхней мантии до  $2.9\text{--}3.1 \text{ г/см}^3$  в этом слое [2, 53]. При этом избыточное давление ультраосновных и основных магм, поднимающихся из мантии, становится максимальным, и существуют наиболее благоприятные условия для накопления этих магм и их внедрения в окружающие породы по слоям нейтральной плавучести. В таких слоях плотность магмы равна плотности окружающих пород [77]. Из-за того, что температура среды здесь равна 500–800°C, возможны



**Рис. 19.** Магматическая питающая система КГВ: современное строение, перемещение и накопление магм. Геофизическая модель. Вертикальный разрез вдоль осевой линии КГВ. 1 – действующие вулканы; 2 – конуса моногенных извержений 1930–2008 гг.; 3 – границы базальтовых магматических очагов; 4 – граница возможного источника андезитовых магм вулкана Безымянный; 5 – возможные границы областей накопления и перемещения магнезиальных базальтов; 6 – вертикальные магматические каналы; 7 – наблюдавшиеся места подъема магм; 8 – возможные линии подъема магм; 9 – наблюдавшиеся перемещения магмы в слоях нейтральной плавучести; 10 – возможные перемещения магм в слоях нейтральной плавучести; 11 – магнезиальные базальты; 12 – глиноземистые базальты; 13 – андезиты; 14 – содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  в магмах, %; 15 – объем магматических очагов,  $\text{км}^3$ ; 16 – избыточное магматическое давление, бар; 17 – плотности магм и пород,  $\rho_m$  и  $\rho_c$ ,  $\text{г/см}^3$ ; 18 – изменение температуры среды с глубиной,  $T^{\circ}\text{C}(H)$  км; 19 – изменение плотности пород с глубиной,  $\rho_c(H)$   $\text{г/см}^3$ . Положение действующих вулканов КГВ, ареального извержения Киргурич, 1932 г., побочного извержения Билукай, 1938 г., Северного и Южного прорывов БТТИ, 1975–1976 гг., показаны на рис. 1, 2 и 13.

только пластические или упругопластические деформации [53, 62 и др.].

По сейсмологическим и геодезическим данным, разделы 1.3 и 2, промежуточный магматический очаг Ключевского вулкана или область накопления мантийных магм под ним находится на глубинах 35–25 км. Его положение показывают рои слабых землетрясений, среди которых много слабых длиннопериодных землетрясений, характерных для корней вулканов, рис. 12. Давно предполагалось, в коромантийном слое может происходить дегидратация [2 и др.]. Этот промежуточный очаг является источником базальтов вершинных и побочных извержений Ключевского вулкана. Отсюда могут внедряться интрузии ультраосновных и основных магм, движущиеся под КГВ по слоям нейтральной плавучести вдоль основания коры на глубинах 20–30 км. При этом могут образовываться различные пластовые магматические тела.

Делались оценки объема этого очага по количеству продуктов крупных извержений Ключевского

вулкана и уменьшению давления в очаге после них [53 и др.]. В 1938 г. при побочном извержении Билукай было излито  $310 \times 10^6 \text{ м}^3$  высокомагнезиальных базальтов, [60, 68 и др.], рис. 13. При больших вершинных извержениях вулкана его дно опускалось на 600 м, при этом давление магм в его очаге снижалось на 150 бар. Во время БТТИ магматическое давление уменьшилось на 100–250 бар [6]. Если при извержении в 1938 г. произошло снижение магматического давления на  $\Delta P = 150$  бар, а модуль всестороннего сжатия магм, как в случае БТТИ [51] равен  $K = 3 \times 10^5$  бар, то объем магм в промежуточном очаге Ключевского вулкана мог быть равен  $650 \text{ км}^3$  (380 и  $940 \text{ км}^3$  при снижении давления на 100 и 250 бар). Положение очага показано на рис.19, на котором приведена схема расположения магматических очагов КГВ на глубинах до 60 км вдоль осевой линии КГВ.

Следует дать краткие пояснения к используемому способу приближенной оценки объемов магматических очагов и источников магм вулканов. Спо-

соб рассматривался в работах [51, 54]. Искомый объем находится по соотношению

$$\Delta P = -K(\Delta B + D)/B, \quad (8)$$

где  $\Delta P$  – уменьшение магматического давления при извержении,  $K$  – модуль всестороннего сжатия магмы (его обратная величина – коэффициент всестороннего сжатия  $1/K = \beta$ ),  $\Delta B$  – объем изверженных магм,  $D$  – объем интрузий, образовавшихся при извержении,  $B$  – искомый объем магматического источника [51]. При подборе величины  $\beta$  надо учитывать, что сжимаемость магм уменьшается с ростом глубины очага и давления среды, но повышается в 5 раз в интервале плавления магм [27, 80]. В соотношении (8) не учитывается накопление магм за счет сжатия пород, окружающих очаги, и оно дает верхние оценки объема очагов. Объем источника магм меньше значения, полученного по соотношению (8), на 0.2 этого значения для сферических очагов, на 0.3 для цилиндрических очагов, на 0.4 для линз с отношением их толщины к длине 1/10. Соотношение (8) не может применяться для оценки объема магм, находящихся в дайках [54].

По сейсмологическим данным, раздел 1.3, поступление мантийных магм в промежуточный очаг Ключевского вулкана происходит неравномерно. Судя по роям землетрясений в нем, в различные периоды оно длится от 1/4 до 3/4 времени.

Коромантийный слой является главным местом накопления мантийных магм в КГВ. По геодезическим оценкам (раздел 2) и расчетам объема магм в магматических источниках извержений (данный раздел), здесь находится более 4/5 магм КГВ и может происходить основная интрузивная деятельность.

**Магматические очаги и каналы, перемещение магм в земной коре под КГВ. Глубины 25–5 км, 5–0 км и постройки вулканов.** В данном разделе свойства этих двух верхних частей магматических питающих систем рассматриваются совместно. В начале приведем краткие сведения о коровых магматических очагах и каналах действующих вулканов КГВ.

Свойства этих двух частей магматической питающей системы Ключевского вулкана приведены в [60, 62 и др.]. На глубинах 25–5 км находится непрерывный вертикальный магматический канал, по которому магма поднимается из промежуточного очага на глубины 5 и менее км в осадочные слои, подстилающие вулкан, и в его постройку, рис. 19. Здесь находится верхняя область накопления магм, периферический очаг, источник базальтовых магм вершинных и побочных извержений Ключевского вулкана. Избыточное магматическое давление может достигать 500 бар и снижаться на 100 и более бар при больших извержениях. Образуется большое количество радиальных даек, питающих побочные извержения на расстояниях до 20 км от вершины вулкана [53].

Верхняя оценка объема периферического очага Ключевского вулкана была получена по количеству лав самого большого побочного извержения высокоглиноземистых базальтов на нем. Это был прорыв

Пийпа, начавшийся 06.10.1966 г. в средней части конуса вулкана на высоте 2000 м и расстоянии 6 км от его вершины. За три месяца было излито  $90 \times 10^6 \text{ м}^3$  высокоглиноземистых базальтов, которые накапливаются в верхней части магматической питающей системы Ключевского вулкана [32, 60, 68]. Сжимаемость магм здесь увеличивается из-за снижения всестороннего давления при уменьшении глубины. При  $\Delta P = 150$  бар и  $\beta = 6 \times 10^{-6} \text{ бар}^{-1}$  получается, что объем периферического очага  $B \leq 100 \text{ км}^3$ , рис. 19.

По геодезическим и сейсмологическим данным, разделы 1, 2 и др., подъем магм из промежуточного в периферический очаги начинается за несколько месяцев до вершинных извержений.

При сейсмическом просвечивании КГВ [2, 3 и др.] было найдено, что коровый магматический очаг андезитового вулкана Безымянный может находиться на глубинах от 5–10 до 20 км под вулканом, рис. 19. Подтверждением служит то, что под этим вулканом наблюдается скопление очагов слабых землетрясений, прослеживающееся до глубин 15 км, рис. 12. 30 марта 1956 г. произошло катастрофическое извержение вулкана Безымянный, при котором после взрыва из образовавшегося кратера излились свежие пирокластические андезитовые потоки объемом  $1 \text{ км}^3$  плотностью  $2 \text{ г/см}^3$  [17]. Глубина нового кратера равнялась 600–700 м, и давление в источнике магм уменьшилось на 150 бар. Центр магматического очага вулкана Безымянный находится на 10–15 км выше промежуточного очага Ключевского вулкана, и коэффициент сжимаемости магм в нем больше. Если  $\beta = 5 \times 10^{-6} \text{ бар}^{-1}$  или  $K = 2 \times 10^5 \text{ бар}$ , то объем источника магм катастрофического извержения вулкана Безымянный мог достигать  $1050 \text{ км}^3$ , рис. 19.

На вершине базальтового вулкана Плоский Толбачик находится кальдера гавайского типа диаметром 3 км. Кровля магматического очага под ней находится на глубине 2 км, поперечник очага 4–5 км, рис. 8 и 19. Очаг содержит мегаплагиофировые глиноземистые базальты, раздел 1.2. До БТТИ в вершинной кальдере вулкана был провальный кратер глубиной 100–200 м, на дне которого появлялось лавовое озеро. В такие годы магматическая питающая система вулкана находилась в стационарном состоянии. Оценка величины избыточного магматического давления в ней была сделана для плотностного разреза земной коры под КГВ из [2]. Если плотность магм мегаплагиофировых глиноземистых базальтов  $2.65 \text{ г/см}^3$ , то их источник под вулканом Плоский Толбачик находится глубже 23 км, а наибольшее избыточное давление 300–500 бар существует у подошвы осадочного слоя на глубине около 7 км, рис. 19.

Магнезиальные базальты являются по своему составу наиболее основными породами КГВ. Их новое извержение произошло в 1975 г. в Северном прорыве Большого трещинного Толбачинского извержения в Толбачинской зоне шлаковых конусов в

18 км к юго-западу от вершинной кальдеры Плоского Толбачика [6]. По сейсмологическим и геодезическим данным, раздел 1.2, их источник находился на глубине 16–22 км под Северным прорывом, рис. 6, 7 и 19. Избыточное давление магмы у земной поверхности было равно 100–250 бар [67]. Предыдущий прорыв высокомагнезиальных базальтов произошел в этой зоне шлаковых конусов 05–14 мая 1941 г. в 4 км от вершинной кальдеры, рис. 19. Менее 2000 лет назад извержение высокомагнезиальных базальтов было в этой же зоне в 27 км от вершинной кальдеры [6, 19]. При этих извержениях проявился протяженный источник или участок магмовода магнезиальных базальтов КГВ, находящийся в нижней половине коры под юго-западным краем осевой линии КГВ, рис. 19.

По геофизическим данным [6] было определено положение очага на глубине 2–4 км под Северным прорывом БТТИ, возникшего в начале извержения. В нем могло происходить смешение магнезиальных и мегаплагиофировых глиноземистых базальтов во время БТТИ, рис. 19.

Магмы поступают в периферические очаги и к кратерам действующих вулканов центрального типа по протяженным вертикальным каналам, а к местам образования сотен моногенных конусов, побочных извержений и экструзий КГВ – по питающим трещинам, застывающим после извержений [56 и др.]. Под Ключевским вулканом объем сотен радиальных даек длиной до 20 км может быть равен объему его постройки [53 и др.]. Положение даек его побочных извержений схематически показано на рис. 19.

Во время БТТИ в течение полутора лет происходило быстрое внедрение, смешение и течение базальтов на глубинах несколько километров на протяжении 50 км вдоль Толбачинской зоны конусов, раздел 1.2, рис. 8–10 и 19. Такое перемещение магм было сходным с движением базальтов в зонах нейтральной плавучести вдоль вулканических рифтов Исландии и других областей [77 и др.].

По уменьшению давления магм во время БТТИ, 100–250 бар, массе изверженных базальтов,  $3.8 \times 10^9$  т, и модулю сжимаемости магм  $K = 10^5$  бар было приближенно определено, что объем той части магматической питающей системы, из которой вытекали магмы при БТТИ, мог быть равен  $(1.6–4.0) \times 10^3$  км<sup>3</sup> [51].

Общий объем магматических очагов действующих вулканов Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик, показанных на рис. 19, меньше  $1.9 \times 10^3$  км<sup>3</sup>. По этим приближенным оценкам, сравнимые по величине объемы магм КГВ могут находиться в магматическом очаге затухающего вулкана Ушковский, в мощных интрузиях под всей КГВ и в магмоводах под ее осевой линией. Вероятно, что мантийные магмы внедряются и накапливаются, главным образом, у основания земной коры.

Эти оценки согласуются с определениями отношения объемов источников давления в области периферического и промежуточного очагов Ключевского вулкана, полученным при геодезических исследованиях. По геодезическим данным размеры интрузивной деятельности под Ключевским вулканом на глубинах 25 км в 6 раз больше, чем на глубинах около 3 км, раздел 2.

Во время крупнейшего базальтового извержения, БТТИ, в 1975–1976 и последующих 1977–1978 гг. проявилась связь магматических очагов и источников по всей площади КГВ, раздел 1.2 и [6].

Далее называется ряд сведений, полученных при исследованиях петрологии и построении петролого-геохимических моделей КГВ, которые могут помочь объяснить такую связь.

Извержения наиболее основных по составу пород КГВ, магнезиальных базальтов, происходят в КГВ только в Толбачинской зоне конусов на протяжении 30 км от вершинной кальдеры Плоского Толбачика и в ареальной зоне конусов в 10–20 км к северо-востоку от кратера Ключевского вулкана [10 и др.]. Эти места лежат по краям осевой линии КГВ, проходящей через вулканы Ключевской, Безымянный и Плоский Толбачик по простиранию вулканического пояса Камчатки, рис. 1. Слой нейтральной плавучести магнезиальных базальтов, по которому может происходить их перемещение в базальтовом слое земной коры под КГВ, должен протягиваться вдоль осевой линии КГВ, рис. 19.

Базальтовые магмы Ключевского вулкана и андезитовые магмы вулкана Безымянный имеют единый глубинный источник, их магмоподводящие каналы разветвляются на глубине около 30 км. Это подтверждается тем, что во время активизации соседних вулканов Ключевской и Безымянный на другом из них наблюдается затишье [32 и др.].

Вполне вероятно генетическая связь магм вулканов Ключевской, Безымянный и Камень. Действующие вулканы Ключевской и Безымянный образовались в голоцене по краям потухшего верхнеплейстоценового вулкана Камень. Эти три вулкана располагаются в ряд длиной 10 км вдоль осевой линии КГВ, рис. 1. Вулкан Ушковский, слабо действующий в наше время, имеет другой мантийный источник [70]. Такие выводы петрологических исследований подтверждаются данными о размещении гипоцентров землетрясений под КГВ, раздел 1.3 и др., и согласуются с геофизической моделью, рис. 19. Модель поясняет положение, значение и связи магматических очагов названных трех вулканов во всей магматической питающей системе КГВ.

Высокомагнезиальные и высокоглиноземистые магмы Ключевского вулкана формируются при подъеме и дифференциации мантийных магм в каналах и очагах магматической питающей системы КГВ, находящихся под вулканом в астеносфере, переходном слое и земной коре [32, 69 и др.]. По сей-

смологическим и геодезическим данным, разделы 1 и 2, в 1978–2008 гг. интервалы времени, в течение которых происходил подъем магм из промежуточного очага Ключевского вулкана в его периферический очаг, длились менее 1/3 всего этого периода. Преобладали интервалы времени, в которых были благоприятные условия для дифференциации магм.

В магматической питающей системе КГВ формируются магмы магнезиальных глиноземистых базальтов и андезитов (Введение и др.). Извержения глиноземистых базальтов происходят по всей площади КГВ, а извержения андезитов – в ее средней части (Введение, рис. 3, 19). Согласно свойствам геофизической модели, перемещение глиноземистых базальтов под всей КГВ может происходить в интрузиях вдоль слоя нейтральной плавучести этих базальтов, находящегося в осадочной толще коры. В таком случае сосредоточение андезитов в средней части КГВ может быть следствием увеличения в ней мощности вулканогенно-осадочной толщи. Подобное распределение изверженных пород разного состава существует во многих вулканических центрах. Дальнейшее рассмотрение построенной геофизической модели магматической питающей системы КГВ может быть дано в последующих работах.

В данной работе и ее разделе 4 были рассмотрены и объяснены многие свойства современной магматической питающей системы КГВ. Надо учитывать, что в верхнем плейстоцене действовали другие вулканы КГВ, и строение магматической питающей системы КГВ было существенно иным.

Необходимо отметить, что в настоящее время могут рассчитываться многие свойства предложенной модели: параметры и свойства даек, силлов, цилиндрических каналов, сферических и линзовидных магматических очагов, механизма различных извержений и магматических питающих систем вулканов [56]. Теория механизма вулканической деятельности применяется при изучении различных свойств КГВ, ее вулканов и извержений. Геофизические данные помогают при постановке и интерпретации результатов петролого-геохимических и других исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение корней, магматических питающих систем вулканов, выяснение природы и механизма вулканической деятельности является одной из главных проблем вулканологии. Исследования ведутся методами вулканологии, геологии, геофизики, геохимии и связанных наук. Ключевская группа вулканов, КГВ, наиболее мощный вулканический центр на островных дугах, является одним из самых важных объектов таких исследований в нашей стране и мире. Исследования ведутся здесь с начала 1930-х годов. В работе дан их краткий обзор, рассмотрены и объяснены свойства магматической питающей системы КГВ и обсуждается ее геофизическая модель, основанная на результатах изучения

извержений, сейсмичности, деформаций и механизма вулканической деятельности. Назовем ряд самых общих выводов.

1. К 1960-м годам было получено общее представление об источниках магм КГВ по геологическим и петрографическим данным. Полагалось, что под КГВ имеется большой базальтовый магматический очаг, выше которого в земной коре находятся очаги отдельных вулканов (Введение).

2. Большое усиление геофизических и других исследований произошло после того, как Г.С. Горшков в 1956 г. по сейсмологическим данным обнаружил мантийный магматический очаг под Ключевским вулканом. В течение полувека выполнены многие сотни исследований извержений, землетрясений, деформаций, глубинного строения, механизма вулканической деятельности, петрологии, геохимии и других. Среди них было комплексное изучение Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. Представления о росте знаний за полвека и их современном уровне дают изложенные результаты и геофизическая модель магматической питающей системы КГВ, рассматриваемые в этой работе (разделы 1–4), а также петролого-геохимические и иные модели КГВ.

3. Предстоят дальнейшие многолетние всесторонние исследования. Необходимо продолжать ведущиеся и начинать новые наблюдения и работы. Среди них должны быть всестороннее изучение извержений, сейсмичности, высокоточные измерения деформаций всех действующих вулканов КГВ, детальное изучение глубинного строения КГВ и ее магматических очагов, исследования механизма вулканической деятельности, петрологии, геохимии. Долгий опыт исследований, о котором сообщается в данной работе, может помочь при выборе следующих задач.

Глубокая благодарность сотням участников 80-летних успешных исследований и пожелания превосходных успехов тем, кто будет продолжать их в XXI в.!

Работа посвящается знаменитому вулканологу Г.С. Горшкову, вулканологам и петрологам А.Н. Сирину и К.М. Тимербаевой, сейсмологу П.И. Токареву, превосходным исследователям КГВ, друзьям и коллегам С.А. Федотова с 1950-х годов, чьи основополагающие книги об извержениях, сейсмичности и петрологии КГВ вышли подряд в 1965, 1966, 1967 и 1968 гг. [17, 42–44].

Введение, разделы 1, 4 и Заключение написаны С.А. Федотовым, раздел 2 – Н.А. Жариновым и С.А. Федотовым, раздел 3 – Л.И. Гонтовой и С.А. Федотовым.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы 16 фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 2.7, и проекта РФФИ № 08-05-00453а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Зыков Ю.Н., Федотов С.А. Механизм разрушения вулканической постройки вследствие потери устойчивости и оценка размеров возможного обрушения Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1994. № 6. С. 81–95.
2. Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 123 с.
3. Балеста С.Т. Земная кора и магматические очаги областей современного вулканизма. М.: Наука, 1981. 133 с.
4. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев В.А. и др. Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3–18.
5. Балеста С.Т., Утнасин В.К., Аносов Г.И. Строение земной коры под вулканами в различных геоструктурных зонах по геофизическим данным // Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 76–81.
6. Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.
7. Влодавец В.И. Ключевская группа вулканов // Тр. Камчатской вулканол. станции. Вып. 1. Изд. АН СССР, 1940. С. 86–98.
8. Влодавец В.И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 340 с.
9. Влодавец В.И., Набоко С.И., Федотов С.А. К 50-летию советской вулканологии // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 3–15.
10. Вольнец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Ягодзински Дж. М. Харчинский и Заречный вулканы – уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: структурная приуроченность, возраст и геологическое строение // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 5–18.
11. Вулканизм и глубинное строение Земли // Труды Второго Всесоюзного вулканологического совещания, 3–17 сент. 1964 г. Т. III // Отв. ред. В.И. Влодавец, С.А. Федотов. М.: Наука, 1966. 120 с.
12. Вулканизм и геодинамика / Отв. ред. Г.П. Авдейко, С.А. Федотов. М.: Наука, 1977. 262 с.
13. Геодинамика, магмообразование и вулканизм / Отв. ред. М.М. Василевский, Ю.П. Масуренков, Г.М. Фремд. Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии ДВНЦ АН СССР, 1974. 288 с.
14. Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сеньюков С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.
15. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Сторчеус А.В. Глубокие вулканические процессы под Ключевским вулканом по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 21–34.
16. Горшков Г.С. О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703–705.
17. Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955–1956 гг.). М.: Наука, 1965. 165 с.
18. Гуценко И.И. Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 475 с.
19. Действующие вулканы Камчатки. Т. 1 / Отв. ред. С.А. Федотов и Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. 309 с. (На русском и английском).
20. Ефимов А.Б., Демин С.С. Исследование напряженно-деформированного состояния вблизи магматического очага // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 16–27.
21. Ефимов А.Б., Ершова Т.Я., Федотов С.А. О прорывах магмой питающего канала, образовании даек и других пластовых интрузий под Ключевским вулканом // Вулканология и сейсмология. 1996. № 1. С. 3–23.
22. Жаринов С.Е. Периодические волны в вязкодеформируемом магматическом канале // Вулканология и сейсмология. 1990. № 3. С. 72–81.
23. Жаринов Н.А., Энман В.Б., Скуридин Ю.Ф. и др. Об изучении деформаций земной поверхности на Ключевском вулкане (1978–1982 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 67–75.
24. Заварицкий А.Н. Северная группа вулканов Камчатки // Тр. СОПС. Сер. Камчатская. № 1. 1935. 55 с.
25. Заварицкий А.Н. Вулканическая зона Курильских островов // Вестник АН СССР. 1946. № 1. С. 47–60.
26. Иванов Б.В. Некоторые особенности Ключевской группы вулканов в связи с ее глубинным строением // Вулканизм и геодинамика / Отв. ред. Г.П. Авдейко, С.А. Федотов. М.: Наука, 1978. С. 35–43.
27. Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И. Физические свойства магматических расплавов. М.: Наука, 1979. 200 с.
28. Луцицкий И.В. Основы палеовулканологии. Т. 1. Современные вулканы. М.: Наука, 1971. 490 с.
29. Луцицкий И.В. Основы палеовулканологии. Т. 2. Гл. 1. Корни вулканов. М.: Наука, 1971. С. 5–77.
30. Мелекесцев И.В., Хренов А.П., Кожемяка Н.Н. Тектоническое положение и общий очерк вулканов Северной группы и Срединного хребта // Действующие вулканы Камчатки / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. Т. 1. М.: Наука, 1991. С. 74–81. (На русском и английском).
31. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М.: Наука, 1977. С. 536.
32. Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл. Ф., Богоявленская Г.Е. Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. 1997. № 6. С. 614–635.
33. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1945–1946 гг. и в прошлом // Тр. Лаб. вулканологии. 1956. Вып. 11. 308 с.
34. Проблемы геотомографии / Отв. ред. А.В. Николаев и др. М.: Наука, 1997. 336 с.
35. Ритман А. Вулканы и их деятельность. М.: Мир, 1964. 437 с. (Перевод с нем. книги Rittman A. Vulcane und Ihre Tatigkeit. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1960).
36. Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Кам-

- чатке / Отв. ред. С.А. Федотов. Новосибирск: Наука, 1974. 220 с.
37. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике. Пер. с англ. / Под ред. Г. Нолета. М.: Мир, 1990. 416 с.
  38. *Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.
  39. *Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский, 2009. 191 с.
  40. *Сенюков С.Л., Дроздина С.Я., Нурждина И.Н. и др.* Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 50–59.
  41. *Славина Л.Б., Федотов С.А.* Скорости продольных волн в верхней мантии под Камчаткой // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. М.: Наука, 1974. С. 188–200.
  42. *Сирин А.Н.* О соотношении центрального и ареального вулканизма. М.: Наука, 1968. 196 с.
  43. *Тимербаева К.М.* Петрология Ключевских вулканов на Камчатке. М.: Наука, 1967. 208 с.
  44. *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы (1949–1963 гг.). М.: Наука, 1966. 116 с.
  45. *Токарев П.И.* О фокальном слое, сейсмичности и вулканизме Курило-Камчатской зоны // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1970. № 3. С. 15–30.
  46. *Токарев П.И., Федотов С.А., Степанов В.В.* Прогноз начала и развития извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. Гл. XI. С. 373–388.
  47. *Фарберов А.И.* Магматические очаги Восточной Камчатки по сейсмологическим данным. Новосибирск: Наука, 1974. 88 с.
  48. *Фарберов А.И.* Магматические очаги, корни вулканов и геофизические поля // Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский: Ин-т вулканологии ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 60–75.
  49. *Фарберов А.И., Левыкин А.И., Ермаков В.А., Балеста С.Т.* Состав и состояние вещества земной коры в районе Ключевской группы вулканов // Вулканизм и геодинамика / Отв. ред. Г.П. Авдейко, С.А. Федотов. М.: Наука, 1977. С. 122–136.
  50. *Федотов С.А.* Глубинное строение, свойства верхней мантии и вулканическая деятельность Курило-Камчатской дуги по сейсмологическим данным на 1964 год // Вулканизм и глубинное строение Земли // Тр. Второго Всесоюз. вулканологического совещания, 3–17 сентября 1964 г. Т. III / Отв. ред. В.И. Влодавцев, С.А. Федотов. М.: Наука, 1966. С. 8–24.
  51. *Федотов С.А.* Большие трещинные извержения, их теория. Механизм Толбачинского извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. Гл. XVI. С. 537–575.
  52. *Федотов С.А.* О механизме вулканической деятельности на Камчатке, Курило-Камчатской дуге и в сходных структурах // Действующие вулканы Камчатки / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. Т. 1. Гл. 1. С. 18–35. (На русском и английском).
  53. *Федотов С.А.* Магматическая питающая система и механизм деятельности Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 23–45.
  54. *Федотов С.А.* Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3–37.
  55. *Федотов С.А.* К 40-летию детальных сейсмологических исследований на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 3. С. 73–79.
  56. *Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
  57. *Федотов С.А.* К 50-летию детальных сейсмологических исследований на Курило-Камчатской дуге // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 153–160.
  58. *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. / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. Гл. XXII. С. 389–447.
  59. *Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В. и др.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91–107.
  60. *Федотов С.А., Жаринов Н.А.* Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3–31. (Engl. transl.: J. of Volcanol. and Seismol. 2007. V. 1. № 2. P. 71–97.).
  61. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* О деятельности, магматической питающей системе и глубинном строении Ключевской группы вулканов // Вулканизм и геодинамика: Матер. IV Всерос. симпозиума по вулканологии и палеовулканологии (22–27 сентября 2009 г. Петропавловск-Камчатский.) Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 24–27.
  62. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И., Собищев А.Л.* Вулкан Ключевской (Камчатка): деятельность, магматическая питающая система, сейсмотомография // Изменение окружающей среды и климата, природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 2. Новейший вулканизм Северной Евразии: закономерности развития, вулканическая опасность, связь с глубинными процессами и изменениями природной среды и климата. М.: ИГЕМ РАН, 2008. С. 273–294.
  63. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 4–42. (Engl. transl.: Volcanol. and Seismol. 1990. № 2. P. 165–225.).

64. Федотов С.А., Славина Л.Б. Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана Камчаткой // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. С. 8–32.
65. Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И. Оценка размеров коровых очагов вулканов и изменения их размеров во времени по данным о количестве, составе изверженных пород и глубине очага // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 3–14. (Engl. transl.: *Volcanol. And Seismol.* 2000. V. 22. № 3. P. 239–258.).
66. Федотов С.А., Хренов А.П., Жаринов Н.А. Ключевской вулкан, его деятельность в 1932–1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3–16. (Engl.transl.: *Volcanol. and Seismol.* 1990. V. 9. № 4. P. 501–521.)
67. Федотов С.А., Энман В.Б., Никитенко Ю.П., и др. Геодезические исследования // Большое трещинное Толбачинское извержение, Камчатка, 1975–1976 гг. / Отв.ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. Гл. XIV. С. 472–513.
68. Хренов А.П., Федотов С.А., Жаринов Н.А. и др. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1 / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 106–155. (На русском и английском.)
69. Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В. Магматические очаги под Ключевской группой вулканов // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 32–54.
70. Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Иванов Б.В., Максимов А.П. Петрогенетические особенности пород вулкана Камень (Камчатка) // Магматизм и рудообразование: Матер. конференции, посвященной 125-летию со дня рождения академика А.Н. Заварицкого, 18–19 марта 2009 г. М.: ИГЕМ РАН, 2009. С. 139–143.
71. Fedotov S.A., Gorelchic V.I., Zharinov N.A. Deformation, Earthquakes and Mechanism of Activity of Klyuchevskoy Volcano // IAVCEI Proceedings in Volcanology. V. 3. Berlin-Heidelberg: Springer-Ferlag. 1992. P. 20–44.
72. Gorbatov A., Kostoglodov V., Suarez G., Gordeev E. Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *JGR.* 1997. V. 102. P. 17883–17898.
73. Davaille A., Lees J.M. Thermal modeling of subducted plates : tear and hotspot at the Kamchatka corner// *EPSL.* 2004. V. 226. P. 293–304.
74. Kissling E. Geotomography with Local Earthquake Data // *Reviews of Geophysics.* 1988. V. 26. P. 659–698.
75. Lees J.M. Seismic tomography of magmatic systems // *J. Volcanol. Geothermal. Res.* 2007. 167. 37–56 p.
76. Lees J.M., Symons N., Chubarova O. et al. Tomographic Images of Klyuchevskoy Volcano *P-Wave Velocity* // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region* / J. Eichelberger et al., ed. *Geophysical Monograph* 172. Washington: AGU, 2007. 293–302 p.
77. *Magmatic Systems*/Ed. M.P. Ryan. *International Geophysics Series*, V. 57. Academic Press, 1994. 401 p.
78. Mogi K. Relation between eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them // *Bull. Earth. Res. Inst.* 1958. V. 36. P. 99–134.
79. Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et al. Correlation of Kamchatka Lithosphere Velocity Anomalies With Subduction Processes // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series* 172. P. 97–106.
80. Williams H., McBirney A.R. *Volcanology* San Francisco: Freeman, Cooper & Co, 1979. 397 p.
81. Yokoyama I. A model for the crustal deformation around volcanoes // *J. Phys. Earth.* 1971. V. 19. P. 199–207.

## The Magmatic Feeding System of the Klyuchevskaya Group of Volcanoes Inferred From Data on Its Eruptions, Earthquakes, Deformation, and Deep Structure

S. A. Fedotov<sup>1,2</sup>, N. A. Zharinov<sup>1</sup>, L. I. Gontovaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Physics of Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995, Russia*

The study of magmatic feeding systems of volcanoes (roots of volcanoes) is one of the main tasks facing volcanology. One major object of this research is the Klyuchevskoi group of volcanoes (KGV), Kamchatka, which is the greatest found at island arcs and subduction zones. We summarize the comprehensive research that has been conducted there since 1931. Several conspicuous results derived since the 1960s are reported emerging from the study of magma sources, eruptions, earthquakes, deformation, and deep structure for the KGV. Our discussion of these subjects incorporates the data of physical volcanology relating to the mechanism of volcanic activity and data from petrology on magma generation. The following five parts can be distinguished in the KGV magmatic feeding system and the associated geophysical model: the source of energy and material at the top of the Pacific Benioff zone at a depth of about 160 km, the region of magma ascent in the asthenosphere, the region of magma storage in the crustmantle layer at depths of 40–25 km, magma chambers and channelways in the crust, and bases of volcanic edifices. We discuss and explain the properties of the relationships between these parts, the mechanisms of volcanic activity and of the KGV magmatic feeding system as existing today. There are methods available for calculating magma chambers and conduits, the amount of magma in the system and its other properties.