

Глубинное строение Ключевской группы вулканов и проблема магматических очагов

Проблема магматических очагов — одна из наиболее сложных и фундаментальных проблем таких геологических дисциплин, как петрография, вулканология, магматическая геология, учение об эндогенном рудообразовании и др. Ее сложность обусловлена практической недоступностью объекта для непосредственного изучения. Чрезвычайная важность проблемы очевидна и заставляет кропотливо анализировать все новые факты, способствующие ее решению. Авторы взяли на себя смелость рассмотреть в этом плане некоторые новые, очень сложно и, безусловно, неоднозначно коррелирующиеся геолого-петрографические и геофизические данные. Основанием послужило недавно проведенное в пределах хорошо изученной Ключевской группы вулканов — одного из наиболее грандиозных и активных вулканических районов мира — глубинное сейсмическое зондирование.

Общие сведения о магматических очагах вулканов островных дуг. К настоящему времени в науке сложилось твердое представление о двух типах магматических очагов в пределах островных дуг: 1) основных (первичных, магмогенерирующих источниках) и 2) периферических (вторичных, промежуточных магмоотстойниках). Считается установленным, что первые из них для основных и средних магм находятся в пределах мантии, вторые — на различных уровнях земной коры. То, что существуют магмопроизводящие источники (первичные магматические очаги), ни у кого сомнения не вызывает. Некоторые разногласия имеются лишь в вопросе, на какой глубине, в каких исходных породах и каким образом они формируются.

Со вторичными очагами дело обстоит несколько сложнее. Отдельные исследователи вообще отрицают их существование [6], однако большинство геологов, занимающихся этим вопросом, приводит веские аргументы в пользу наличия вторичных очагов у тех или иных вулканических тел. К такого рода аргументам следует в первую очередь отнести часто описывающиеся в древних вулканических областях вскрытые эрозией субвулканические тела, которые трактуются как раскристаллизованные периферические очаги или корни вулканов [15]. Весьма определенные геологические данные, подтверждающие существование периферических очагов, вытекают из изучения современных и древних кальдер [16], а также из детального геолого-петрографического исследования вулканических построек [27].

Особо ценную информацию в плане решения вопроса о магматических очагах дают материалы геофизического, прежде всего сейсмического изучения современных вулканических аппаратов. Своеобразным толчком, возбудившим широкий интерес геологов и геофизиков к иссле-

дованию «корней» вулканов островных дуг сейсмическими методами, явились известные работы Г. С. Горшкова [6], который, исходя из предположения об экранировании поперечных сейсмических волн жидкими магматическими массами, сделал попытку определения глубины, формы, размеров и упругих характеристик вещества очага Ключевского вулкана. Он пришел к выводу, что очаг имеет вид вытянутой в северо-восточном направлении плоской линзы, залегающей на глубине 50—70 км и имеющей поперечник 25—35 км при средней мощности 10—12 км, а по величине сжимаемости вещества занимает промежуточное положение между типичным твердым телом и жидкостью. Идея об экранировании поперечных сейсмических волн нашла широкий отклик, однако экспериментальный материал, полученный Г. С. Горшковым, юзвляет считать выводы авторов достаточно обоснованными [17]. Вместе с тем возможность существования магматических очагов на глубине 50—60 км была впоследствии подтверждена американскими учеными на примере Гавайских вулканов. С. А. Федотовым и А. И. Фарберовым [28] под Авачинской группой вулканов на Камчатке в интервале глубин 20—80 км был установлен эффект частичного экранирования поперечных сейсмических волн от близких землетрясений, который, по их мнению, обусловлен существованием вертикальной колонны, содержащей около 20 объемн. % расплава и поднимающейся от кровли магнообразующего слоя.

Интересные данные о положении магматических очагов в районе Катмайского вулканического хребта на Аляске были получены С. Куботой и Е. Бергом [30], которые на основании наблюдений характера прохождения упругих волн от местных землетрясений пришли к выводу о наличии в этом районе не менее десяти магматических камер. Размеры последних в плане увеличиваются с глубиной от 5х2 км на уровне 8—10 км от дневной поверхности до 50х20 км при мощности несколько километров на глубине 40—50 км, т. е. в верхней мантии непосредственно ниже подошвы земной коры. Характерно, что неглубокие камеры пространственно связаны с конкретными активными вулканами, чего не отмечается на большей глубине.

Наряду с представлениями о сравнительно неглубоком нахождении источников известково-щелочной магмы в последнее время рядом исследователей, по-видимому, вслед за Х. Куно [31], разрабатывается идея о генетической связи магнообразования с сейсмическими процессами и приуроченности первичных магматических очагов к сейсмофо-кальному слою [14, 18, 23, 24]. Правомерность такой идеи ставится под сомнение Д. Х. Рингвудом в связи с данными физико-химического эксперимента [23, 31], а также Р. И. Родионовой и В. И. Федорченко [22] на основании материалов по изучению ксенолитов в известково-щелочных лавах Курильскоостровноядуги.

За последнее время появляется все больше и больше геофизических данных о наличии под отдельными вулканами, кроме первичных мантийных источников, сравнительно неглубоко залегающих промежуточных (периферических) камер, играющих роль неких «магноотстойников», в которых могут протекать как процессы дифференциации, так и ассимиляции. Об этом свидетельствуют материалы по изучению вулканических дрожаний, современных деформаций земной коры, вариаций магнитного и гравитационного полей в связи с усилением или ослаблением вулканической активности. Согласно этим данным, глубины залегания периферических очагов колеблются от нескольких сотен метров до 10—15 км.

В этом плане большой интерес представляют исследования Г. С. Штейнберга, С. Т. Балесты и др. [5], которые провели комплекс

геофизических работ в пределах Авачинской группы вулканов и пришли к выводу, что под Авачинским вулканом на глубине 1,5–2 км находится периферический очаг, имеющий 4–6 км в поперечнике. У других вулканов этой группы периферические камеры не зафиксированы, в связи с чем предполагается их прямое мантийное питание. К выводам о существовании периферических очагов пришли М. И. Зубин и др. [11], которые провели гравимагнитные исследования на Карымском и ряде вулканов Южной Камчатки и нашли, что под современными конусами на глубинах от 1,5–2 до 7–8 км располагаются промежуточные очаги с диаметром 4,5–7 км.

Таким образом, наличие под отдельными вулканическими аппаратами периферических магматических камер можно считать установленным фактом.

Ключевская группа вулканов и существующие представления о ее корнях. Ключевская группа состоит из слившихся своими основаниями трех действующих (Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик), девяти потухших (Острый Толбачик, Ближний и Дальний Плоские, Средний, Камень, Большая и Малая Удины, Большая и Малая Зимины) стратовулканов и множества мелких, преимущественно моногенных эруптивных аппаратов ареального типа. Она представляет собой один из самых крупных и активных центров вулканизма на земном шаре. Ее массив с многими изолированными выходами магмы имеет в плане форму эллипса размером 90х75 км, вытянутого по азимуту 10–15°. Общий объем извергнутого материала составляет по приблизительному подсчету 5000 км³.

В настоящее время наиболее активными являются вулканы Ключевской и Безымянный. В результате извержений первого образовались андезито-базальты со средним содержанием кремнезема 53%, второго — кислые андезиты, содержащие около 59% кремнекислоты. Ключевской вулкан извергается с интервалом в несколько лет в течение многих столетий; типы его извержений — стромболианский и этнийский. Вулкан Безымянный активизировался в 1955 г. после не менее чем 200-летнего состояния покоя; по грандиозности направленных взрывов, сопровождаемых формированием пирокластических потоков, и образованию крупной вершинной экструзии его извержения близки к катмайскому типу. Интересно отметить, что вулканы Ключевской и Безымянный, столь различные по характеру извержений и составу продуктов, иногда действуют одновременно.

Огромные массы основной лавы, систематически извергаемые как вершинным, так и побочными кратерами Ключевского вулкана в течение очень продолжительного времени, свидетельствуют о наличии под ним мощного магматического источника и о слабой дифференцированности поставляемого им на дневную поверхность расплава. У расположенного по соседству вулкана Безымянного иная специфика строения, в частности, возможно существование под ним промежуточного магматического очага.

Хотя до проведения сейсмических и других геофизических наблюдений в пределах Ключевской группы вулканов не было надежных критериев для суждения о ее корневых зонах, все же был высказан ряд более или менее обоснованных предположений об источниках их питания. Так, Б. И. Пийп [21] писал: «Имеется основание предполагать существование единого магматического резервуара для всех Ключевских вулканов... Подобного рода общий магматический бассейн, однако, вряд ли мог быть прямым источником отдельных Ключевских вулканов. Присутствие среди последних многочисленных горных сооружений разнообразных по структуре, составу материала, размерам и по

продолжительности жизни, свидетельствует о том, что каждое из них имело собственный, длительно действовавший источник питания» (с. 70). По наличию включений в лавах многочисленных обломков верхнетретичных пород и отсутствию более древних он заключил, что индивидуальный очаг Ключевского вулкана залегает на глубине около 5—6 км ниже уровня моря. Глубину общего источника магмы Б. И. Пийп не оценивал, а площадь его принимал равной 100х30 км. А. Н. Сирин, ссылаясь на работы Г. С. Горшкова, принимал глубину залегания общего очага равной 55 км и, исходя из пространственного размещения шлаковых конусов на Ключевском долу, определял его плановые размеры в 70х25 км.

В. А. Ермаков считает, что вулканы Плоские, Камень, Ключевской, Толбачинские и ареальные образования в районе Плоского Толбачика и Дальнего Плоского питаются мантийными источниками, а их положение контролируется глубинным разломом северо-восточного простирания, в то время как вулканы юго-восточной части Ключевского дола имеют палингенные источники питания в земной коре (Безымянный, Зимины и Удины).

В 50-х годах началось геофизическое изучение Ключевских вулканов. О работах Г. С. Горшкова в этом направлении говорилось выше. В. М. Зобин [10] исследовал динамические особенности сейсмических волн от близких землетрясений и нашел, что аномальная зона, которую можно трактовать как магматический источник, залегает под Ключевской группой на глубине более 50 км и протягивается полосой к юго-западу от Ключей до Срединного хребта.

П. П. Фирстовым и В. А. Широковым [29] были изучены динамические параметры землетрясений района Ключевской группы (глубина очага 80 км и более, гипоцентрального расстояния до 300 км), на основании чего ими околонуены и прослежены до глубины около 110 км аномальные области, отождествляемые с областями магматического образования. Интересно что горизонтальные их проекции на поверхность Земли смещены к западу от Ключевской сопки на расстояние до 20—30 км.

В. И. Горельчик и А. И. Фарберовым [7] под Ключевской группой вулканов выявлена асейсмическая область, границы которой фиксируются землетрясениями с глубиной очагов 110—230 км. Наличие этой области свидетельствует о специфических особенностях вещества верхней мантии под вулканами, в частности, о его пониженной вязкости.

В результате магнитометрических наблюдений на Безымянном вулкане Е. К. Мархининым и его соавторами [13] было высказано предположение о наличии под ним на глубине нескольких километров промежуточного магматического очага.

Фундамент Ключевских вулканов. О геологическом строении фундамента вулканов Ключевской группы дают представление разрезы в краевых частях Ключевского дола и ксенолиты в четвертичных лавах. Основные сведения о них обобщены в работе К. М. Тимербаевой [25].

Самые древние из известных в рассматриваемом районе верхнемеловые отложения слагают краевые части Восточно-Камчатского антиклинория. Они представлены преимущественно туфо-кремнистыми и кремнистыми породами, среди которых в подчиненном количестве присутствуют измененные зеленокаменные базальты, полимиктовые песчаники и аргиллиты. Образования верхнего мела прорваны интрузиями дунитов и перидотитов. В бассейне верхнего течения р. Правый Толбачик в нижней части разреза верхнемеловых отложений преобладают лавы основного состава, в верхней части — средние эффузивы. Туфы

нередко сильно окремнены. Верхнемеловые отложения вмещают многочисленные дайки и силлы габбро-диабазов и долеритов.

Палеогеновые отложения в районе Ключевской группы вулканов выделяются условно. Они представлены вулканогенно-осадочными образованиями мощностью около 1000 м, среди которых выделяют нижнюю переходную свиту (различные туфы и вулканогенные песчаники) и верхнюю (песчано-сланцевую).

Фаунистически охарактеризованные неогеновые отложения развиты преимущественно к западу и северо-западу от Ключевского дола и на восточных бортах Центрально-Камчатской депрессии, где имеются лишь небольшие разобщенные их выходы. Представлены они песчаниками, аргиллитами, гравелитами и конгломератами с верхнемиоцен-плиоценовой фауной. В верховьях рек Правый Толбачик и Шапина неогеновые отложения имеют преимущественно континентальный характер (песчаники, гравелиты, туффиты). Общая мощность третичных отложений в осевой части Центральной Камчатской депрессии оценивается в 4000—5000 м.

Непосредственное основание всех вулканов Ключевского дола, за исключением вулкана Малая Зими́на (Горный Зуб), сложено древне-четвертичными мегаплагиофировыми лавами, которые, по данным Б. И. Пийпа [21], представляют собой обильно насыщенные крупными вкрапленниками основного плагиоклаза базальты и андезито-базальты.

Многие авторы [8, 21] предполагают существование в районе Хапиченского дола погребенного мезозойского хребта северо-западного простирания, уходящего под массив Ключевских вулканов, а также указывают на возможное неглубокое залегание поверхности древних (домезозойских) пород под нижней частью последнего.

Дополнительные сведения о составе и строении фундамента Ключевской группы дают материалы по изучению ксенолитов в лавах ее вулканов.

Установлено, что среди продуктов извержений сопок Ключевской и Плоских [21] наиболее характерны ксенолиты третичных осадочных пород. Это позволяет говорить о повышенной мощности последних в северной части Ключевского дола. С другой стороны, обилие включений мезозойских окремнелых туфов, туфопесчаников и кремнистых сланцев в лавах южных вулканов группы (Зиминых, Удиных), по-видимому, свидетельствует о значительно меньшей мощности развитых здесь третичных осадков и менее глубоком залегании кровли мезозойских образований [21, 25]. К несомненным представителям вещества консолидированной коры следует отнести ксенолиты зеленокаменных пород, различных кристаллических сланцев и амфиболитов, которые в значительном количестве встречены в продуктах извержений сопок Зиминых, Удиных и Шивелуча [25]. Включения габбро и перидотитов гарцбургитового типа, возможно, являются отторженцами соответствующих интрузий, залегающих в толще земной коры, но генетически связанных с верхней мантией. Особого внимания заслуживает факт полного отсутствия в лавах Ключевских вулканов эклогитоподобных пород и эклогитов, а также гранатовых перидотитов, что характерно и для других вулканов Камчатки и Курильских островов [22].

Сейсмический эксперимент. Постановка наблюдений ГСЗ в районе Ключевской группы вулканов была сопряжена с рядом трудностей, обусловленных сложностью и необычностью объекта исследований (своеобразная термодинамическая обстановка, наличие локальных расплавленных масс, которые вызывают аномальные эффекты распространения упругих волн, не вписывающиеся в рамки обычных сейсмических моделей). Количественная оценка этих эффектов оказалась невозмож-

ной без сравнения наблюдаемого здесь волнового поля с полем в «нормальных» условиях, в связи с чем наряду с площадными исследованиями ГСЗ непосредственно в пределах вулканической группы был отработан параметрический профиль в амагматической зоне, расположенной в Центрально-Камчатской депрессии в 50 км к западу от действующих вулканов (рис. 1). Наблюдения на нем проводились по непрерывной системе между двумя стационарными пунктами взрыва (Крапча, Кресты) и дифференциальными симметричными зондированиями из четы-

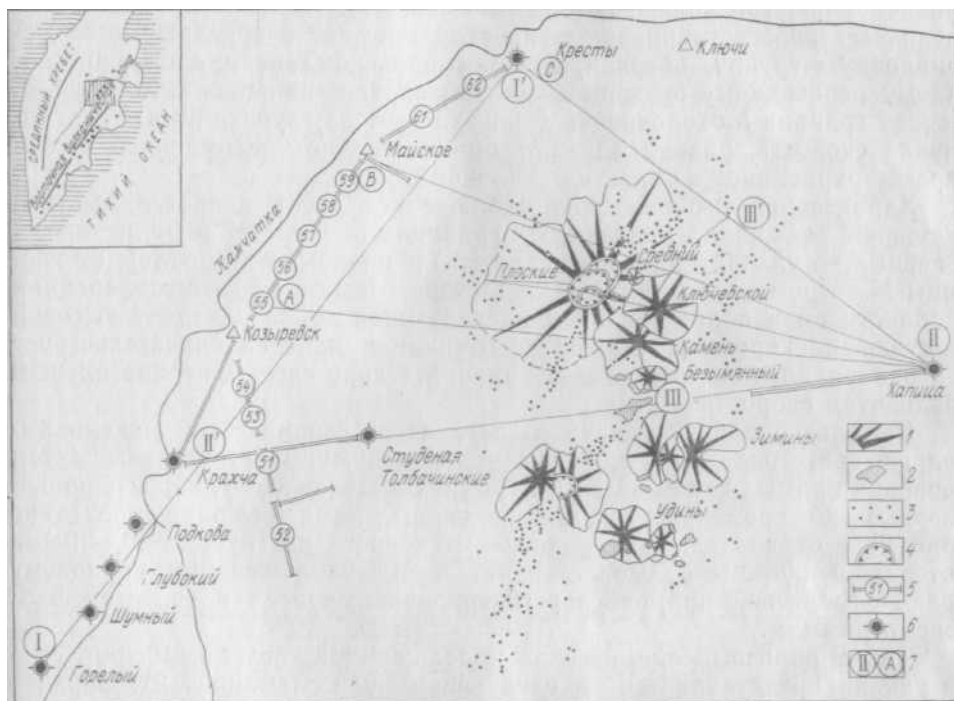


Рис. 1. Обзорная схема района исследований

1 — вулканы центрального типа, 2 — крупные экструзии, 3 — зоны ареляльного и адвентивного вулканизма, 4 — края кальдер, 5 — стоянки сейсмических станций, 6 — пункты взрыва, 7 — линии сейсмических разрезов

рех передвижных пунктов взрыва (Подкова, Глубокий, Шумный, Горелый).

По полученной системе встречных (до 70 км) и элементов нагоняющих (до 105 км) годографов удалось определить кинематические и динамические характеристики сейсмических волн и установить их природу. При интерпретации волнового поля нами выделены три группы волн, связанных с границами в осадочно-вулканогенном слое, поверхностью консолидированной коры и границами внутри нее, а также страницами в переходной зоне коры к мантии. Наиболее уверенно на расстояниях до 50 км от пункта взрыва по своим динамическим показателям выделяется преломленно-рефрагированная волна, образованная на поверхности консолидированной (кристаллической) земной коры (кровли так называемого гранитно-метаморфического слоя). От волн осадочной группы она резко отличается более сложной и интенсивной записью, которая отражает сложную структуру поверхности фундамента.

Волны коровой группы образуют «штриховое» [12] поле, что не позволяет говорить о наличии в консолидированной коре протяженных опорных границ. Они выделяются по спорадически появляющимся коротким отрезкам осей синфазности с большими кажущимися скоростями. Особенности этих волн позволяют отнести их к классу отраженных. В связи со сказанным, разделение кристаллической коры на «гранитный» и «базальтовый» слои произведено чисто условно по совокупности отражающих площадок и изменениям скоростного разреза.

На расстояниях 80—100 км от пункта взрыва наблюдается, по крайней мере, три волны, которые по своей интенсивности выделяются среди всех зарегистрированных на этом профиле и образуют интерференционную группу, обязанную своим происхождением слезнопостроенному переходному от коры к мантии слою мощностью более 10 км. Первая граница Мохоровичича (M_0) залегает на глубине 30 км. Ее граничная скорость, равная 8,1 км/с, определена по преломленной волне, зарегистрированной в области начальной точки.

Характерной особенностью наблюдаемого поля является быстрое затухание всех волн, связанных с границами в земной коре, и выход в первые вступления на расстоянии 85 км преломленной волны от границы M_0 . Кроме того, для него характерны малые зоны интерференции в области смен волн; при этом последующая волна обладает высокой кажущейся скоростью. Скорее всего данная картина свидетельствует о неоднородно-слоистой среде и наличии в коре слоев с отрицательным градиентом скорости [4, 9].

Решение обратной задачи и составление сейсмической модели выполнено интегральными методами с последующим уточнением путем перебора прямых задач на ЭВМ. Из трех моделей (№ 1, 25, 37), равнозначных по временным характеристикам, нами выбрана последняя (рис. 2) с отрицательным градиентом скорости на глубине 20—30 км, которая лучше всего удовлетворяет всему наблюдаемому волновому полю, физической природе зарегистрированных волн и синтетическим сейсмограммам.

Таким образом, сейсмическая модель земной коры рассматриваемого района представляется в следующем виде (см. рис. 2). Верхние 6—8 км разреза приходятся на долю осадочно-вулканогенного слоя ($v_p = 2,0\text{--}5,5$ км/с). Ниже до глубины 30 км залегает слабонерасчлененная консолидированная кора ($v_p = 6,2\text{--}7,5$ км/с), вблизи подошвы которой (глубина 20—30 км) располагается слой с отрицательным градиентом скорости ($v_p = 7,5\text{--}7,0$ км/с). Кора отделяется от мантии переходной зоной мощностью более 10 км.

Сейсмический эксперимент в районе вулканической группы был направлен на получение характеристик волнового поля по всей ее площади и построению сейсмогеологической модели этой группы. Для этого проводились наблюдения по системе продольного и неперодольного профилей, связанных общими пунктами взрыва с параметрическим профилем (см. рис. 1).

Продольный профиль II—II¹ пересекает вулканическую группу на широте перевала Плотина непосредственно к югу от действующего вулкана Безымянный и был отработан из трех пунктов взрыва (Крапча, Студеная, Хапица), отстоящих друг от друга на расстоянии 25, 75 и 95 км.

Даже качественный анализ наблюдаемого на этом профиле волнового поля показывает, что оно не может быть объяснено в рамках модели земной коры, построенной по параметрическому профилю. В процессе математического моделирования по программам двумерных неоднородно-слоистых сред [2] для встречных годографов проходящих

волн от пунктов взрыва Хапица — Крахча удовлетворительное совпадение экспериментальных и теоретических полей оказалось при условии включения в модель среды зоны со средней скоростью 5,3 км/с.

При наблюдениях из пункта взрыва Студеная для волн P_1^k отр и P_0^m отр отчетливо фиксируется уменьшение их кажущихся скоростей до 5,0—5,5 км/с, а отклонение от расчетного годографа достигает 1 с. На основании этого можно предположить, что эти волны являются дифрагированными, огибающими упомянутую выше зону пониженной скорости. Это предположение становится реальным при соотношении

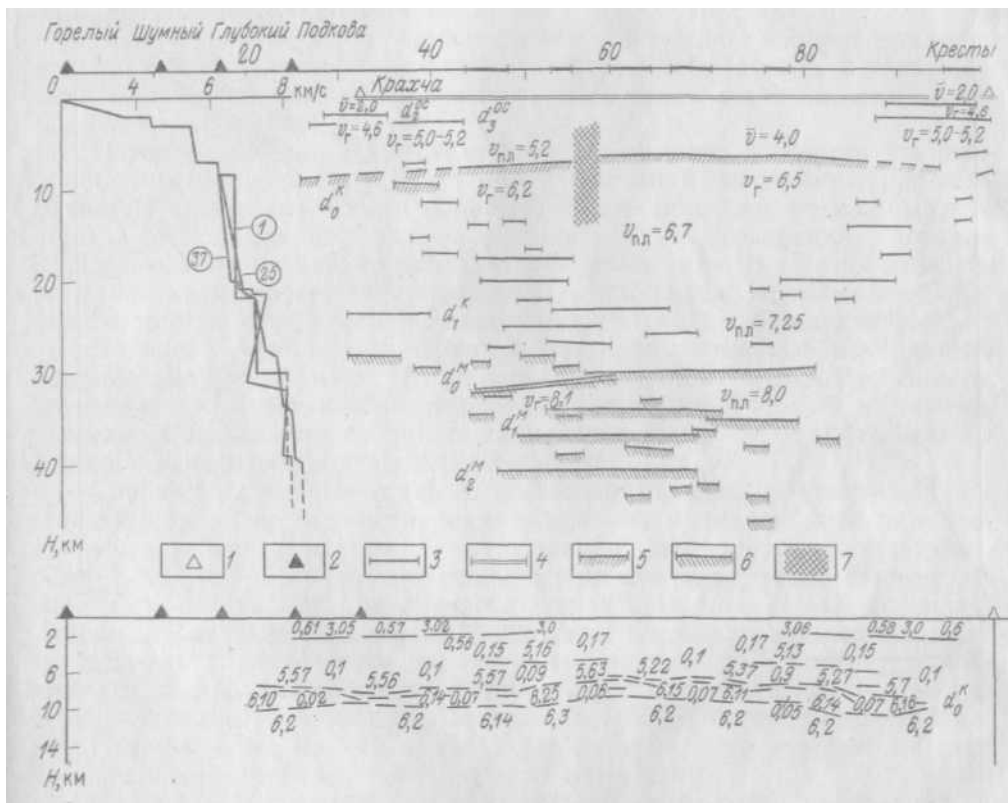


Рис. 2. Сейсмическая модель по параметрическому профилю I—I'

I — стационарные пункты взрыва, 2 — передвижные пункты взрыва, 3 — участки дискретных наблюдений, 4 — участки непрерывных наблюдений, 5 — поверхность земной коры, 6 — граница Мохорвичича, 7 — зона разлома

скоростей в окружающей среде (v_0) и аномальной зоне (v_1), приблизительно равном $\frac{\pi}{2}$ [1], которое и соблюдается в нашем случае. В соответствии с расчетами размер радиуса зоны составляет 10—15 км.

Для определения положения зоны пониженной скорости решалась серия прямых задач по формулам для отраженно-дифрагированных волн, в которые вводился дополнительный путь огибания по поверхности неоднородности. В результате было установлено, что аномальное тело залегает на глубине 10—20 км. Эти же глубины были получены при вычислении по наблюдаемому годографу точек дифракции (рис.3).

Таким образом, кинематические и динамические признаки зарегистрированных волн на профиле (I—I') создают все предпосылки для предположения о наличии здесь под вулканом Безымянным на глубине 10—20 км аномальной зоны со скоростью 5,3 км/с. Эта скорость является

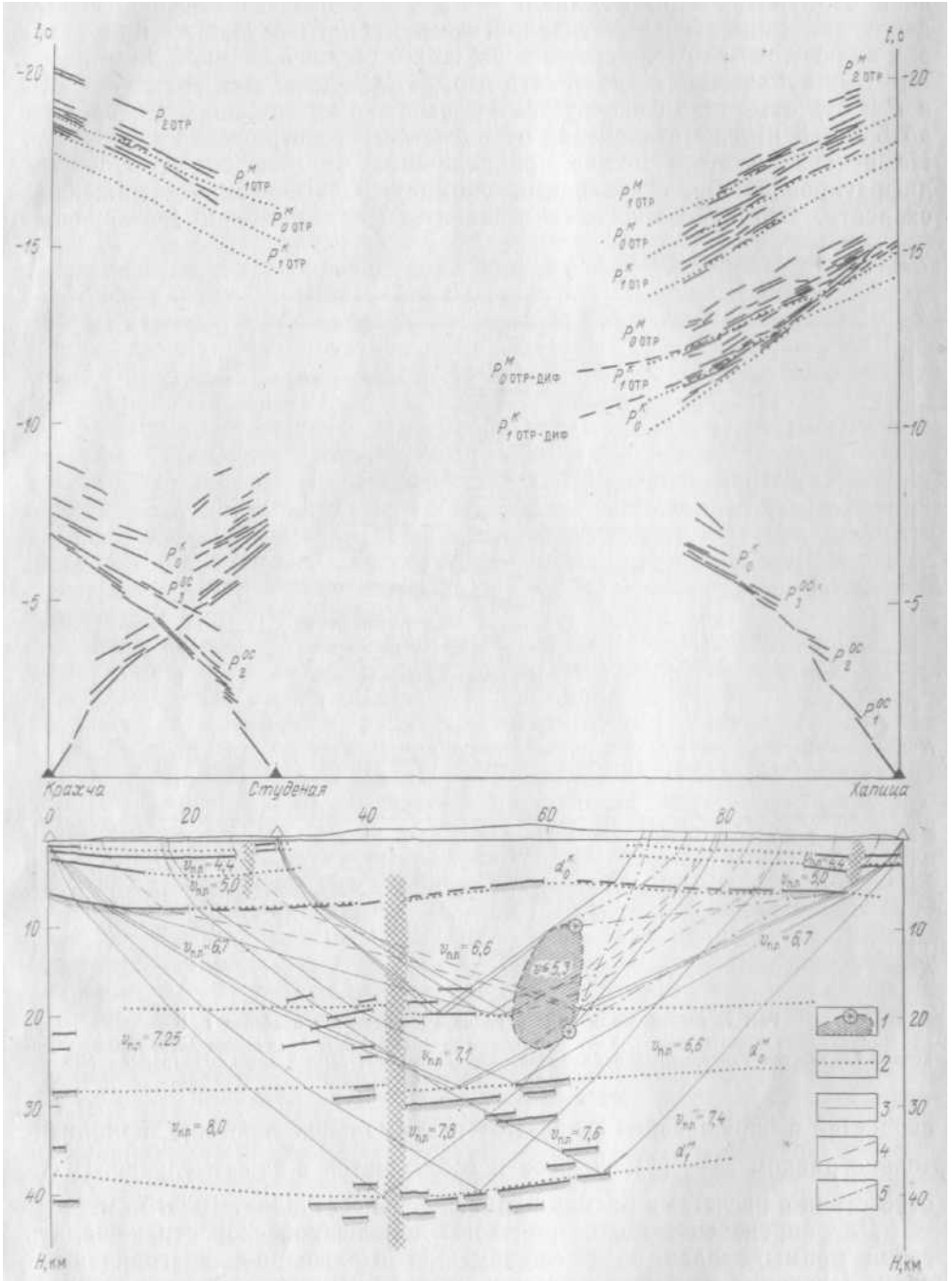


Рис. 3. Схема моделирования зоны пониженных скоростей по профилю II—II'

1 — зона пониженных значений вязко-упругих параметров; 2 — сейсмические границы в модели земной коры; 3 — лучи проходящих волн, не искаженные аномальной зоной; 4 — лучи проходящих волн, искаженные аномальной зоной; 5 — лучи отраженно-дифрагированных волн

средней и характеризует только внешние края зоны неоднородности. Внутри же ее следует ожидать уменьшение скорости до 4,0 км/с.

Для «просвечивания» вулканической группы был задан непродольный профиль, который отрабатывался из пункта взрыва Хапица. Расстояние взрыв — прием было выбрано с таким расчетом, чтобы за счет сейсмического сноса получить информацию о строении земной коры непосредственно под вулканами Ключевским, Безымянным и Камнем. Кроме того, это расстояние обеспечивало прослеживание волн, отраженных от границы М в ее критической области (там, где установлена ее максимальная интенсивность).

На протяжении всего эксперимента тщательно контролировались все параметры регистрирующей аппаратуры. На пункте взрыва Капица была установлена специальная станция для учета энергии и стабильности взрывов.

Известны были и сейсмогеологические условия в местах расположения сейсмических станций (линия наблюдений совпадает с параметрическим профилем). Таким образом, исключались все возможные причины в местах возбуждения и приема упругих колебаний, которые могли повлиять на характеристики глубинных волн. В связи с этим мы получили возможность интерпретировать наблюдаемые изменения волнового поля за счет влияния неоднородностей среды под вулканами.

На рис. 4 представлен первичный экспериментальный материал по непродольному профилю. По различному наклону осей синфазности, интенсивности и своеобразному рисунку записи здесь можно достаточно уверенно выделить три группы волн, которые являются отраженными от границ в переходной зоне от коры к мантии.

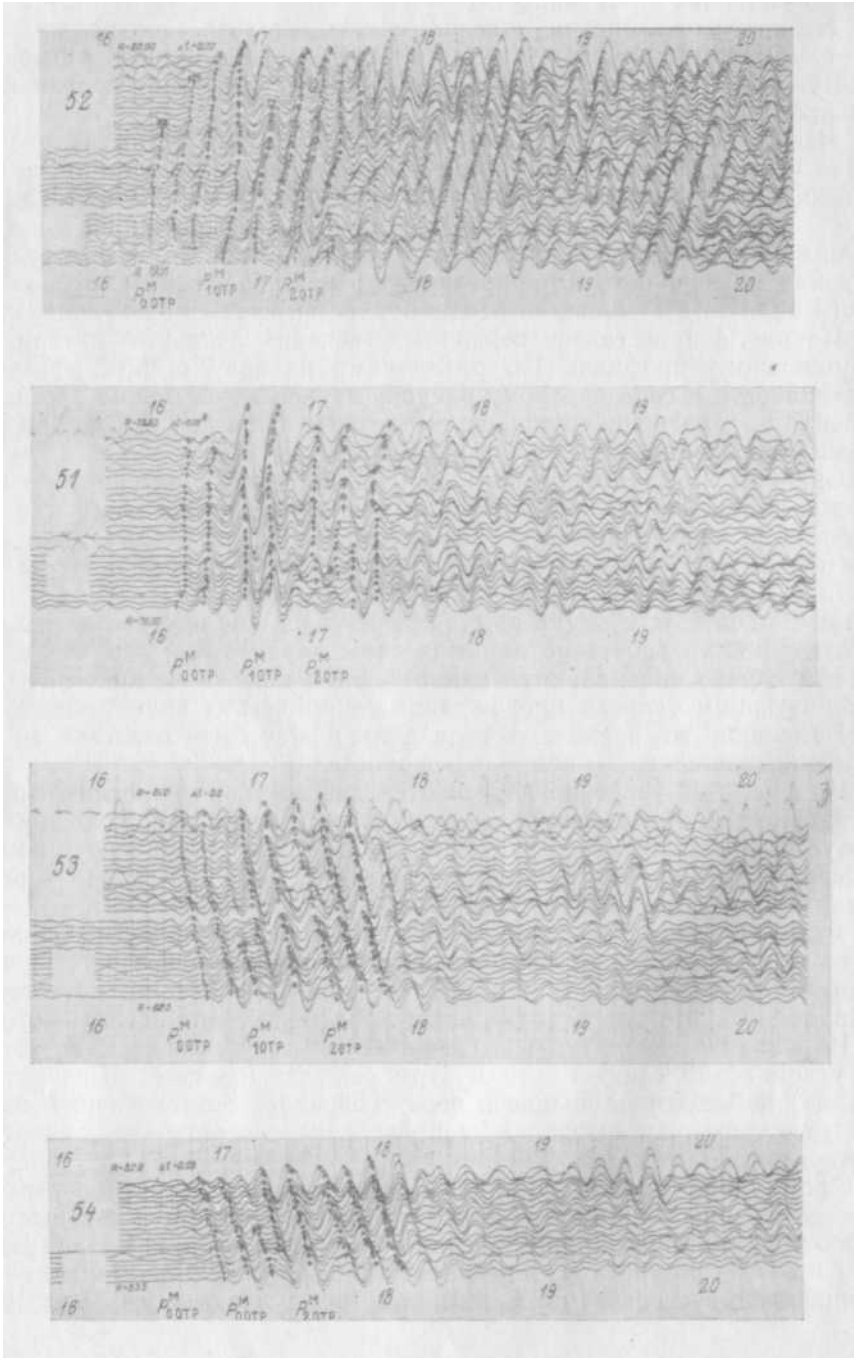
Сравним их динамические и кинематические характеристики с таковыми для волн, зарегистрированных в амагматичной зоне при аналогичных условиях приема и возбуждения. Непродольные годографы волн P_0^m и P_1^m и их динамические характеристики построены на плоскости (x, α) (рис. 4), где α — угол между профилем II—II' и направлением на соответствующий пункт приема. При анализе волнового поля мы отдавали предпочтение динамическим параметрам, так как в конкретном случае они являются единственным надежным критерием, характеризующим условия прохождения сейсмических волн через вулканы. Изменение же времен прихода волн может быть отнесено за счет изменения мощности земной коры, скоростей и т. д.

На рис. 4, II уверенно выделяются две зоны, резко отличающиеся друг от друга динамическими особенностями. Первая (α до 25°) характеризуется пониженными значениями амплитуд, большим временем пробега, чем на параметрическом профиле. Для этого сектора «просвечивания» принята за основу сейсмическая модель профиля II—II' (см. рис. 3), на котором установлена зона пониженных скоростей. Положение ее в пространстве можно определить по затуханию амплитуд волн P_0^m и P_1^m , которые при $\alpha = 21\text{--}23^\circ$ исчезают по совершенно. Естественно предположить, что здесь аномальная зона пересекает все границы.

Из анализа амплитудных графиков и коэффициентов затухания для углов $\alpha > 25^\circ$ следует, что в этом секторе (севернее Ключевского вулкана) наблюдаемое волновое поле совпадает с аналогичным полем на параметрическом профиле. Распределение скоростей здесь соответствует модели 37 (см. рис. 2).

Сформулированные выше положения явились основой для решения серии двухмерных прямых задач по условным расщепкам, которые расчленяют Ключевскую группу вулканов по линиям, показанным на рис. 1 и 5, I. В результате их решения выяснилось, что аномальная зона с пониженными скоростями, выделяемая под вулканом Безымянным на

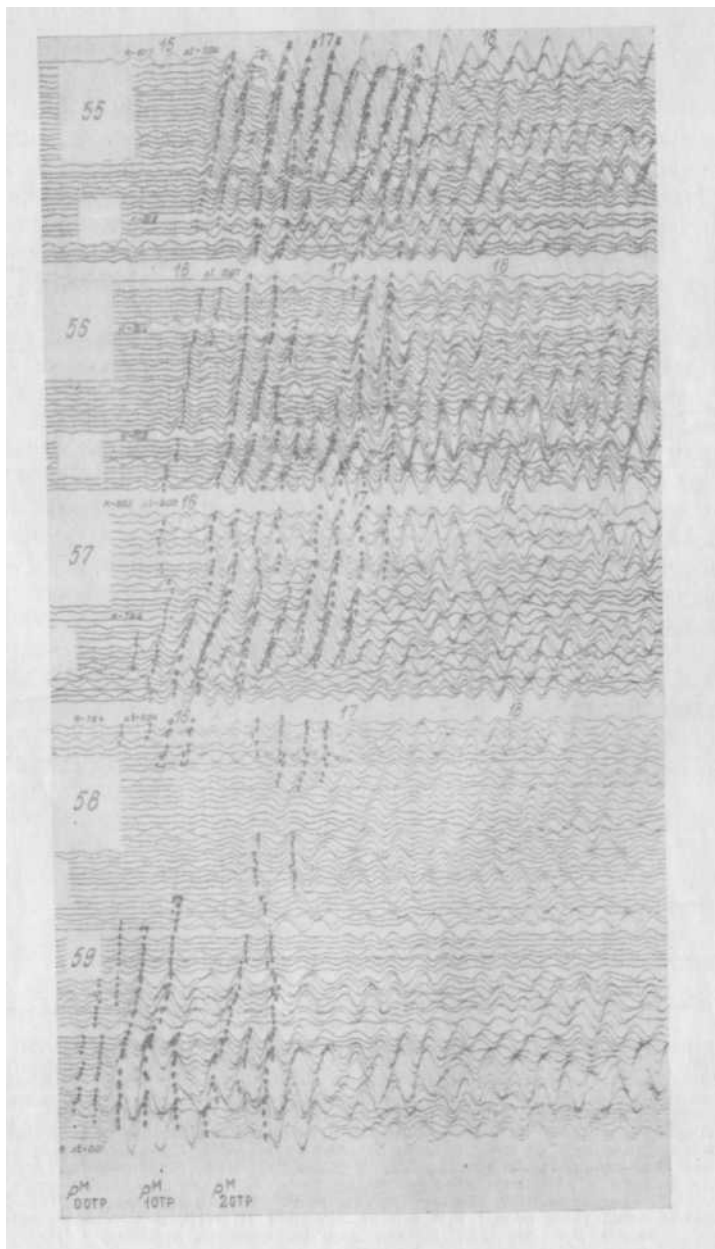
глубине 10–20 км, с некоторыми изменениями сейсмических параметров продолжается с погружением под вулканами Камень и Ключевской и уходит в верхнюю мантию, где соединяется с еще более интенсивной по затуханию сейсмических волн аномальной зоной непосредственно под Ключевской сопкой. Эта зона обуславливает почти полное экранирование волн P_0^M отр и P_1^M отр в районе отмеченного сектора ($\alpha = 21-23^\circ$), создавая «сейсмическую тень». Такая модель среды наиболее полно удовлетворяет наблюдаемому волновому полю, зарегистрированному на дуговом профиле при «просвечивании» вулканов Ключевской группы.



Анализ результатов. На основе вышеизложенного представляется возможным обсудить следующие важнейшие проблемы:

- 1) строение и вещественный состав земной коры района,
- 2) природу аномальных зон,
- 3) некоторые вопросы тектоники основания вулканов.

1. Земная кора рассматриваемого района отнесена к континентальному типу и имеет мощность около 30 км. Поверхность раздела между осадочно-вулканогенным слоем и консолидированной частью коры очень четкая, прослеживается повсеместно и является опорной региональной сейсмической границей со скоростями 6,0—0,5 км/с. Как показали наши исследования, на юге Камчатки эта граница уверенно привязывается к поверхности метаморфических пород кристаллического фундамента (Mz?—Pz), обнажающихся в Среднем хребте и в Ганальских востря-



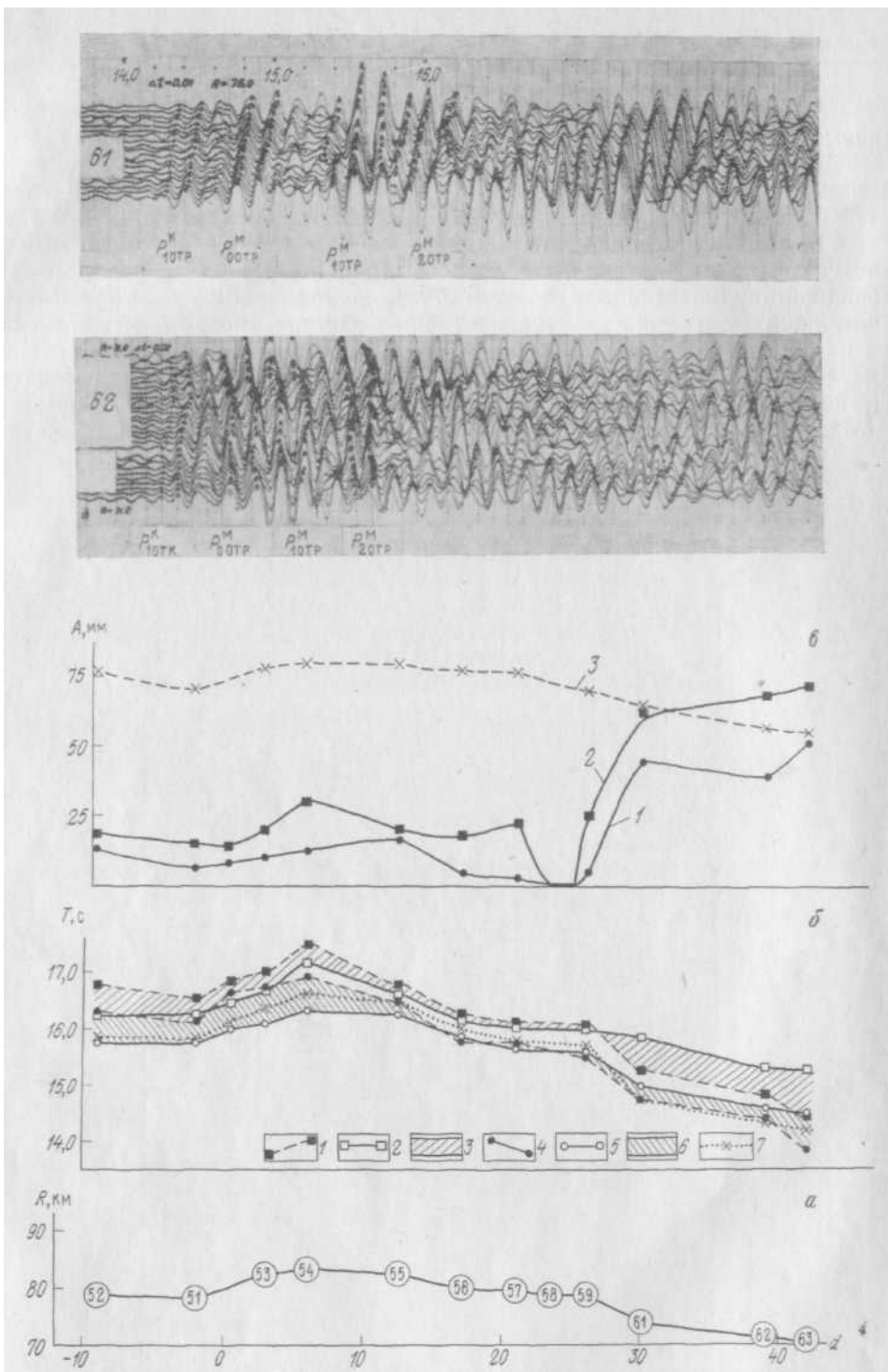


Рис. 4. Монтаж сейсмограмм по профилю III—III; кинематические и динамические параметры волн P_{10TP}^M отр и P_{20TP}^M отр, соответствующие этому монтажу

а — график расстояний от пункта взрыва до точек приема по профилю III—III' (номера точек соответствуют номеру сейсмограмм на контакте); б — кинематическая характеристика интерпретируемых волн: 1 — непродольный годограф волны P_{10TP}^M отр, 2 — годограф волны P_{20TP}^M отр по профилю I—I', соответствующий удалениям профиля III—III', 3 — расхождение времен для волны P_{10TP}^M отр по профилям I—I' и III—III' на одних и тех же удалениях от пунктов взрыва, 4 — непродольный годограф волны P_{20TP}^M отр, 5 — годограф волны P_{20TP}^M отр по профилю I—I', приведенный к удалениям от пункта взрыва профиля III—III', 6 — расхождение времен волны P_{20TP}^M отр на профилях I—I' и III—III', 7 — непродольный теоретический годограф волны P_{20TP}^M отр для модели параметрического профиля; в — амплитудные характеристики интерпретируемых волн: 1 — экспериментальные амплитуды волн P_{10TP}^M отр на профиле III—III', 2 — экспериментальные амплитуды волны P_{20TP}^M отр на профиле III—III', 3 — теоретические амплитуды волны P_{20TP}^M отр для модели параметрического профиля I—I'.

ках. Внутри осадочно-вулканогенной толщи зафиксирована еще одна граница, скорее всего разделяющая образования верхнего мела—палеогена и неогена.

Подошва земной коры как единая сейсмическая граница не фиксируется. Она представляет собой мощную (более 10 км) переходную зону со сложными законами изменения скоростей упругих волн (как правило, отмечается серия прерывистых отражающих границ, нередко имеющих несогласные взаимоотношения). При этом непосредственно под вулканической группой эта зона построена наиболее сложно. Кроме того, здесь лучше регистрируются более глубокие границы, тогда как за ее пределами четче прослеживаются верхние сейсмические разделы.

Переход от «гранитного» к «базальтовому» слою также не резкий и их выделение условно. Несмотря на это, отчетливо видно, что по общей мощности в земной коре преобладает «гранитный» слой.

Важно подчеркнуть, что непосредственно под Ключевским вулканом на глубинах 20—50 км сейсмические разделы вообще не фиксируются. Наличие зоны «сейсмической тени» свидетельствует о существовании под этим вулканом аномальной области.

Нечеткий характер границ и наличие переходных зон между земной корой и мантией, а также между «гранитным» и «базальтовым» слоями ставит под сомнение представление об их химической природе и заставляет приписывать им чисто физический смысл, обусловленный термодинамическими факторами, в частности влиянием вариаций температуры. Последнее является совершенно естественным для корневых частей вулканической группы.

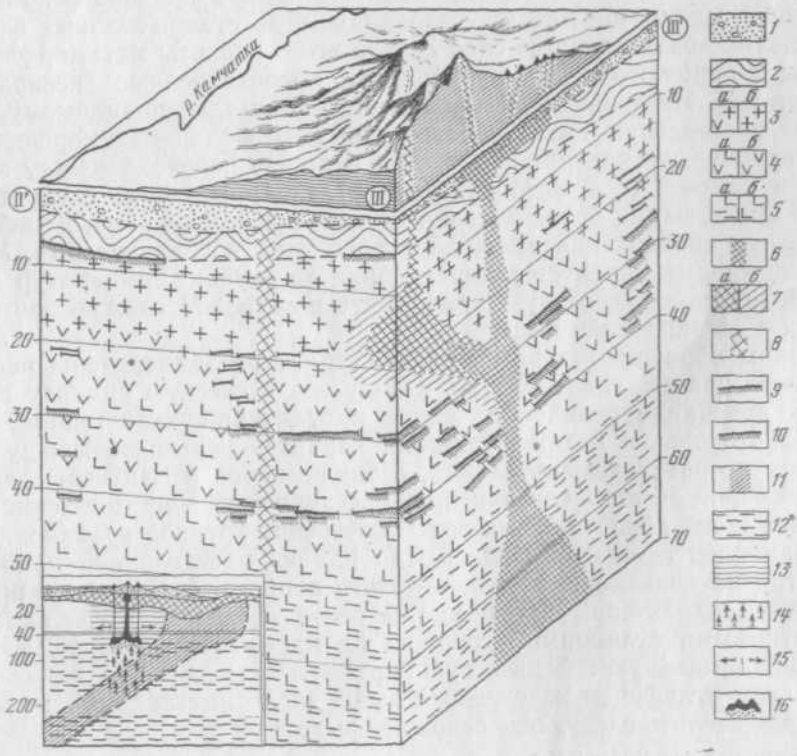
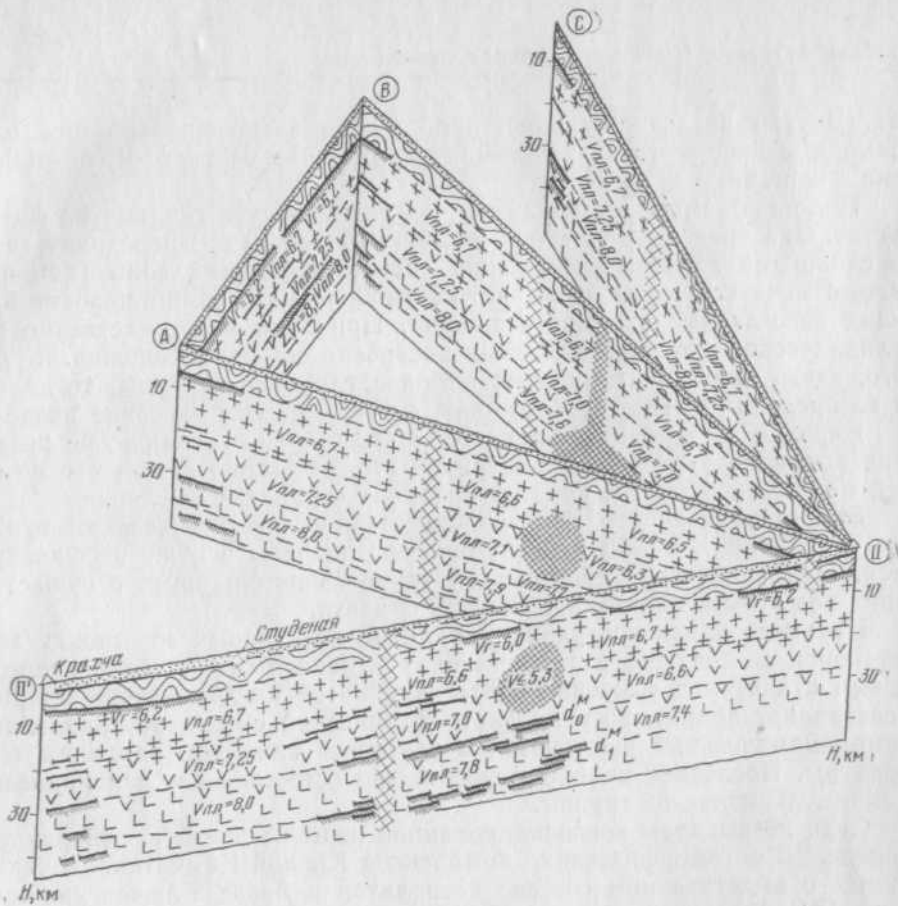
Судя по выходам консолидированной коры на дневную поверхность в пределах метаморфических комплексов Южной Камчатки, а также данных о вещественном составе ксенолитов в лавах Ключевских вулканов [21, 25] есть все основания думать, что «гранитный» слой рассматриваемого района сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями, метаморфизованными до стадии зеленых сланцев. В пределах «базальтового» слоя скорее всего развиты метаморфические породы амфиболитового типа, широко представленные ксенолитами в лавах [25]. Нечеткий характер границы Конрада, по-видимому, и отражает постепенную смену образований этих фаций метаморфизма.

Подобное же явление отмечается и в зоне перехода между земной корой и мантией («слое» Мохоровичича), но только здесь следует говорить о смене фаций более высоких ступеней метаморфизма, в частности о переходе образований амфиболитового типа в гранулитовые. Учитывая аномальный характер распределения по глубине температур в вулканических районах, следует думать, что в «слое» М сложно протекают процессы дегидратации вещества.

Таким образом, говоря об общей структуре земной коры рассматриваемого района, следует иметь в виду геологическую природу границ кровли консолидированной ее части и осадочно-вулканогенного слоя, с одной стороны, и метаморфический характер переходов между «гранитным» и «базальтовым» слоями, а также корой и мантией, с другой.

2. Вопрос об истолковании природы аномалий в прохождении сейсмических волн, обнаруженных под Ключевской группой вулканов, является наиболее сложным и важным в плане поставленной проблемы. Несмотря на очевидную сложность этого вопроса, его решение предопределяется характером изучаемого объекта и прежде всего наличием под активными вулканами питающих их магматических масс, которые создают аномальную сейсмическую картину.

В этом отношении изложенный выше экспериментальный материал позволяет сделать следующие основные выводы.



Установленная под самым активным вулканом группы — Ключевской сопкой — почти вертикальная столбообразная аномальная зона с поперечником около 2 км, прослеживающаяся в интервале глубин 20—50 км и «уничтожающая» в своих пределах все сейсмические границы, может интерпретироваться только как «магмовод», связывающий глубинный магматический источник с дневной поверхностью (рис. 5, II). Нельзя не обратить внимание на то, что в непосредственной близости от этого магматического канала располагаются самые крупные вулканы Ключевской группы (сопки Плоские, Ключевская, Камень), на объем которых приходится около двух третей всех развитых здесь построек и которые в подавляющей своей части сложены основными лавами и туфами, по своему составу отвечающими весьма слабо дифференцированному первичному магматическому расплаву. Учитывая разный возраст перечисленных вулканов, можно предположить, что установленный «магмовод», несколько изменяющий во времени положение своей верхней части, являлся транзитной зоной для мантийного магматического материала в течение всего четвертичного периода.

Проведенные исследования не дали конкретного ответа на вопрос о расположении источников питания (первичных магматических очагов) Ключевских вулканов. Совершенно очевидно лишь то, что они являются мантийными, но мнения исследователей о глубине их залегания существенно расходятся. Часть геологов отдает предпочтение глубинам около 50—70 км, что как будто подтверждается известными геофизическими данными и сведениями о вещественном составе ксенолитов в лавах островных дуг, а также результатами физико-химического эксперимента. Перечисленные материалы не позволяют пока «опускаться» магматические источники андезитовых вулканов ниже уровня (около 50—70 км) трансформации габбровых минералов в эклогитовые, так как не только эклогиты, но и эклогитоподобные породы в них не обнаруживаются.

Несмотря на эти аргументы, другие исследователи, в том числе и Е. К. Мархинин, видят возможность прямой связи между магмообразованием и процессами в сейсмофокальном слое, залегающем здесь на глубинах 130—200 км [26]. Не отрицая возможности такой связи, остальные авторы данной статьи видят ее, подобно В. В. Белинскому [3], в участии разогретых «газовых струй» («сквозьмагматические растворы» Д. С. Коржинского). Последние в результате снятия напряжений при землетрясениях могут формироваться в сейсмофокальном слое и, мигрируя по ослабленным зонам (зоны растяжения) к дневной поверхности, обуславливать частичное плавление вещества верхней мантии на сравнительно небольших глубинах. Особенно это касается вопроса о глубине образования значительных скоплений магматических расплавов, отделенных от остаточной твердой фазы, которые, скорее

Рис. 5. Блок-диаграмма и веер условных сейсмологических разрезов

1 — вулканогенно-осадочные образования неогена, 2 — складчатые вулканогенно-осадочные образования верхнего мела — палеогена, 3 — «гранитный» слой: предположительно метаморфические образования зеленосланцевого типа (а), «слой» Конрада (б) — предположительно переходные метаморфические образования от зеленосланцевой к амфиболитовой фации; 4 — «базальтовый» слой: предположительно метаморфические образования амфиболитового типа (а), «слой» Мохоровичича (о) — предположительно переходные метаморфические образования от амфиболитовой к гранулитовой фации (зона дегидратации); 5 — верхняя мантия: между подошвой земной коры и первой астеносферой (а), в области первой астеносферы (б); 6 — очаговая область и подводящий канал под Ключевским вулканом; 7 — очаговая область под вулканом Безымянным с менее (о) и более (б) закристаллизованными частями; 8 — глубинный разлом; 9 — границы кровли консолидированной коры; 10 — границы в коре и верхах мантии. На врезке: 11 — фокальная зона; 12 — астеносферные слои по Р. З. Тараканову [24]; 13 — зона разуплотнения верхней мантии под островной дугой; 14 — поток разогретых флюидов; 15 — зона растяжения; 16 — область магмообразования и формирования первичного очага

всего, залегают выше зоны Беньюфа и фиксируются сейсмологами как области высокой пластичности вещества верхней мантии.

Приводимые сторонниками глубокого залегания первичных очагов аргументы петрохимического плана, безусловно, очень важны (хотя далеко неоднозначны) и довольно легко объяснимы (особенно в отношении содержания K_2O) с позиций гипотезы «газовых струй». Эксперименты В. К. Маркова и др. [20] определенно свидетельствуют, что повышение давления не способствует фиксации калия в минералах горных пород. Это говорит о возможности своеобразной отгонки калия из более глубоких зон Земли в верхние горизонты коры.

Таким образом, поперечная петрохимическая зональность, в частности заметное увеличение содержаний калия в лавах в направлении от океана к континенту, может объясняться возрастанием в этом направлении глубины, на которой протекают процессы дифференциации вещества верхней мантии и связанная с этим ее дегазация, что, видимо, и отражается в крутом падении фокальной зоны (области максимальной нестабильности верхней мантии) под континент.

Сейсмический материал свидетельствует о существовании периферических магматических очагов, по крайней мере под вулканами типа Безымянного, геолого-петрографические данные изучения которых говорят о том же. Подтверждением этому служит зафиксированная под вулканом Безымянным в пределах глубин 10–20 км область усиленного поглощения сейсмических волн. Судя по наблюдаемой волновой картине, эта область в нижней части земной коры соединяется с упомянутым выше «магмоводом» под Ключевской сопкой и является его тупиковым ответвлением (см. рис. 5). Из петрографических данных, а также степени поглощения упругих волн следует, что периферическая очаговая область вулкана Безымянного заполнена смесью твердого материала кристаллической фазы и остаточного расплава в соотношении, близком 2:1. Раскристаллизованность вещества этой области, видимо, заметно возрастает к периферии, что и фиксируется по постепенным сейсмическим переходам от нее ко вмещающим породам. Экструзивно-эксплозивный характер деятельности вулкана Безымянного в определенной мере подтверждает данное предположение.

Наличие внутрикорового периферического очага под вулканом Безымянным дает удовлетворительное объяснение существующей разнице в составе извергаемых им и Ключевским вулканом лав (весьма кислому в первом случае и основному—во втором), а также в типах их извержений. Возможность длительной дифференциации и ассимиляции в таком промежуточном очаге должна была бы привести к появлению кислых продуктов и медленному накоплению газовой фазы, столь необходимой для генерации катастрофических взрывов, происшедших, например, в 1956 г.

Наличие связи между «генеральным магмоводом» под Ключевским вулканом и периферической магматической зоной под сопкой Безымянной позволяет поставить под сомнение представления В. А. Ермакова о самостоятельности питания вулканов юго-восточной части Ключевского дола (сопок Зиминых, Удиных и Безымянной) и о внутрикоровом палингеном характере их магмы, а также отдать предпочтение намного ранее высказанным соображениям Б. И. Пийпа [21] об общем глубинном источнике магмы Ключевских вулканов и существовании периферических очагов. Возможность существования последних, по-видимому, нельзя отрицать даже у таких аппаратов, как Ключевской вулкан, мантийное питание которого не вызывает сомнения. В пользу этого говорят задержки первичного расплава на его пути к дневной поверхности, отражающиеся в заметной (хотя и слабой) дифференциации магмы

этого вулкана [19, 21], а также локализация зон адвентивного (побочного) вулканизма. Можно говорить о разных типах периферических очагов, отличающихся своими размерами, глубиной залегания, формой, активностью связи с подкоровыми первичными источниками магмы, длительностью существования.

3. В результате проведенных работ были уточнены некоторые вопросы тектоники основания Ключевских вулканов.

Нашла подтверждение приуроченность вулканической группы к сводовой части антиклинорного поднятия, что ранее предполагалось рядом авторов по геологическим данным [8, 21].

Получены конкретные данные, подтверждающие высказанное ранее предположение о существовании примерно в 12 км к западу от очаговой области в основании вулканов Ключевской группы крупного глубинного разлома субмеридионального направления. Видимой связи этого нарушения с очаговыми зонами не обнаруживается. По-видимому, оно не имеет прямого отношения к питанию вулканов, хотя определенное его влияние на расположение зон ареального вулканизма в пределах склонов Плоских и Толбачинских вулканов авторами не исключается.

Список литературы

1. Аверко Е. М., Балеста С. Т. Обработка результатов сейсмического моделирования очага вулкана.— «Геология и геофизика», 1970, № 8, с. 107—113 с ил.
2. Белоносова А. В., Алексеев А. С. Об одной постановке обратной кинематической задачи сейсмоки для двухмерной непрерывно-неоднородной, среды. В кн.: Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных. М., «Наукам 1967, с. 137—154 с ил.
3. Белинский В. В. Дегазация вещества верхней мантии как основной фактор магомобразования.— «Геология и геофизика», 1970, № 1, с. 10—21 с ил.
4. Галкин И. Н. Построение моделей земной коры. М., «Наука», 1972, 123 с. сил.
5. Геологическое строение Авачинского вулкана по геофизическим данным. В кн.: Вулканизм и глубинное строение Земли. М., «Наука», 1966, с. 49—56 с ил. Авт.: Г. С. Штейнберг, С. Т. Балеста, М. И. Зубин, А. А. Таракановский.
6. Горшков Г. С. Некоторые вопросы теории вулканологии.— «Известия АН СССР, сер. геол.», 1958, № 11, с. 21—27 сил.
7. Горельчик В. И., Фарберов А. И. Некоторые особенности глубинного строения вулканических областей по сейсмическим данным. В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М., «Наука», 1971, с. 107—113 с ил.
8. Двали М. Ф. Геологическое строение и нефтегазоносность восточной Камчатки. М., Гостоптехиздат, 1955, 266 с. с ил. (Труды ВНИГРИ, вып. 16).
9. Епинатьева А. М., Попова О. Г. Сейсмические волны в осадочных средах с большими вертикальными градиентами скорости.— В кн.: Геофизический сборник, № 43. Киев, «Наукова думка», 1971, с. 12—121 с ил.
10. Зобин В. М. Некоторые особенности распространения поперечных сейсмических волн в районе Ключевской группы вулканов.— В кн.: Мат-лы первой городской конференции молодых ученых и специалистов. Петропавловск-Камчатский, 1960, с. 21—25.
11. Зубин М. И., Иванов Б. В., Штейнберг Г. С. Глубинное строение Карымского вулкана на Камчатке и некоторые вопросы генезиса кальдер.— «Геология и геофизика», 1971, № 1, с. 73—81 с ил.
12. Косминская И. П. Основы глубинного сейсмического зондирования М., «Наука», 1968, 227 с. с ил.
13. Извержение вулкана Безымянного весной 1961 г.— «Бюллетень вулканологической станции», № 34. 1963, М., Изд-во АН СССР, с. 12—35 с ил. Авт.: Е. К. Мархинин, П. И. Токарев, В. Б. Пугач, Ю. М. Дубик.
14. Куно Х. Латеральная вариация базальтовой магмы вкост краин континентов и островных дуг. В кн.: Краины континентов и островных дуг. М., «Мир» 1970, с. 249—262 с ил.
15. Лучицкий И. В. Основы палеовулканологии. Т. II. М., «Наука», 1971, 382 с. с ил.
16. Мархинин Е. К. Кальдеры и периферические вулканические очаги. Алма-Ата, 1969, с. 121—129 с ил. (Труды лаборатории палеовулканизма, вып. 3).

17. Мар хинин Е. К., Альпова О. М. О статье Г. С. Горшкова «Некоторые вопросы теории вулканологии». — «Известия АН СССР, сер. геол.», 1961, № 5, с. 101—103 с ил.
18. Мархинин Е. К., Стратула Д. С. Некоторые петрологические, геохимические и геофизические аспекты связи вулканизма с глубинами Земли. В кн.: Вулканизм и глубины Земли, М., «Наука», 1971, с. 11—16 с ил.
19. Мархинин Е. К., Стратула Д. С., Абдурахманов А. И. О корреляции содержания Al_2O_3 в лавах исторических извержений побочных кратеров Ключевской сопки и высотных отметок кратеров. В кн.: Тектоника дна морей, океанов и островных дуг, вып. 9. Южно-Сахалинск, 1972, с. 3. (Тезисы доклада к IX конференции по тектонике).
20. О возможных причинах выноса калия из недр Земли и значение этого для геотермики. — «Физика Земли», 1968, № 2, с. 3—7. Авт.: В. К. Марков, Ю. Н. Рябинин, И. С. Делицин, В. П. Петров.
21. Пийп Б. И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944—1945 гг. и в прошлом. Тр. Лаборатории вулканологии, вып. 11. М., Изд-во АН СССР, 1956, 309 с. с ил.
22. Родионова Р. И., Федорченко В. И. Ксенолиты, возможный состав верхней мантии и глубины магматических очагов в пределах континентов, океанов и островных дуг. В кн.: Тектоника дна морей, океанов и островных дуг, вып. 4. Южно-Сахалинск, 1972, с. 12—16.
23. Сигимура А. Состав первичных магм и сейсмичность мантии Земли в области островных дуг. В кн.: Окраины континентов и островные дуги. М., «Мир», 1970, с. 263—270 с ил.
24. Тараканов Р. З. К вопросу о расположении в верхней мантии вероятных областей магмообразования. В кн.: Вулканизм, гидротермы и глубины Земли. Петропавловск-Камчатский, 1969, с. 9.
25. Тимербаева К. М. Петрология Ключевских вулканов на Камчатке. М., «Наука», 1967, 207 с. с ил.
26. Токарев П. И. Сейсмичность и глубинное строение Камчатки. В кн.: Геология зоны перехода от Азиатского материка к Тихому океану. М., «Наука», 1968, с. 197—211.
27. Федорченко В. И. Геолого-петрографические особенности четвертичных вулканов Курильских островов и их возможная глубинная обусловленность. В кн.: Тектоника дна морей, океанов и островных дуг, вып. 9. Южно-Сахалинск, 1972, с. 47—53.
28. Федотов С. А., Фарберов А. И. Об экранировании поперечных сейсмических волн и магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов. В кн.: Вулканизм и глубинное строение Земли. М., «Наука», 1966, с. 43—48 с ил.
29. Фирстов П. П., Широков В. А. Локализация корней вулканов Ключевской группы по сейсмическим данным. В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М., «Наука», 1971, с. 113—117 с ил.
30. Kubota S., Berg E. Evidence for magma in Katmai volcanic range. «Bull. volcanologique», v. 31, N 175, 1967, pp. 175—214, ill.
31. Kuno H. Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas «Bull. volcanologic», ser. 11, v. 20, 1959, pp. 37—76, ill.