

**О периферическом магматическом очаге Авачинского вулкана****И.С. Улыбышев, Л.И. Гонтовая, В.А. Логинов***Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: [smile@kscnet.ru](mailto:smile@kscnet.ru)*

Разработана скоростная модель Авачинского вулкана, основанная на геологических и геофизических данных. При разработке использована тепловая модель земной коры под вулканом. В верхнюю часть очага включён элемент с 2 % расплава, создающий скоростную аномалию, соответствующую данным КМПВ.

Структура верхней части земной коры (ЗК) под Авачинским вулканом и положение источников его магматического питания с 60-х годов прошлого столетия являются объектом геофизических исследований, в частности, методами сейсмологии. На основе результатов работ, выполненных методом преломленных волн (КМПВ), под конусом Авачи в интервале глубин 1.5-3.0 км ниже уровня моря был выявлен «объект» с аномальными сейсмическими свойствами: инверсией скорости продольных волн ( $V_p$ ) от ~6.0 до 5.0 км/с, повышенными значениями поглощения ВЧ составляющих Р-волн и рядом других, которые позволяют связывать эти свойства с периферическим очагом под конусом Авачи [1]. Они свидетельствуют об аномально высоких значениях температуры ( $T$ ) и вероятных включениях в породах расплавов и флюидов, хотя о реальной конкретике (в цифрах) по этим данным речь не идет. Кроме того, в последние годы на основе метода инверсной сейсмической томографии построены скоростные модели для многих вулканов мира, в том числе для области коры непосредственно под конусом Авачи [5]. Большинство изученных вулканов характеризуются сходными особенностями томографических изображений, к ним относятся значительная контрастность рисунка скоростных аномалий, аномалии с характерными соотношениями сейсмических скоростей продольных и поперечных волн.

Для более конкретной оценки влияния состояния среды на значения скоростных параметров в пределах предполагаемого очага нами применен подход, подразумевающий моделирование аномального скоростного блока на основе предварительно рассчитанной локальной тепловой модели и некоторых фактических геологических сведений. Представляется, что созданная таким образом скоростная модель может рассматриваться как более объективная для области предполагаемого очага. На основе имеющихся данных о структуре земной коры под вулканами Камчатки можно определить преобладающие глубины верхних и нижних очагов частичного плавления и степень заполнения пространства вторгшимися магмами на разных глубинах. Оценены также площади сечений каналов, по которым переносится основное количество вещества в верхнюю кору; их диаметры составляют порядка первых км.

Тем не менее, для подробного воспроизведения процесса тепломассопереноса информации недостаточно. Прежде всего, отсутствуют сведения о степени заполнения магмой каналов указанного размера. Но едва ли для построения модели приемлемой достоверности нужно рассматривать эффекты тепломассопереноса при каждом извержении. Если построить тепловую модель циркуляции флюидов между поверхностью и застывающей верхушкой интрузии, то общий контур коровой модели можно представить в виде перехода от температуры нижнекорового слоя с расплавом к подошве слоя конвектирующих флюидов. По данным [4], кристаллизация магм в верхнем интервале под Авачинским вулканом происходит на глубинах 4-11 км. Расчет показывает, что при диаметре магматического канала в несколько км температура внутри него сохраняется (за исключением кровли, аномально охлаждаемой циркуляцией) вблизи солидуса тысячи лет: за это время произойдут повторные

внедрения магмы. Учет конвекции при изменяющейся степени кристаллизации в какой-то мере можно провести по данным [7]. Индивидуальность современной модели (между извержениями) может обеспечить информация о мощности флюидной ячейки теплопереноса [6]. Очевидно существование зон циркуляции шириной в первые км (примерно равной диаметру соммы Авачинского вулкана) с вертикальными размерами 4-7 км. Проницаемости пород зоны циркуляции гидротерм под Авачей устанавливаются по параметрам перетоков [6]. Они напрямую не связаны с пористостью пород и могут быть объяснены только резким (на три порядка) ростом в связи с сейсмичностью.

По существующим представлениям, у кровли и подошвы (непосредственно над интрузией) в погранзонах конвективных ячеек формируются флюидные резервуары. Распределение коровых  $T$  ниже зоны гидротермальной циркуляции Авачи можно представить на основании данных [2]. Значение  $T$  солидуса около  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , возможно, больше других подходит для пород состава голоценовых извержений Авачи (андезиты и андезито-базальты), чем характерное для гранитов. Самые последние по возрасту лавы были андезитовыми и выносили обломки того же состава. Поэтому в современном заполнении канала, соединяющего нижнекоровый магматический очаг с камерой непосредственно под вулканом, температуры должны быть на уровне нижнего ( $700\text{-}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Как уже отмечено, в пределах канала шириной в несколько км такая температурная аномалия сохраняется тысячелетиями. Нагрев соседних блоков заметен только на очень незначительных расстояниях. Разница между  $T$  в нижней и верхней частях канала невелика, поэтому вероятно его заполнение при извержении, близкое к полному. И при частичном заполнении известная периодичность прохождения магмы по каналу делает значительные снижения температуры в нем маловероятными. Распределение температуры в коре непосредственно под Авачинским вулканом представлено на рисунке (в левой его части).

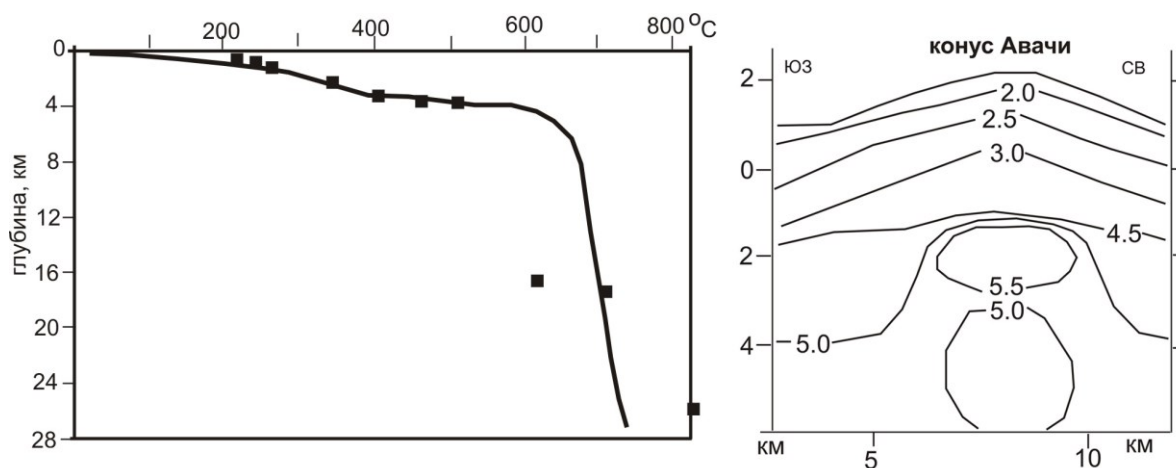


Рисунок. Тепловая модель земной коры для канала поступления магмы и зоны циркуляции термальных вод под Авачей и расчетное распределение скорости под конусом Авачинского вулкана.

Приводимые ниже результаты построения скоростной модели опираются на тепловую модель и некоторые литературные геологические сведения, дополненные данными о физических свойствах пород при различных РТ-условиях. В связи с тем, что для района Авачинского вулкана разработаны скоростные модели на основе различных сейсмических методов [1, 5], представляет интерес их сопоставление с предлагаемым здесь вариантом моделирования для области периферического очага Авачи.

Для построения предложенной модификации скоростной модели (рассматривается ее вертикальное сечение через центральную часть конуса вулкана) были выполнены следующие операции. Прежде всего, построена модель распределения

пород в разрезе. Мощность верхнего слоя приведена по данным из работы [6]. Согласно [3], полная пористость андезитовой тефры составляет около 40 % (примерно по 20 % межагрегатная и внутриагрегатная). Можно определить скорость продольных волн ( $V_p$ ) для песчаника с такой же минеральной плотностью ( $2.7 \text{ г/см}^3$ ) и рассмотреть ее изменение с глубиной. В результате вычисления скорости в альпийском флише получим значения от 4.8 км/с на кровле слоя и 5.4 км/с – на подошве. В андезитовом слое модели скорость растёт от 6.25 до 6.5 км/с.

Следующий шаг представляет собой учет температуры и расплава. Эффект в какой-то мере зависит от размеров перегретого объекта. Его ширина считалась совпадающей с шириной зоны микросейсмичности (около 4 км), «надстраивающей» магматический очаг. Слабые землетрясения отсутствуют в интервале глубин между подошвой тефры и кровлей зоны частичного плавления. Под соседним Корякским вулканом микроземлетрясения распространены гораздо глубже. Это более естественно, чем их отсутствие при условии прохождения через каналы над очагом под Авачей 5.5 тыс. тонн газа в сутки. Можно предположить, что в рассматриваемом интервале присутствует минимальное (порядка 2 %) количество расплава, обеспечивающее пластичность вещества. Параметры этого элемента модели практически не обоснованы принятым допущением. Влияние расплава на скорость изучено слабо. Оценки составляют для полного плавления сокращение  $V_p$  на уровне  $50 \pm 15$  %. Можно использовать и результаты расчетов, учитывающие влияние геометрии минералов и вкраплений расплава.

Сведения о возможном содержании расплава в очаге под Авачей можно обосновать данными [7]. Вынесенное в 1991 г. вещество состоит на 1/3 из кристаллов (примерно поровну плагиоклазов и пироксенов); остальное было расплавом. Естественно, в кумулятах твердая часть больше. Оценки для твердой фазы перед извержением – около 45 %. Можно допустить, что остаточный материал содержит ее на уровне 60 %. Магматический очаг под вулканом не обязательно представляет собой однородный резервуар. По данным об изученных объектах построены модели, в которых жидкая и раскристаллизованная магма занимает только около половины объема очага. Определение связи скорости с температурой на небольших глубинах осложнено появлением трещиноватости при нагреве. Однако можно подобрать некоторое количество данных, характеризующих изменение скорости для пород с ее подходящей начальной величиной  $T$ . Эти экспериментальные результаты неплохо согласуются с полученными для больших глубин (давлений), где качество материала выше, и без заметной погрешности расчета можно использовать для всех рассматриваемых глубин одно значение коэффициента связи температуры со скоростью; оно составляет  $0.06 \text{ км/с/}100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Используя построенную ранее тепловую модель, можно ввести поправки в намеченные скорости и получить распределение скорости продольных волн (см. рисунок, правая часть). Верхняя часть разреза вулкана относительно низкоскоростная, соответственно свойствам тефры. Ниже в пределах вулкана зона пониженных скоростей (5.0 км/с) отвечает имеющимся данным о концентрации расплава в очаге. Расположенная выше положительная аномалия скорости – результат включения в расчет практически не обоснованного элемента со степенью плавления 2 % (отметим, что она соответствует аномалии, выявленной ранее данными КМПВ [1]). Добавление 10 % расплава в этом интервале глубин ликвидирует аномалию. Таким образом, более обоснованное решение задачи упирается в наличие и достоверность геологической информации, использованной для моделирования. Определить погрешность предложенных здесь расчетов нереально, поэтому их следует воспринимать как качественные. Тем не менее, они могут оказаться полезными, так как допускают корректировку при появлении дополнительной информации, непосредственно относящейся к Авачинскому вулкану.

Разработана модификация скоростной модели (в значениях скорости продольных волн), которая опирается на тепловую модель и некоторые литературные геологические сведения, дополненные данными о физических свойствах пород при различных РТ-условиях. Включение в область «кровли» очага элемента с 2 % расплава создает скоростную аномалию (5.5 км/с), которая в общих чертах соответствует данным КМПВ [1]. Приуроченность вулкано-тектонических землетрясений к области «кровли» аномальной скоростной зоны, вероятно, связана с высоким уровнем ее флюидонасыщенности. Представляется, что данная модификация геолого-геофизической модели периферического очага (при использовании более широкого спектра данных, в частности, электромагнитных) может найти применение в задачах мониторинга вулканической опасности и гидротермальной активности района Авачинского вулкана.

### Список литературы

1. Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Гринь Н.Е. и др. Возможности сейсмического метода при изучении зон питания современных вулканов // Вулканология и сейсмология. 1989. № 6. С. 42-53.
2. Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В. и др. Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 1-24.
3. Гирина О.А. Пирокластические отложения современных извержений андезитовых вулканов Камчатки и их инженерно-геологические особенности. Владивосток: ДВО РАН, 1998. 174 с.
4. Пузанков М.Ю., Базанова Л.И., Максимов А.П. и др. Андезитобазальты инициальных плинианских извержений молодого конуса Авачинского вулкана (Камчатка) // Взаимосвязь между тектоникой, сейсмичностью, магмообразованием и извержениями вулканов в вулканических дугах. Материалы IV Международного совещания по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2004. С. 158-160.
5. Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S. et al. Tomographic Images of Magma Chambers Beneath the Avacha and Koryaksky Volcanoes in Kamchatka // JGR: Solid Earth. V. 124. P. 9694-9713.
6. Kiryukhin A., Manukhin Y., Fedotov S. et al. Geofluids of Avachinsky-Koryaksky Volcanogenic Basin, Kamchatka, Russia // Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne. 2015. 11 p.
7. Viccaro M., Giuffrida M., Nicotra E. et al. Magma storage, ascent and recharge history prior to the 1991 eruption at Avachinsky Volcano, Kamchatka, Russia: Inferences on the plumbing system geometry // Lithos. 2012. V. 140-141. P. 11-24.