

Глубинное строение Южной Камчатки по геофизическим данным

Ю.Ф. Мороз, Л.И. Гонтовая

Опубликовано: Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск -Камчатский, 2001 г., 428с.; УДК 551.21+552+550.34

Приводятся результаты геофизических исследований, выполненных на Южной Камчатке. Выявлены особенности глубинного строения земной коры и верхней мантии до глубины 90 км. Установлена четкая корреляция скоростных структур суши и акватории шельфовой зоны Тихого океана. Создана комплексная геолого-геофизическая модель Авачинского вулкана. Рассмотрены возможные геодинамические процессы, протекающие в земной коре в настоящее время. Даны рекомендации для бурения глубокой скважины в районе Авачинского грабена с целью поисков геотермального месторождения.

Представления о глубинном строении Камчатки последовательно развиваются по мере накопления геолого-геофизических данных. В последние годы в пределах Южной Камчатки выполнен значительный объем исследований методами сейсмологии и магнитотеллурического зондирования. Полученные данные дают возможность в значительной мере уточнить глубинное строение данного района в целом, а также Авачинско-Корякской группы вулканов в частности. Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

1. Глубинная геофизическая модель литосферы Южной Камчатки

Результаты предшествующих геофизических исследований методами гравиметрии, сейсмометрии и магнитотеллурических зондирований обобщены и представлены в виде разреза земной коры и верхней мантии вдоль геотранверса I-I, пересекающего сушу и прилегающую акваторию Авачинского залива (рис.1). Исследуемый район полуострова характеризуется сложным геологическим строением [7,33,34]. Здесь в отличие от всей его территории, где преобладает линейная зональность тектонических сооружений северо-восточного простирания, развиты также структуры северо-западной поперечной ориентировки (рис.2). В этой части Южной Камчатки выведены на поверхность наиболее древние метаморфические породы, с которыми связывается консолидированный фундамент, подстилающий осадочно-вулканогенный чехол. Восточный вулканический пояс в районе геотранверса представлен Авачинско-Корякской группой вулканов.

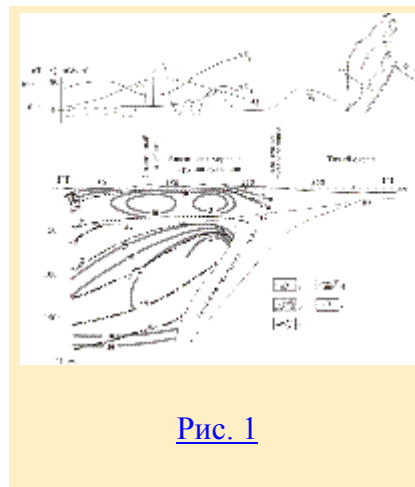


Рис. 1



Рис. 2

Основные особенности глубинного строения Камчатки обусловлены близостью к сейсмофокальной зоне (СФЗ). Ширина этой зоны на поверхности составляет около 200 км. Линия максимальной сейсмичности проходит по восточным полуостровам и заливам и приурочена к глубинам 0-40 км. Проекциям вулканов на СФЗ отвечает область с резким уменьшением числа землетрясений. Для Авачинско-Корякской группы вулканов эти глубины составляют около 100 км. Предполагается, что особенности вулканизма обусловлены процессами, происходящими в сейсмофокальном слое или его верхней части [29].

Существующие представления о характере изменения сейсмических скоростей V_p в верхней мантии основаны на данных сейсмологических наблюдений [3,4,22,28]. Упругие параметры под Камчаткой изменяются сложным образом, однако в среднем они относительно низкие и в самой верхней части составляют около 7,8 км/с (рис.1). Их значения увеличиваются в сторону океана и северо-западной половины полуострова. Низкоскоростная зона в районе современного вулканизма приподнята до глубины не менее 50 км. По-видимому, скоростные аномалии в верхней мантии отражают процессы, протекающие в зоне

субдукции. В районах современного вулканизма нижняя часть коры и верхней мантии характеризуется пониженной скоростью и повышенным затуханием сейсмических волн [22,28,31,32].

По данным магнитотеллурических зондирований установлено, что земная кора содержит слой повышенной электропроводности на глубинах 10-40 км [14]. Этот слой развит под средней частью полуострова и вытянут вдоль Камчатки на расстояние свыше 1000 км. Он приурочен к внутренней вулканической дуге. Здесь слой приближается к дневной поверхности до глубины 8-10 км, а его электропроводность максимальна. Под современными вулканами выделяются локальные аномалии повышенной электропроводности. Верхняя часть коры восточного побережья характеризуется повышенным электрическим сопротивлением. Не исключено, что средняя часть коры также содержит слой пониженного сопротивления. Однако проводимость этого слоя на порядок меньше, чем под Центральной частью Камчатки [14,17].

В верхней мантии выявлен слой пониженного электрического сопротивления. Кровля слоя с глубины 100 км на Западной Камчатке поднимается до 50 км под зоной современного вулканизма. При этом электрическое сопротивление слоя уменьшается до первых единиц Ом·м. В сторону Тихого океана проводимость верхнемантийного слоя существенно убывает. Поверхность этого слоя, по-видимому, близка к изотерме 1200⁰С и представляет собой границу, ниже которой возможно частичное плавление вещества. Данная граница была принята опорной при расчете геотермического разреза с помощью кривых распределения температур для миогеосинклиальной и эвгеосинклиальной зон [23].

Как следует из геотермического разреза, проводящие зоны в земной коре приурочены к интервалу геоизотерм 400-800⁰ (рис.1). Известно, что породы земной коры при таких температурах имеют электрическое сопротивление сотни-тысячи Ом·м. Поэтому природу проводящих зон в земной коре Камчатки сопротивлением в первые десятки-единицы Ом·м можно связать с наличием жидких флюидов и электропроводящих сульфидных образований.

Приведенные данные свидетельствуют об очень сложном строении литосферы Камчатки и необходимости более детального изучения глубинных неоднородностей.

Модель электропроводности земной коры

В последние годы на Южной Камчатке выполнены наблюдения МТЗ по двум региональным профилям, которые дают возможность в значительной мере уточнить и дополнить существующие представления о структуре электропроводности земной коры. Методика интерпретации и анализ результатов данных МТЗ подробно изложены в работе [17]. Полученные результаты приведены на рис.3. Они сводятся к следующему.

Геоэлектрическая модель содержит коровый проводящий слой, хорошо развитый на большей части площади, за исключением восточного побережья, где он почти отсутствует. Сопротивление слоя от 5-10 Ом·м на западе увеличивается до 80 Ом·м в центральной части профиля, при этом его мощность уменьшается до 15 км. Далее к востоку, в районе Авачинско-Корякской группы вулканов, происходит уменьшение сопротивления коры до 15 Ом·м на глубине 8-35 км. Здесь из-за сильного эффекта S (узкая проводящая зона в осадочно-вулканогенном чехле) параметры корового проводника определяются неоднозначно. Восточнее по профилю сопротивление корового слоя возрастает до 200 Ом·м, мощность составляет 25 км.

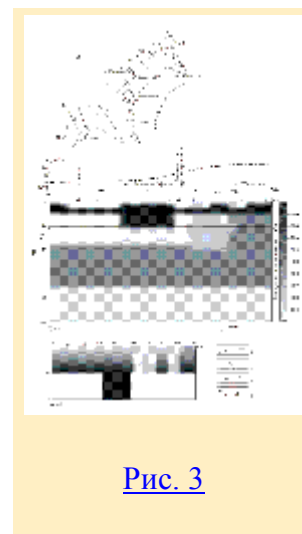


Рис. 3

Относительно природы корового проводящего слоя можно отметить следующее. Электрическое сопротивление верхних частей консолидированной коры 1000-2000 Ом·м. При нормальном распределении глубинной электропроводности нижние толщи земной коры имеют удельное сопротивление не менее 500 Ом·м [5,14], поэтому природу проводящего слоя в земной коре Южной Камчатки сопротивлением в десятки-единицы ом на метр можно объяснить наличием жидких флюидов. Грубые оценки показывают, что достаточно десятых долей процента относительно объема флюидов в связанных каналах, чтобы обеспечить уменьшение сопротивления горной породы до десятков - единиц ом на метр. Можно предполагать, что на большей части площади коровый проводящий слой связан с наличием высокоминерализованных гидротермальных растворов. В зоне V (рис.3), где располагается Авачинско-Корякская группа вулканов, коровый проводник может быть обусловлен наличием магматических расплавов. В восточной части профиля отсутствует низкоомный коровый проводник; здесь же отмечена интенсивная положительная аномалия поля силы тяжести.

По данным электропроводности можно оценить пористость и проницаемость пород земной коры Южной Камчатки. Для этого воспользуемся данными работ [5,6]. Согласно закону Арчи

$$\rho = \rho_{\phi} / k^2$$

где ρ - удельное сопротивление влажной породы, ρ_{ϕ} - удельное электрическое сопротивление флюида; k - пористость. При $\rho = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ значение $\rho_{\phi} = 0,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, пористость верхних частей земной коры до глубины 10 км равна 0,8%. Эта величина близка к данным по северо-западу США, полученным Л.Л.Ваньяном. О проницаемости верхних частей консолидированной земной коры можно судить по зависимости удельного сопротивления влажных пород от их проницаемости [36]. При сопротивлении коры в $1400 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ проницаемость ее $\sim 10^{-21} - 10^{-22} \text{ м}^2$. При такой проницаемости время проникновения флюида из корового слоя в верхние горизонты земной коры будет $\sim 50 \text{ млн. лет}$. Возраст вулканизма Авачинско-Коряжской группы вулканов составляет первые миллионы лет. По-видимому, более быстрое проникновение флюидов в верхние горизонты коры в данном районе определяется наличием глубинных разломов. Уже указано, что в зоне V электропроводность коры между осадочно-вулканогенным чехлом, заполняющим грабен, и коровым слоем определяется крайне неоднозначно. Не исключается, что здесь существует вертикальный проводник, обусловленный глубинными разломами, по которым магматические расплавы поступают на поверхность. Возможно, с этими разломами связана современная вулканическая деятельность Авачинско-Коряжской группы вулканов.

Объемная скоростная модель

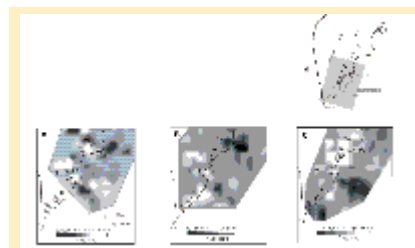
Несмотря на значительный объем сейсмической информации, в настоящее время практически отсутствует скоростная модель Камчатки, включающая области омывающих ее акваторий. Сейсмические наблюдения ГСЗ-КМПВ выполнены в наземной части полуострова с использованием методики кусочно-непрерывного профилирования с большими пропусками в наблюдениях [2,8,9 и др.]. Они были сосредоточены, в основном, в районах Авачинско-Коряжской и Ключевской групп вулканов, т.е. территория Камчатки в целом слабо изучена этими методами. Кроме того, длина сейсмических профилей не позволила выполнить корректные оценки скоростных параметров по поверхности Мохоровичича (М). По этой причине остается открытым вопрос о мощности коры под Камчаткой и сейсмических характеристиках зоны перехода кора-мантия. Более длинные ветви годографов получены по наземно-морскому профилю, пересекающему Авачинский залив [8,27 и др.], однако полученные результаты по ряду причин (в основном, редкой сети наблюдений) также крайне противоречивы [1]. Кроме того, следует отметить большие сложности в выполнении сейсмических наблюдений за сигналами от взрывов и необходимость огромных финансовых вложений, что практически делает невозможным их осуществление в настоящее время. Вместе с тем на Камчатке существует детальная сеть сейсмологических станций, которые регистрируют тысячи землетрясений, просвечивающих земную кору и верхнюю мантию под полуостровом и прилегающими акваториями. Эти данные также мало использованы для оценок скоростных параметров. Это, безусловно, было связано со значительными ошибками в определении координат гипоцентров землетрясений и отсутствием вычислительного аппарата для решения обратной трехмерной задачи. Видимо, по этой причине существуют лишь единичные работы, благодаря которым получены первые схемы распределения скорости V_p под Камчаткой и акваториями, а также в области пересечения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг [3,22,28]. Эти работы продемонстрировали четкую корреляцию скоростных аномалий с глубинной тектоникой региона и подтвердили перспективность развития данного направления на Камчатке.

Здесь приведены результаты томографического восстановления объемной скоростной модели земной коры и верхней мантии Камчатки в ее южной части. Для этого использовались времена вступления Р-волн от близких землетрясений, которые, в основном, сосредоточены в сейсмофокальном слое. Они взяты из инструментального каталога землетрясений Камчатки (в окончательной обработке) за период 1992-1998 гг., составленный Камчатской опытно-методической сейсмологической партией (КОМСП) ГС РАН. Количество зарегистрированных событий в каталоге ~ 13000 , сейсмических лучей, просвечивающих кору и мантию от гипоцентров до станций, ~ 100000 . Однако объем использованной информации был значительно ограничен точностью входных данных, которая в общем достаточно низкая. Причина и области ошибок детально проанализированы в [30]. Для расчетов были выбраны землетрясения, точность определения времени в очаге для которых не достигала 0,4 сек, точность определения координат эпицентров не превышала по горизонтали $\pm 20 \text{ км}$ и по вертикали $- \pm 10 \text{ км}$. Также накладывались ограничения по энергетическому классу ($K \geq 11$), четкости вступления Р и S волн, числу станций, участвующих в определении гипоцентров, T_0 и др. В обработку принимались события с глубиной, не превышающей 45 км. В связи с этим глубина проникновения сейсмических лучей для выбранных событий не превышала 90 км. Эта цифра ограничивает скоростную модель по глубине. Исходя из перечисленных выше ограничений, из каталога было выбрано только 1400 землетрясений. На основе анализа осредненных наблюдаемых годографов для выбранных событий выполнена оценка средней мощности земной коры под Камчаткой и весь объем литосферы разбит на три слоя:

- 0-20 км (верхняя кора), средняя скорость в слое 5,5 км/с;
- 20-35 км (нижняя кора), средняя скорость в слое 7,0 км/с;
- 35-90 км (слой верхней мантии), средняя скорость в слое 8,0 км/с.

Исходя из точности входных данных, горизонтальный размер блоков, в которых определяется значение невязки скорости (V_p), составляет 50x50 км. Методика решения томографической задачи изложена в [18]. Многократным перемещением расчетной схемы значения V_p получены в ячейках, составляющих по горизонтали ~ 17x17 км. Расчеты выполнены совместно с сотрудниками ОИФЗ РАН И.А.Саниной и М.Ю.Степановой.

Фрагменты восстановленной трехмерной скоростной модели (для района Южной Камчатки) представлены на [рис.4](#). Они иллюстрируют существенно новую информацию о распределении скоростных неоднородностей изученного объема среды. Поля невязок свидетельствуют о резкой скоростной дифференциации литосферы под Камчаткой, анизотропии упругих параметров, различии структурных планов скоростных аномалий земной коры и слоя верхней мантии. В целом поля невязок в слоях можно разбить на отдельные зоны (блоки), которые характеризуются различными скоростными свойствами. На рис. 4а нанесены примерные границы этих блоков, которые в пределах Южной Камчатки мы будем именовать согласно [33].

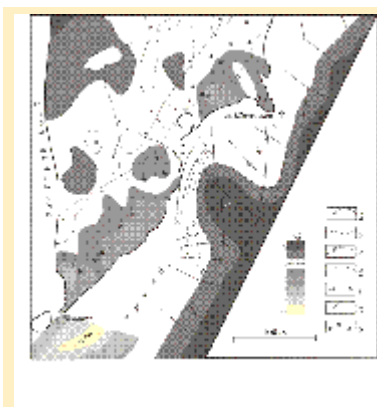


[Рис. 4](#)

В верхней коре (0-20км) значения скорости V_p изменяются от 5,2 до 6,0 км/с. Скоростные аномалии, имеющие изометрическую форму, вытянуты в цепочки, ориентированные вкост простирания Камчатки ([рис.4А](#)). Они имеют продолжение в акватории. Северная из них, которая характеризуется наиболее высокой скоростью, располагается в районе мыса Шипунский. В южной части выделяется цепочка аномалий пониженной скорости. Она пересекает сушу и продолжается в шельфовой зоне в районе Мутновско-Вилючинского блока. В акватории (на продолжении Асачинского блока) она граничит с аномалией повышенных значений скорости.

В нижней коре (20-35км) выделяется высокоскоростная аномалия в районе Шипунского блока ([рис.4В](#)). Здесь отмечены наиболее высокие значения скорости V_p (6,7км/с). Южнее Авачинского блока слой нижней коры является низкоскоростным, при этом низкие значения скорости характерны как для района Восточно- Камчатского вулканического пояса, так и Центральной депрессии и шельфовой зоны. Следует отметить корреляцию высокоградиентной скоростной зоны в южной части Авачинского залива по всей мощности коры. Она располагается примерно на продолжении Асачинского блока в океан. Последний, согласно [33], расположен на границе зоны перехода Южной Камчатки к структурам Центральной части полуострова. Согласно полученным данным она продолжается в акватории.

В слое верхней мантии (35-90км) выделяются две области (блоки), различные по скоростным свойствам ([рис.4С](#)). Граница между ними проходит ~ на уровне Вилючинско-Мутновской группы вулканов. Северный блок характеризуется пониженными значениями скорости. Здесь располагаются действующие вулканы (в частности, Авачинско-Корякской группы). Слой верхней мантии в южном блоке в целом более высокоскоростной. При этом самые высокие значения скорости отмечены в южной части акватории Авачинского залива и самой южной оконечности полуострова.



[Рис. 5](#)

Анализируя поля невязок в целом по всей изученной мощности литосферы, можно сделать вывод, что высокоградиентную зону, разделяющую Южную Камчатку на суше и в акватории на две различные по упругим свойствам области, можно характеризовать как сквозькоровый глубинный разлом, имеющий продолжение в мантии. Обращают на себя внимание некоторые закономерности в распределении вулканических групп на скоростных схемах. Так в верхней коре они, как правило, приурочены к границам раздела контрастных скоростных неоднородностей и не обязательно связаны с низкоскоростными аномалиями. В связи с этим можно согласиться с выводами, сделанными в [34], что в соотношении вулканизма с тектоникой примат принадлежит последней. В поле невязок скорости верхней мантии тоже не наблюдается связи вулканов с определенными аномалиями. В северной части они связаны с низкоскоростной мантией (~7,3-7,5км/с), а в южной-нормальными значениями V_p (~8,0км/с).

Обратимся к сопоставлению полученных результатов с данными других геолого-геофизических исследований. Северо-западное простирание цепочек скоростных аномалий в верхней коре находит отражение на суше в виде Петропавловск-Малкинской зоны поперечных дислокаций [7]. На поперечное простирание третичных структур в свое время обратил внимание А.Н.Тихонов [7]. Этот вопрос широко дискутировался в научной литературе, и предполагается, что северо-

западное простирание меловых и более древних структур не является доминирующим. Однако, из приведенных выше скоростных моделей видно, что в изученном блоке литосферы Южной Камчатки и прилегающей акватории развиты структуры северо-западного простирания, которые, возможно, имеют продолжение в Тихий океан. Следует отметить, что аномалиям пониженных скоростей в земной коре на юге Авачинского залива отвечают аномалии пониженных значений поля силы тяжести, обусловленных отрицательной структурой в рельефе океанического дна ([рис.5](#)) [21].

В нижней части земной коры сохраняются аномалии повышенных скоростей в районе Шипунского и Асачинского блоков. Аномалия в районе м.Шипунский также выражена повышенным электрическим сопротивлением и полем силы тяжести. На основании этого можно предполагать, что здесь земная кора по всей мощности насыщена более плотными породами, по-видимому, поступившими из верхней мантии.

В верхней мантии область пониженных скоростей в районе вулканов Авачинско-Корякской группы выражена также повышенной электропроводностью, что связывается с подъемом астеносферного слоя до глубины 50 км (см. [рис.1](#)). Аномальные свойства верхней мантии на глубинах 35-90 км могут быть обусловлены наличием магматических расплавов.

2. Глубинное строение района Авачинско-Корякской группы вулканов

Современные вулканы располагаются в районах, где наиболее активно протекают геодинамические процессы в литосфере, выраженные повышенной сейсмичностью, магматизмом и гидротермальной активностью. Изучение глубинного строения современных вулканов имеет важное значение для развития теоретической геологии и геодинамики. Практическое значение имеет поиск геотермальных месторождений, связанных с магматическими очагами, питающих вулканы. На Южной Камчатке геофизическими методами наиболее изучен район Авачинско-Корякской группы вулканов, расположенный ~ в 50км от г.Петропавловск-Камчатский. Действующими и наиболее крупными из вулканов этой группы являются Корякский и Авачинский. Вулканические постройки сложены четвертичными и современными эффузивно-пирокластическими образованиями. Они приурочены к Авачинской депрессии, выполненной палеоген-неогеновыми вулканогенно-осадочными породами. Депрессия является составной частью так называемой Петропавловск-Малкинской зоны поперечных дислокаций, имеющей северо-западное простирание. Большую роль в строении зоны играют разломы северо-западной ориентировки, определяющие ее блоковое строение [7]. В районе Авачинско-Корякской группы вулканов проведены гравиметрические [13], сейсмологические [2,8,9 и др.], и электромагнитные [12,14,17] исследования. К настоящему времени мы располагаем большим объемом геофизических данных, комплексный анализ которых с привлечением современных методик дает возможность разработать глубинную модель земной коры района Авачинско-Корякской группы вулканов и протекающих здесь геодинамических процессов.

Сейсмологические исследования

Результаты сейсмологического "просвечивания" литосферы под Авачинско-Корякской группой вулканов позволили предположить существование на глубинах 20-90 км одной или двух неоднородностей, обусловивших затухание сейсмических волн от камчатских землетрясений [10,31,32 и др.]. В области границы М она предположительно имеет вытянутую форму, совпадающую по простиранию с вулканической группой. Согласно нашим построениям, изложенным выше, этот район приурочен к низкоскоростной мантии и располагается в зоне высоких градиентов скорости V_p в верхней коре. Эти данные не противоречат полученным ранее, так как значения скорости под вулканами практически совпадают и сохраняется простирание предполагаемых аномалий затухания и зон высоких градиентов V_p .

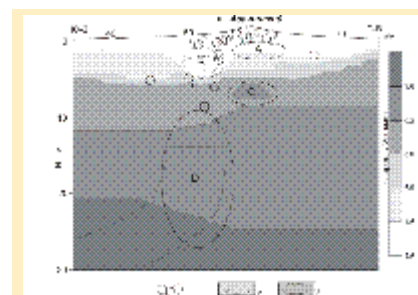


Рис. 6

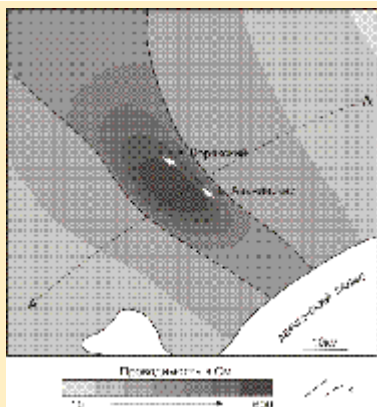


Рис. 7

В 80-90-е годы в районе Авачинско-Коряжской группы вулканов выполнены сейсмические исследования с использованием землетрясений и взрывов [2,8,9,15 и др.]. На сейсмическом разрезе выделены зоны аномальных значений скорости (V_p) и поглощения Р-волн (рис.6). Зона А характеризуется повышенным поглощением высокочастотной части спектра сейсмических сигналов. Подошва этой зоны располагается не глубже, чем 3 км и, очевидно, представлена смесью твердой и расплавленной фаз глубинного вещества. Выделение зоны В обусловлено наличием в нижней части Авачинской депрессии мощного волновода с пониженными (~ на 6% относительно вмещающей толщи пород) значениями скорости V_p . Зона С характеризуется повышенными значениями V_p (до 6,6-6,7 км/с), что может быть связано с глубинной высокоскоростной интрузией. Зона Д выделена как область относительно пониженных значений скорости V_p в средней части коры под конусом вулкана. Между зонами Д и С отмечено отсутствие отражающих площадок. В целом, распределение отражающих площадок по разрезу различно. В верхней части они залегают согласно сейсмическим границам, а с глубины ~ 10 км - практически выполаживаются. Это соответствует существующим представлениям о природе сейсмических разделов в земной коре и может свидетельствовать о повышенной трещиноватости пород на этой глубине [9,20].

Возможно, выделенная на разрезе зона повышенной скорости в коре - это область, в которой трещины "закрыты" остывшим магматическим расплавом, поступившим сюда из корового магматического очага. На рис.6 также отмечены некоторые особенности сейсмичности района Авачинского вулкана в период его активизации в 1994 и 1997 гг. Из этих данных видно, что основная масса землетрясений происходит в конусе вулкана и в пределах Авачинского грабена до глубины ~ 10 км. Можно предположить, что грабен представляет собой разлом, в котором в настоящее время протекают активные тектонические процессы. Важно отметить, что за рассматриваемый период практически не отмечены землетрясения в нижней части Авачинского грабена. Их основная масса располагается в грабене до глубины ~ 3 км (в частности, за период 1997 г.) и глубже 5-6 км уже в кристаллической коре. Отсюда можно сделать вывод, что в основании грабена существуют какие-то специфические условия, в которых породы находятся либо в состоянии повышенной пластичности, либо трещиноватости с заполнением трещин жидким флюидом. Этим можно объяснить понижение скорости V_p в основании грабена.

Электромагнитные исследования

По данным региональных исследований методами магнитотеллурического (МТЗ) и вертикального электрического (ВЭЗ) зондирования получено представление об обобщенном геоэлектрическом разрезе региона [15]. В верхней части разреза залегают четвертичные вулканогенные и осадочные образования сопротивлением сотни-первые тысячи Ом м и более, мощностью первые сотни метров. Ниже залегает кайнозойская толща со средним продольным сопротивлением от десятков до первых сотен Ом м. Консолидированный фундамент имеет сопротивление тысячи Ом м. Глубинная часть разреза содержит коровый и астеносферный проводящие слои.

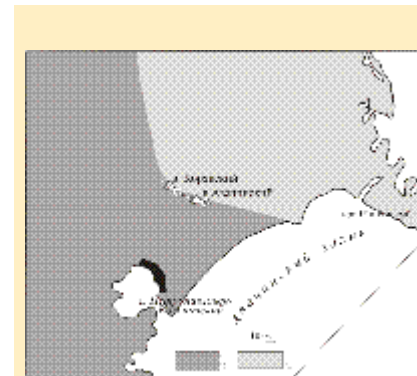


Рис. 8

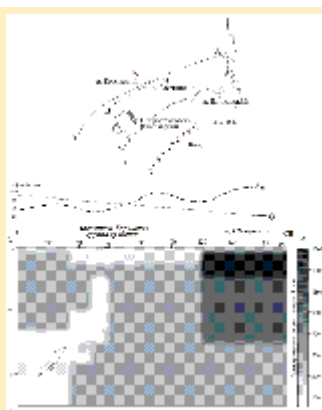


Рис. 9

В последние годы в районе Авачинско-Коряжской группы вулканов выполнен большой объем более детальных площадных исследований МТЗ, позволяющих получить дополнительную информацию об электропроводности земной коры. Методика и результаты качественной интерпретации МТЗ рассмотрены в [14]. Для изучения глубинной электропроводности использовано около 1000 МТЗ. По данным интерпретации кривых МТЗ получена карта интегральной проводимости осадочно-вулканогенного чехла, перекрывающего кристаллический фундамент (рис.7). На этой карте выделена зона повышенной проводимости, имеющая северо-западное простираение. Ширина зоны меняется от 10 км на юго-востоке до 30 км на северо-западе. Выявленная зона связывается с грабеном, выполненным преимущественно терригенными отложениями. В районе Авачинско-Коряжской группы вулканов отмечается максимальная проводимость зоны до 600 См, что может быть обусловлено наличием жидкой фазы (растворов и магматических расплавов). По результатам интерпретации кривых МТЗ составлена также схема глубинной электропроводности исследуемой

площади. Последняя районирована на две области с различной электропроводностью земной коры: юго-западную и северо-восточную (рис.8). Первая содержит коровый слой повышенной электропроводности. Вторая отмечается пониженной электропроводностью верхней части коры.

Полученные результаты уточнены с помощью численного двумерного моделирования. Для данной цели выбран профиль АА протяженностью около 160 км (рис.9). Он ориентирован примерно вдоль СФЗ. Из рисунка видно, что в юго-западной части выделяется коровый слой повышенной электропроводности сопротивлением 10-20 Ом·м. Кровля слоя поднимается с глубины 25 км на юго-западе до глубины 10 км под современными вулканами. Здесь осадочно-вулканогенный чехол содержит аномалию с пониженным сопротивлением 8 Ом·м до глубины 6 км. Эта аномалия фиксирует грабен, выполненный преимущественно проводящими породами. Современные вулканы приурочены к бортовой части грабена. Земная кора северо-восточной части профиля не содержит коровых проводников. Она отличается повышенным электрическим сопротивлением в районе Шипунского п-ова.

Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных

Глубинная геоэлектрическая модель района сопоставлена с графиками поля силы тяжести и теплового потока (рис.9). Высокое электрическое сопротивление верхних частей литосферы на северо-восточном окончании профиля соответствует повышенному уровню поля силы тяжести. Это можно объяснить тем, что в районе Шипунского полуострова верхняя часть земной коры сложена породами с повышенной плотностью. Состав этих пород близок к ультраосновным. В поле силы тяжести в виде аномалий более высокого порядка также проявились структуры верхней части земной коры, сложенные породами, различными по своему фациальному составу и плотности.

По сейсмическим и гравитационным данным с помощью трехмерного гравитационного моделирования получена объемная упруго-плотностная модель (рис.10). Для моделирования использовались материалы гравиметрической съемки, сведения о скоростных и плотностных свойствах пород и их корреляции по данному району и миру [15]. Модель дает представление о строении блока литосферы размерами 70x70x50 км. В верхней части земной коры выделена отрицательная интенсивная аномалия северо-западного простираения, фиксирующая Авачинский грабен. Эта аномалия продолжается до глубины ~30 км. С увеличением глубины форма аномалии становится более изометрической. При этом простираение изолиний меняется от северо-западного в верхней коре до субмеридианального - в нижней, и северо-восточного - в верхней мантии. Коровая аномалия пониженных значений упруго-плотностных свойств в общих чертах соответствует коровой аномалии повышенной электропроводности. По-видимому, аномалии отражают существование в земной коре разлома, насыщенного жидкими флюидами. В осадочно-вулканогенном чехле он выражен в виде грабена, заполненного мощной толщей слабоуплотненных, низкоскоростных, проводящих образований. Из упруго-плотностной модели видно, что северо-западную ориентировку имеют только структуры верхних частей земной коры. Верхняя мантия характеризуется северо-восточным простираением изолиний упруго-плотностных свойств, отвечающим простираению СФЗ.

Рассмотрим фоновый тепловой поток в связи с глубинными процессами по направлению с юго-запада на северо-восток в сторону м. Шипунский (рис.9) [24,25]. Из рисунка видно, что он уменьшается почти в два раза. Это свидетельствует о том, что в юго-западной части площади породы земной коры могут быть разогреты сильнее, чем в северо-восточной. В результате повышенного разогрева активно проявились процессы дегидратации, плавления пород земной коры и вынос большого объема магматического материала на дневную поверхность. В земной коре, по-видимому, сформировалась проницаемая зона, насыщенная гидротермальными растворами. Это в полной мере можно отнести к самой западной части профиля, где на поверхности возраст магматических пород оценивается в первые десятки млн.лет. Оценки показывают, что за такой период тепло от глубинного источника может проникнуть через всю земную кору и достичь земной поверхности. В результате здесь фиксируется повышенный тепловой поток в приповерхностных частях земной коры. Однако, в районе Авачинско-Корякской группы вулканов подъему проводящей зоны до глубины 10 км отвечает тепловой поток, близкий к "нормальному". Возраст магматизма в данном районе составляет первые млн.лет. За этот период, по-видимому, кондуктивный тепловой поток от глубинного источника еще не проник в полной мере в земную кору. Следовательно, динамические процессы здесь не получили такого развития, как на юго-западе в Центрально-Камчатской вулканической зоне. В районе Авачинских вулканов, вероятно, преобладают конвективные формы переноса тепла в виде магматических расплавов и гидротермальных растворов, что находит отражение в подъеме проводящей зоны. При этом повышенная проводимость отмечается непосредственно под действующими вулканами.

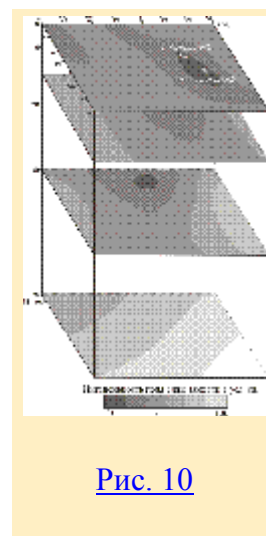


Рис. 10

Глубинная модель района Авачинского вулкана

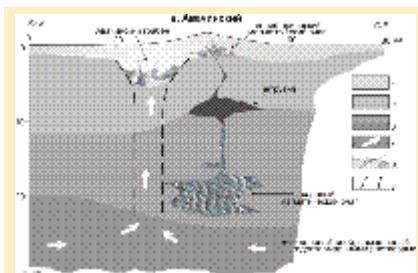


Рис. 11

На основе рассмотренных результатов с привлечением данных о тепловом потоке, магматизме и т.д. создана глубинная геолого-геофизическая модель Авачинского вулкана, изображенная на [рис.11](#). Модель включает коровую зону повышенной трещиноватости (проницаемости) с наличием гидротермальных растворов. Земная кора на глубине 15-25 км содержит магматический очаг. Выше, на глубине 6-10 км расположена интрузия. Непосредственно под конусом вулкана находится периферический магматический очаг на глубине ~ 0-2 км. В верхних частях земной коры выделяется Авачинский грабен. В отложениях нижней части разреза он содержит, по-видимому, жидкие флюиды.

Рассмотрим возможные геодинамические процессы в районе Авачинского вулкана. Коровый магматический очаг образовался, по-видимому, в один из циклов магматической активизации Камчатки, когда глубинное вещество проникло в земную кору. Здесь на уровне ~ 15-25 км образовалась магматическая камера. Процессы поступления и накопления магмы сопровождались плавлением пород. Преимущественный состав лав, излившихся на поверхность, средний и основной. Породы представлены базальтами, андезито-базальтами, андезитами и дацитами. Наиболее распространены андезито-базальты. На мантийный источник первоначальных магм указывают ксенолиты, представленные периодотитами и пироксенитами. Верхняя часть магматического очага на глубине 6-10 км уже застыла и является интрузией. Она перекрывает существующий коровый магматический очаг и, по-видимому, в значительной мере затрудняет поступление магмы в периферический очаг в основании конуса вулкана.

Предполагается, что в настоящее время важную роль в процессах, протекающих в районе вулкана, играет коровая зона повышенной проницаемости (глубинный разлом), по которой гидротермальные растворы поднимаются с глубины 25-35 км. Эти растворы, поступая в верхние части земной коры, существенно понижают температуру плавления кислых и средних пород. В результате образуются магматические расплавы в зоне корового магматического очага. По узким каналам они проникают вверх в районе грабена и подпитывают периферический очаг в основании конуса вулкана. Не исключается также поступление магмы непосредственно вверх из корового очага в периферический. Однако этот вариант менее вероятен, так как на пути магмы - зона повышенной плотности пород, и для ее проплавления необходима большая дополнительная энергия, которая возможна лишь во время следующего цикла магматической активизации и интенсивного притока магмы из более глубоких источников. Мы приходим к выводу, что в настоящее время в период затишья магматической активности происходит накопление жидких флюидов в Авачинском грабене и их поступление в периферический очаг. В результате возникновения избыточных давлений, достаточных для вскрытия пробки в кратере, закупоривающей магмовыводящий канал, может произойти слабое извержение вулкана с выходом лавы. По-видимому, такое извержение было в феврале 1991 года.

Следует отметить, что выявленная в Авачинском грабене зона, насыщенная жидкими флюидами, вызывает повышенный интерес к геотермальным источникам тепла с целью обеспечения энергией близко расположенного г.Петропавловск-Камчатский, испытывающего сильный энергетический кризис. Этот район является вполне доступным для изучения методами геофизической разведки и глубокого бурения. Предполагаемые размеры перспективной зоны 9х12 км ([рис.7](#)). Для ее вскрытия рекомендуется бурение скважины глубиной до 4 км. Результаты бурения дадут основание для дальнейшей разведки геотермального месторождения.

Список литературы

1. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И. Сейсмическая модель земной коры Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода в районе Камчатки//Вулканология и сейсмология. 1985, N4.С.83-90.
2. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Гринь Н.Е., Сенюков С.Л., Гордиенко Л.Я. Возможности сейсмического метода изучения зон питания современных вулканов //Вулканология и сейсмология. 1989. N6. С.42-53.
3. Болдырев С.А. О схеме распределения скорости упругих волн в области смыкания Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг//Докл.АН СССР.1974.Т.215.№2.С.331-4.Болдырев С.А., Кац С.А. Трехмерная скоростная модель верхней мантии переходной зоны от Тихого океана к Азиатскому континенту//Вулканология и сейсмология.1982.№2.С.80-95.
- 5.Ваньян Л.Л. О моделях глубинной электропроводности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. N5.С.57-66.

6. *Ваньян Л.Л.* Флюиды в верхней части консолидированной коры в свете данных геоэлектрики // Физика Земли. 1994. №6. С.89-96.
7. Геология СССР. Т.31. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. М.:Недра, 1964. 733 с.
8. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.:Наука, 1978. 130 с.
9. *Гонтовая Л.И., Сенюков С.Л.* О сейсмической модели земной коры Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. №3. С.57-62.
10. *Горельчик В.И.* Сейсмичность Южной Камчатки // Сейсмичность и сейсмологический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С.52-62.
11. *Декин Г.П., Зубин М.И.* Рельеф основных поверхностей раздела земной коры Камчатки // Геофизические поля северо-запада Тихоокеанского подвижного пояса. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С.44-55.
12. *Зубин М.И., Козырев А.И.* Гравитационная модель строения Авачинского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1989. №1. С.81-94.
13. *Кобранова В.Н.* Петрофизика. М.:Недра, 1986. 392 с.
14. *Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.:Наука, 1991. 181 с.
15. *Мороз Ю.Ф., Гонтовая Л.И., Зубин М.И.* Глубинное строение Камчатки по геофизическим данным // Физика Земли. 1996. С.92-99.
16. *Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г.* Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. №2. С.77-84.
17. *Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лощинская Т.А.* Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1995. №4-5, с.127-139.
18. *Николаев А.В., Санина И.А.* Метод и результаты сейсмического просвечивания литосферы Тянь-Шаня и Памира // Докл. АН СССР. 1982. Т.264. №1. С.69-72.
19. *Попова О.Г., Санина И.А., Кудрина Я.И., Фремд А.Г.* Скоростное строение районов Спитакского землетрясения по результатам обработки телесеизмических записей Р-волн способом сейсмической томографии // Вулканология и сейсмология. 1993. №1. С.93-103.
20. *Павленкова Н.И.* Роль флюидов в формировании сейсмической расслоенности земной коры // Физика Земли. 1996. №4. С.51-62.
21. *Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир. 1998. 164 с.
22. *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.
23. *Смирнов Ю.Б.* Связь теплового поля со строением и развитием земной коры и мантии // Геотектоника. 1968. №6. С. 3-25.
24. *Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Тепловой поток, гидротермальная активность и динамика развития глубинных зон областей кайнозойского вулканизма // Геодинамика, магмообразование и вулканизм. Петропавловск-Камчатский, 1974. С.175-196.
25. *Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях // Вулканология и сейсмология. 1980. №1. С.16-31.

26. Строение земной коры и верхней мантии в зоне перехода от Азиатского континента к Тихому океану. Новосибирск. Наука.1976.С.367.
27. Тулина Ю.В., Зверев С.М., Красильщикова Г.А. Земная кора и верхняя мантия в области фокальной зоны и Восточной Камчатки. В сб.: Сейсмичность и свойства границы Мохоровичича. М. Наука.1974. 88 с.
28. Федотов С.А., Славина Л.Б. Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1968. N2. С.8-32.
29. Федотов С.А. Геофизические данные о глубинной магматической деятельности под Камчаткой и оценка сил, вызывающих подъем магмы к вулканам // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1976. N4. С.5-16.
30. Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и их связь с вулканизмом)//Вулканология и сейсмология.1985. N4. С.91-108.
31. Федотов С.А., Фарберов А.И. Об экранировании поперечных сейсмических волн и магматическом очаге в верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов//Вулканизм и глубинное строение Земли. М.:Наука, 1996.С.43-48.
32. Фарберов А.И. Магматические очаги вулканов Восточной Камчатки по сейсмологическим данным. М.:Наука.1974.88 с.
33. Шаранов В.Н.,Симбирев И.Б., Симбирева И.Г. Блоковая структура Южной Камчатки и связь с ней вулканизма верхнеэоценового-четвертичного возраста//Проблемы глубинного магматизма. М.: Наука.1979.С.155-180.
34. Шапиро М.Н., Ермаков В.А., Шанцер А.Е. и др. Очерки тектонического развития Камчатки. М.:Наука. 1987. 248 с.
36. Brace W.F.,Walsh I.B., Frangos W.T. Permeability of Granite under High pressure//J. Geophys. Res. 1968.V.73.N6. P.110-115.

Deep-seated structure of South Kamchatka through the geophysical data

Moroz Yu.F., Gontovaya L.I.

Data of seismological, gravimetric and electromagnetic study are presented. Main peculiarities of deep-seated structure of the earth's crust and upper mantle to the depth of ~90 km have been revealed. Margins of the lithosphere blocks on ground and water area of the Avacha bay have been established. A complex geologic-geophysical model beneath Avachinsky volcano has been developed. It involves crustal magmatic chamber at depth 15 to 25 km, intrusion overlying it, peripheric chamber at depth ~0 to 2 km, and zone saturated with liquid fluids in Avachinsky graben. Major geodynamic processes, which have been operating in the earth's crust at present, are considered. An important role is given to the crustal permeable zone containing fluids. Recommendations are made for the deep well-drilling in the area of Avachinsky volcano with the aim of searching for geothermal deposits.