

УДК 550.34

АВАЧИНСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ: ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧНОСТИ

Гонтовая Л.И.¹, Ризниченко О.Ю.², Нуждина И.Н.³, Федорченко И.А.¹

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: g_larissa@ukr.net, lecyu@emsd.iks.ru, iaf@kcsnet.ru*

²*Институт физики Земли РАН, Москва, 123995; e-mail: oksanastp@mail.ru*

³*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: sva08@emsd.ru*

Аннотация

Составлена согласованная схема распределения геофизических аномалий в земной коре и верхней мантии под Авачинской группой вулканов. Показана их взаимосвязь с особенностями тектоники и современной сейсмичности. Обсуждается вопрос о вероятных причинах формирования напряжений, в частности в районе Корякского вулкана, и их связи с электропроводящими и низкоскоростными зонами. Исходя из приведенных данных, представляется реальной опасность катастрофической активизации Корякского вулкана. Приведенные данные могут быть использованы при планировании геофизических исследований глубинного строения данного района.

Введение

Глубинное строение Авачинской группы вулканов (АГВ) изучено геофизическими методами недостаточно и крайне неравномерно. Если в районе Авачинского вулкана (АВ) выполнен комплекс исследований земной коры, то Корякский вулкан (КВ) в этом плане остается практически «белым пятном». Вместе с тем, учитывая безусловную взаимосвязь АВ и КВ с одним и тем же мантийным источником и их положение в современной структуре данного района, можно предположить возможные аналогии и некоторые общие особенности в строении земной коры (ЗК) и верхней мантии (ВМ) под этими вулканами. Безусловно, этот вопрос приобрел особую актуальность в связи с возобновлением современной активности Корякского вулкана, которая свидетельствует о том, что вулкан не угас и представляет опасность для областного центра Камчатки. Особенности сейсмичности КВ за период 1966–2009 гг. приведены в [12].

Особенности ЗК-ВМ в районе АГВ.

В региональном плане АГВ приурочена к системе северо-западных разломов, ограничивающих с северо-востока Малкинско-Петропавловскую зону поперечных дислокаций, разделяющую полуостров на южную и северную части, различные по истории их развития и глубинной тектонике. Существуют различные точки зрения на формирование данной структуры, ориентированной вкрест камчатской зоне субдукции [11 и др.], которые не анализируются в данной статье. Согласно данным сейсмофотографии, с этой зоной связаны изменения скоростной структуры фокального слоя, четко выраженные до глубины не менее 120–140 км ВМ – с разрывом этого слоя и его смещением. Установлен характер взаимосвязи АГВ с мантийным источником питания, расположенным в астеносфере на глубине 70–100 км (рис. 1). Очевидно, эта зона обогащена флюидами и расплавами, которые из подкоревой литосферы поступают в ЗК. Согласно данным МТЗ, частичное плавление ве-

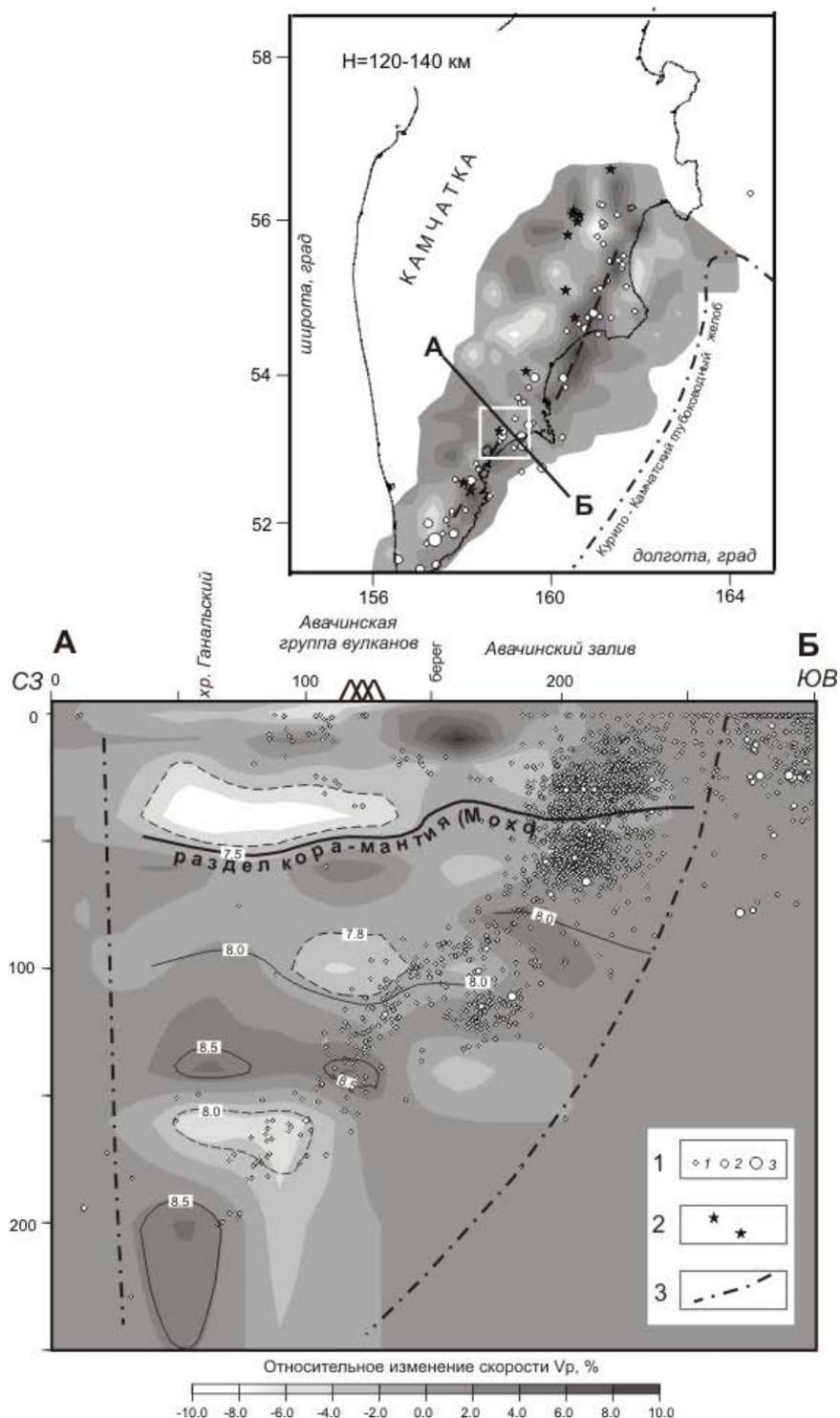


Рис. 1. Скоростная сейсмотомографическая модель земной коры и верхней мантии в районе Авачинской группы вулканов. Приведены: горизонтальное сечение трехмерной модели в интервале глубин 120–140 км и вертикальный разрез этой модели вдоль профиля АВ. На разрезе цифрами вдоль изолиний показаны абсолютные значения скорости V_p (км/сек). 1 – гипочетры землетрясений с $K_s = 10–11$ (1), 11–13 (2), более 13 (3); 2 – вулканы; 3 – линии, ограничивающие область достоверных построений.

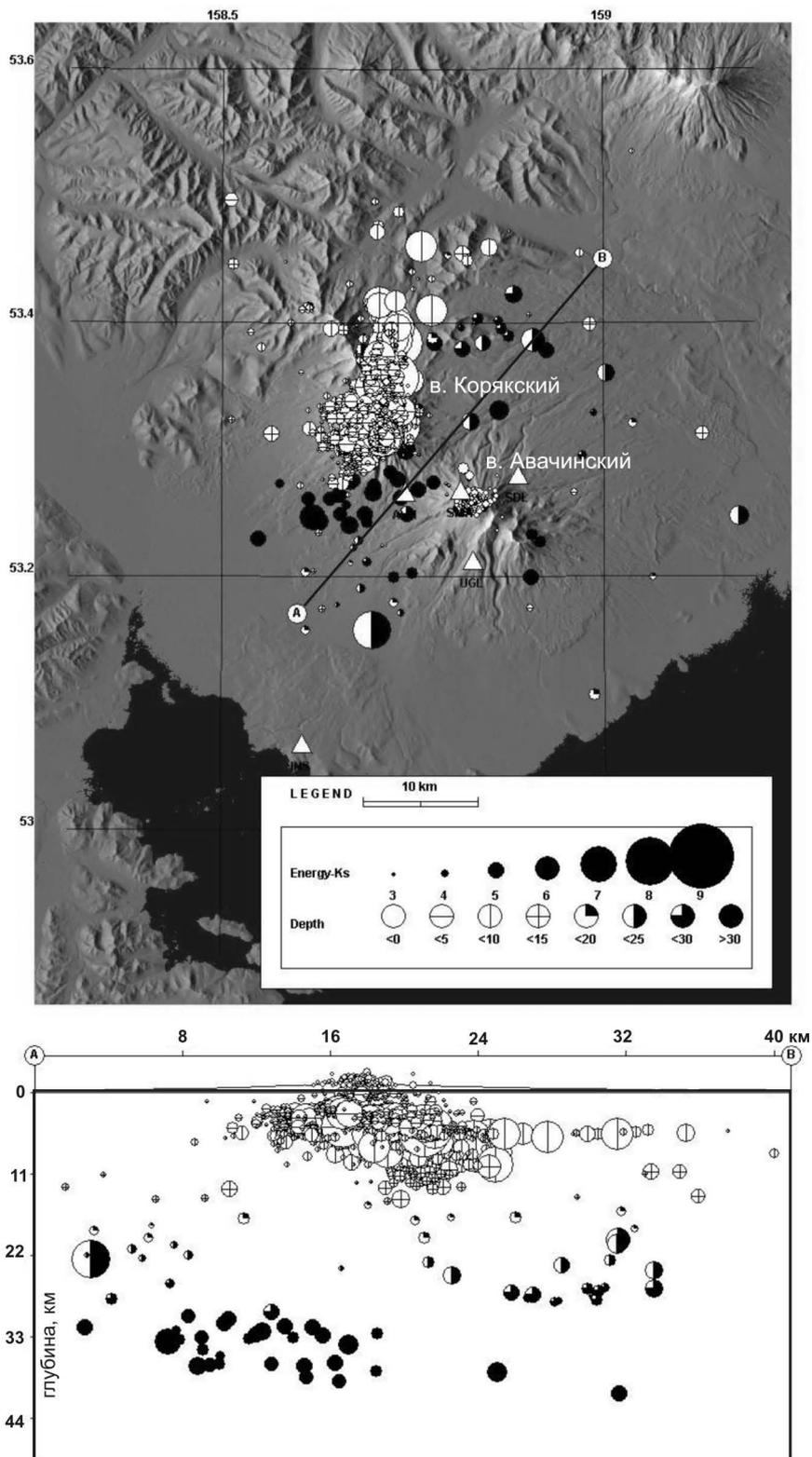


Рис. 2. Сейсмичность вулкана Корякский за 2008–2009 г.: А) карта эпицентров землетрясений; Б) проекции гипоцентров на вертикальный разрез вдоль линии А-Б. .

щества ВМ возможно начиная с глубины около 70 км, где сопротивление понижается до 100 Ом·м. Исходя из выявленных под АГВ относительно повышенных значений плотности вещества ВМ (до 3.4 г/см³), предполагается экологитовый состав мантии, который, возможно, обусловлен процессами метаморфизма перидотитов в условиях высоких давлений [8]. Эти процессы, в свою очередь, могли привести к перераспределению мантийных флюидов и повышению уровня сейсмичности в низах ЗК на глубине 20–30 км, который был зарегистрирован во время активизации КВ (рис. 2). Совместный анализ скоростных данных (рис. 1) и картины сейсмичности (рис. 2) свидетельствует о том, что АГВ и в частности КВ расположены на перегибе зоны перехода кора-мантия, а зарегистрированные по периферии КВ нижнекоровые землетрясения вполне логично связывать с вероятной областью насыщения мантийными флюидами и процессами их перераспределения в верхах мантии.

Наиболее контрастным тектоническим элементом в районе АГВ является Авачинский грабен. Он прослеживается вдоль юго-западных склонов АГВ, четко проявляется на схеме мощности земной коры (рис. 3) и продолжается на шельфе Авачинского залива. Это позволило предположить, что структура грабена предшествовала образованию Корякско-Авачинской группы вулканов [5, 10]. Структура грабена фиксируется резким ступенеобразным погружением границы мелового фундамента до глубины 4–5 км, относительным понижением уровня гравитационного поля, высокими значениями суммарной продольной проводимости осадочного чехла, что в комплексе свидетельствует об аномальном флюидном режиме данной зоны. В целом, структура грабена на сейсмическом разрезе вдоль профиля АА (рис. 4) имеет форму чашеобразного включения, в пределах которого скорость V_p понижена на 0.5 – 1.0 км/с; его граница с восточной стороны расположена практически под центральным конусом АВ. С учетом характера геофизических аномалий очевидна взаимосвязь грабена с глубинным сквозькоровым разломом. Можно предполагать, что выявленные особенности структуры грабена продолжают и под КВ.

Судя по данным геоэлектрики (рис. 5) и диапазону глубин области концентрации очагов землетрясений, современная сейсмичность, вероятно, связана с водонасыщенным горизонтом, который отмечен пониженными значениями удельного сопротивления $\rho_{y\phi}$ и сейсмической скорости V_p . Верхняя граница этой аномалии с небольшими отклонениями приурочена к уровню моря, а нижняя – уходит глубже выделенной подошвы депрессии. Аномалия $\rho_{y\phi}$ в центральной части площади имеет значения порядка 1–5 Ом·м, а ее глубина уменьшается до ~400 м [13], что примерно соответствует картине сейсмичности. Вероятно, можно говорить о связи активизации в Корякский именно с этой верхнекоровой зоной высокой флюидонасыщенности или об интрузивных внедрениях (магматических инъекциях) в область водообмена.

В ЗК под АВ в интервале глубин ~ 10–16 км выделяется зона с относительно пониженным скоростным градиентом (рис. 4) Согласно геофизическим данным, эта зона, вероятно, является ослабленным (трещиноватым), обогащенным флюидами слоем ЗК. Устанавливается взаимосвязь картины сейсмичности (глубины землетрясений, характера графика *b*-value), зарегистрированной за период 1966–2009 г. [12], с особенностями геофизических аномалий. Логично предполагать, что выявленная на глубине ~ 10–16 км аномальная зона имеет место и под КВ. В таком случае максимум сейсмической активности на глубине ~ 6–8 км (рис. 4) вполне может быть обусловлен данной зоной повышенной коровой флюидонасыщенности. В настоящее время в литературе активно обсуждается вопрос о формировании напряжений в электропроводящих и низкоскоростных слоях в сейсмоактивных регионах, что связано с особенностями протекающих здесь метаморфических процессов [6, 7, 9].

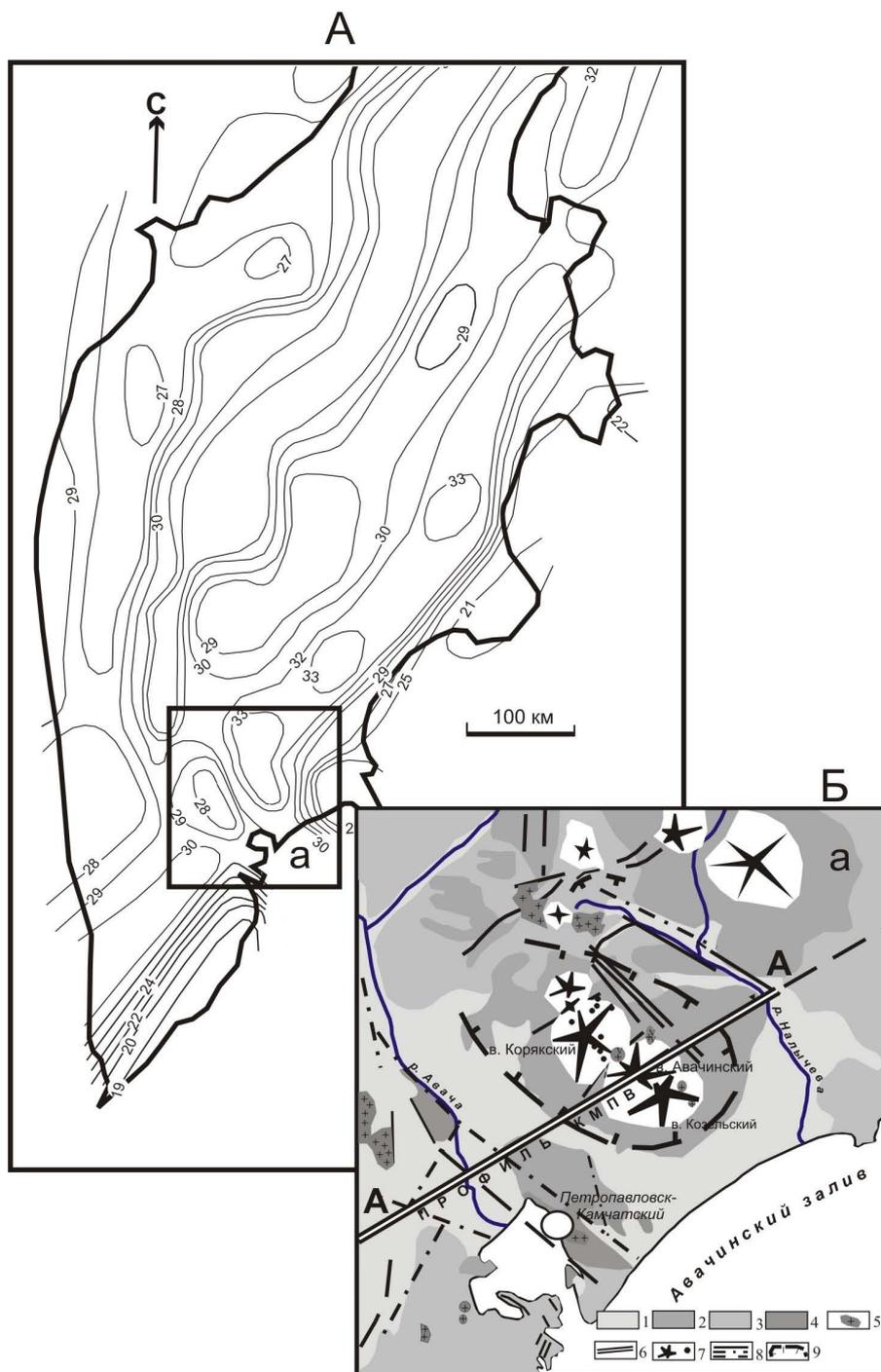


Рис. 3. Схема мощности земной коры Камчатки (А). На врезке приведена геолого-тектоническая схема района Авачинской группы вулканов (по С.Е. Апрелькову) (Б) : 1 – современные отложения; 2 – четвертичные отложения; 3 – палеогеновые и неогеновые отложения; 4 – мезозойские отложения; 5 – экструзивные и интрузивные отложения; 6 – сейсмический профиль КМПВ; 7 – вулканические постройки (действующие и потухшие вулканы, шлаковые конуса); 8 – разрывные нарушения (установленные и предполагаемые); 9 – контуры неотектонических образований.

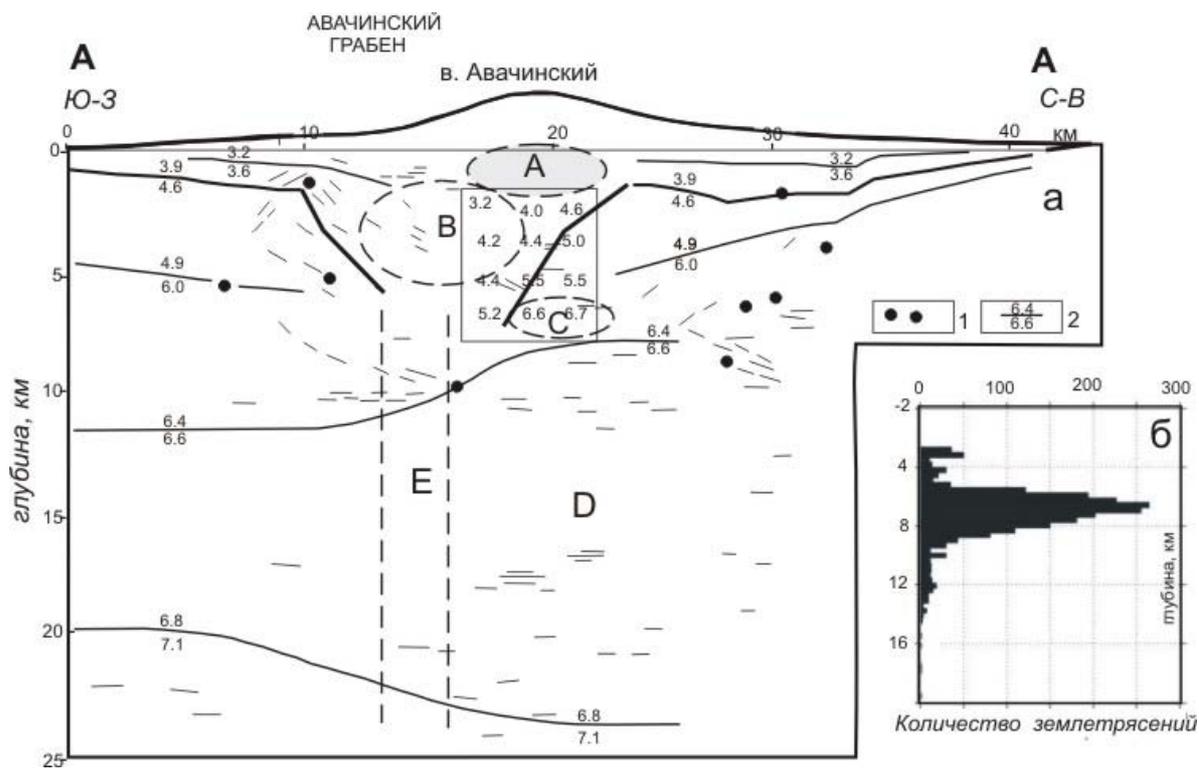


Рис. 4. Сейсмический разрез вдоль профиля КМПВ АА (см. рис. 3) (а): А – зона аномального поглощения высокочастотных составляющих Р-волн (периферический магматический очаг); В – сейсмический волновод, зона аномальной проводимости (Авачинский грабен); С – зона повышенных значений скорости Р-волн (предполагаемая интрузия); D – зона пониженных значений градиента скорости Р-волн (возможно, флюидонасыщенная); Е – зона аномальной проводимости и высоких скоростных градиентов (глубинный разлом); 1 – точки дифракции; 2 – скоростные границы. На врезке под конусом вулкана приведены значения скорости V_p (км/сек) по данным сейсмотографии. б – график изменения количества землетрясений с глубиной за период 1966–2009 г. [12].

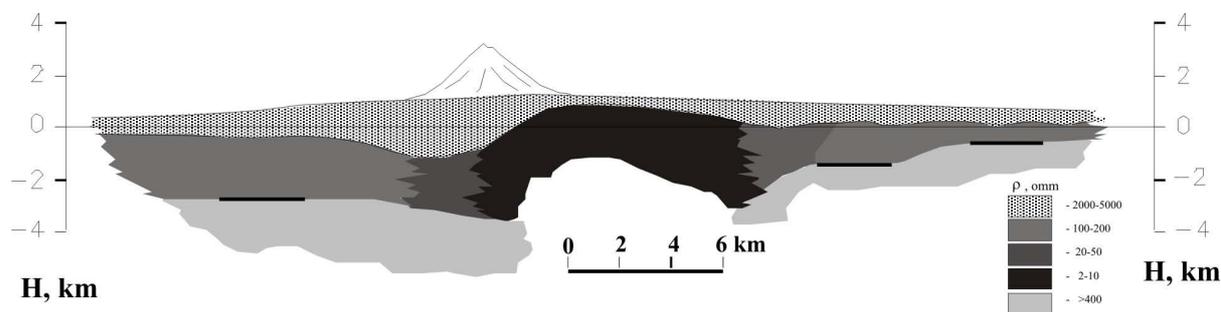


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю КМПВ.

Периферический магматический очаг под АВ

Периферический магматический очаг под АВ установлен и ориентировочно околонтурен на глубине 1.5–3 км по ряду признаков, в основном, полученных в результате сейсмических исследований методом КМПВ вдоль профиля АА, пересекающего конус АВ (рис. 4). Эти данные детально проанализированы [1–5 и др.] и здесь не рассматриваются. В настоящей работе мы приведем лишь некоторые результаты исследования характеристик затухания сейсмических волн от вулканотектонических землетрясений в районе АВ в период его активизации в 1993–1994 и 2001–2006 гг. Добротность Q_c по коде определялась с использованием моделей однократного рассеяния поперечных волн [14, 17]. Выбор этих широко используемых в современной практике моделей, несмотря на их существенные ограничения, позволил сравнить полученные результаты с данными по другим районам вулканической активности. Определение добротности Q по коде проводилось независимо методом Аки и методом Sato. При расчетах по методу Аки использовалась программа, любезно предоставленная В.Г.Мартыновым [16]. Для реализации алгоритма Sato нами был создан интерактивный программный комплекс на базе пакета MATLAB.

Распределение использованных гипоцентров землетрясений по глубине (в проекции на вертикальную плоскость, соответствующую сечению по профилю КМПВ АА, показано на рис. 6. Усредненные графики в целом демонстрируют слабую зависимость Q_c от частоты, характерную для вулканических районов (например, [18]). Одновременно, на общем графике выделяются два подмножества кривых зависимости $Q(f)$, различающиеся параметрами наклона кривых. На станциях AVH и SDL подобное разделение выражено наиболее четко. На графике зависи-

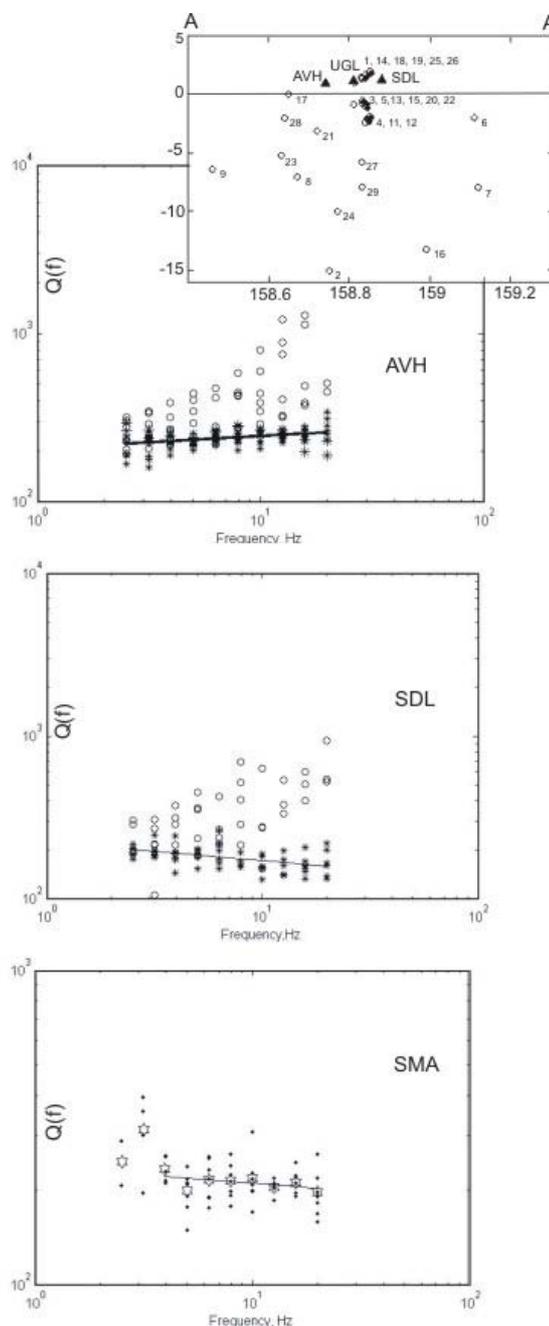


Рис. 6. Совокупные зависимости параметра $Q_c(f)$, полученные на станциях AVH, SDL, SMA в различные периоды активизации Авачинского вулкана. Используемые в расчетах землетрясения и станции КФ ГС РАН показаны на вертикальном сечении профиля КМПВ АА.

мости добротности от частоты на станции SMA по событиям 2001–2006 все данные относятся к событиям с близкими (практически одинаковыми) эпицентрами и объединяются в компактную группу. Положение очагов событий, принадлежащих к группе с аномальной зависимостью, показано на рис. 6 особыми символами. Наблюдаемый характер зависимости $Q(f)$ в аномальной подгруппе не укладывается в рамки традиционных представлений о возрастании Q_c с частотой, сформировавшихся в ходе многочисленных экспериментальных исследований коды, в том числе в вулканических областях. Единственный известный авторам пример отрицательного наклона графика $Q(f)$ приведен в работе [15] и связан с анализом коды сейсмических волн непосредственно во время извержения вулкана St. Helens. Так как полученный нами аномальный эффект наблюдается на станциях, расположенных в различных направлениях от источника, естественно предположить, что он связан либо с обширной областью среды, охватывающей все точки наблюдения, либо с ограниченной областью вблизи очага. При скорости поперечных волн $V_s = 2.5$ км/с для различных времен в коде поперечный и продольный размеры охватываемой зоны составляют порядка 10 км. В любом случае рассматриваемая область включает в себя большинство остальных очагов, для которых подобный аномальный эффект не наблюдался. Сама физическая интерпретация параметра Q_c не является в настоящее время ни устоявшейся, ни однозначной. Предложенная как мера оценки рассеивающих свойств в пионерских работах [14 и другие, более ранние], «добротность Q по коде» претерпела существенную эволюцию и выступает скорее как мера неупругого поглощения в последующих работах. Вместе с тем, рассматривая $Q_c(f)$ лишь как эффективную характеристику затухания поперечных волн, по результатам нашего исследования можно локализовать некоторую область, отличную от вмещающей среды и обладающую особыми свойствами. Комплексная геофизическая интерпретация этого эффекта с привлечением ряда других геофизических данных позволяет сделать вывод о принадлежности выделенной зоны к области периферического магматического очага и магмоподводящих каналов. Таким образом, использование данного подхода к исследованию характеристик среды не противоречит выявленному другими геофизическими методами периферическому магмоочагу под АВ.

Заключение

Изложенные результаты и особенности строения ЗК и ВМ могут быть использованы при планировании систем наблюдений, направленных на изучение глубинной структуры Корякского вулкана и разработке комплекса геофизических наблюдений, наиболее экономично и корректно решающих эту задачу. Авторам представляется, что выполнение подобных исследований можно отнести к первоочередным, связанным не столько с решением, безусловно, важной научной задачи, сколько с обеспечением безопасности населения Камчатки в районе возможной катастрофической активизации Корякского 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. Гонтовая Л.И., Ефимова Е.А., Костюкевич С.А. и др. Сейсмический разрез вулкана Авачинский по данным КМПВ-ГСЗ // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 3. С. 73–81.

3. Гонтовая Л.И., Ризниченко О.Ю., Сенюков С.Л. и др. Об упругих свойствах земной коры в районе Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4–5. С. 79–87.
4. Гонтовая Л.И., Сенюков С.Л. О сейсмической модели земной коры Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 57–62.
5. Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В. и др. Верхняя мантия Камчатки: глубинная модель и связь с тектоникой // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 2. С. 80–91.
6. Киссин И.Г. Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность // Физика Земли. 1996. № 4. С. 30–40.
7. Киссин И. Г., Рузайкин А. И. Очаги землетрясений в поле геоэлектрических неоднородностей земной коры Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2000. № 7. С. 67–75.
8. Мишин В.В. Геолого-геофизическое строение юга Камчатки. Тихоокеанская геология. 1997. Т.16. № 4. С. 64–70.
9. Павленкова Н.И. Роль флюидов в формировании сейсмической расслоенности земной коры // Физика Земли. 1996. № 4. С. 51–61.
10. Попруженко С.В., Zubin M.I. Тектоника и некоторые особенности сейсмичности шельфовой зоны Авачинского залива и прилегающих районов // Вулканология и сейсмология. 1997. № 2. С. 74–81.
11. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд. КамГУ им. В. Беринга. 2009. 191 с.
12. Сенюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулкана Корякский в 1966–2009 гг. // Материалы второй региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский (в печати).
13. Федорченко И.А. Опыт индукционного зондирования в районе Авачинского вулкана. // В сб. Теория и практика электромагнитных исследований вещества и структур Земли. Свердловск. 1985. С.100–105.
14. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects // J. Geophys. Res.. 1975. V. 80. P. 3322–3342.
15. Fehler, M., Roberts, P., & Farbanks T. A temporal change in coda wave attenuation observed during an eruption of Mount St.Helens // JGR. 1988. V 93. NB 5. P.4367– 4373.
16. Martynov, V.G., Vernon, F.L., Mellors, R.J. et al. High-frequency attenuation in the crust and upper mantle of the Northern Tien-Shan // Bull. Seism. Soc. Am. 1999. 89. P. 215 – 238.
17. Sato H. Energy propagation including scattering effects. Single isotropic scattering Approximation // J. Phys. Earth. 1977. V. 25. P. 27–41.
18. Wong, V., Rebolgar, C.J., and L. Munguia. Attenuation of coda waves at the Tres Virgenes Volcanic area, Baja California Sur, Mexico // Bull. Seism. Soc., 2001.V 91. № 4. P. 683 – 693.