

УДК 550.837

## О СТРУКТУРЕ ЛИТОСФЕРЫ ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ ПО ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

*Ю.Ф. Мороз, Л. И. Гонтовая*

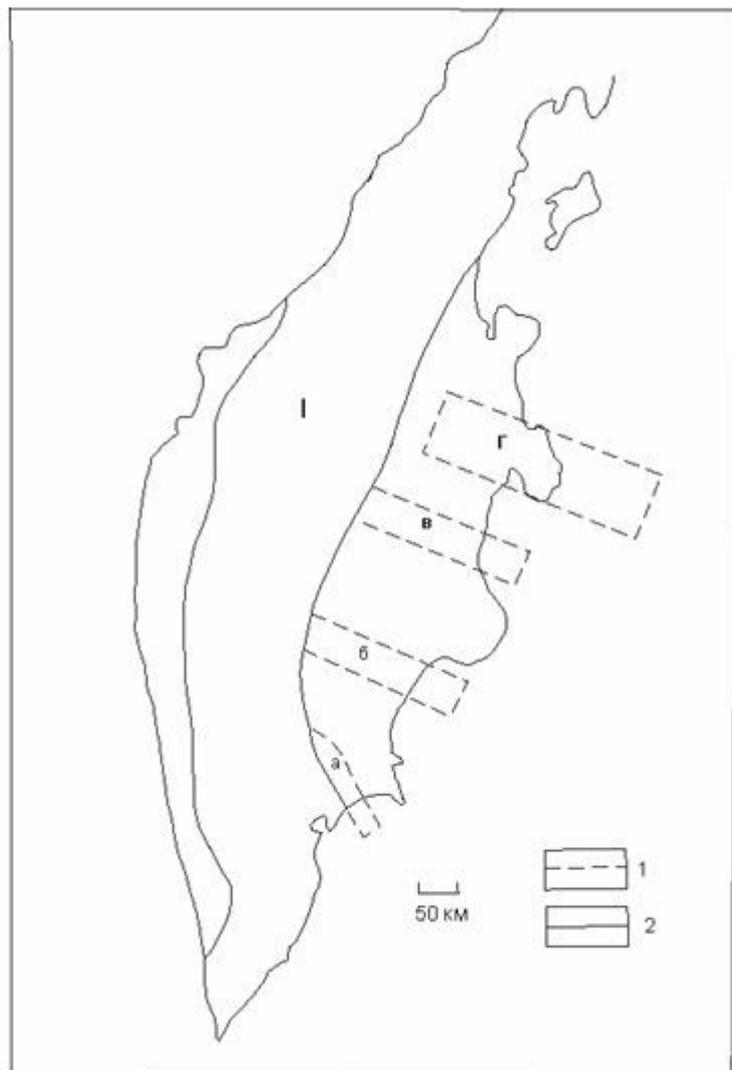
*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский, 683006*

По данным сейсмотомографии и глубинного магнитотеллурического зондирования рассмотрены основные особенности в распределении скоростных и геоэлектрических неоднородностей в земной коре и верхней мантии Восточной Камчатки. Геоэлектрическая модель содержит коровый проводящий слой, вытянутый вдоль средней части Камчатки. В литосфере Восточной Камчатки выделены поперечные проводящие зоны шириной до 50 км, имеющие продолжение в сторону Тихого океана. К поперечным зонам приурочены крупные центры современного вулканизма. Верхняя мантия содержит астеносферный проводящий слой, вытянутый вдоль Камчатки, образующий поднятия под современным вулканическим поясом. Приведены вертикальные сечения объемной скоростной модели по Р- и S-волнам вдоль Восточной Камчатки и широтные, в районах Ключевской и Авачинской групп вулканов. Отмечена взаимная корреляция аномалий пониженной сейсмической скорости  $V_p$  и  $V_s$  с аномалиями повышенной электропроводности. Обсуждается возможная природа соответствия выявленных аномалий и их возможная связь с расслоенностью литосферы, наличием флюидов и магматических расплавов, питающих активные вулканы.

В последние годы на Камчатке выполнен большой объем исследований методами МТЗ и сейсмической томографии с использованием современных подходов и методик. Результаты интерпретации показали, что в земной коре и верхней мантии существуют скоростные и геоэлектрические неоднородности. В связи с получением новой информации возникла необходимость обобщения и комплексного анализа данных МТЗ и сейсмотомографии с целью определения возможной природы аномалий повышенной электропроводности и сейсмической скорости, а также их связи с зонами магматического питания вулканов. Большой интерес представляют районы Ключевской и Авачинской групп вулканов, которым уделено основное внимание в настоящей статье.

### **Результаты геоэлектрики**

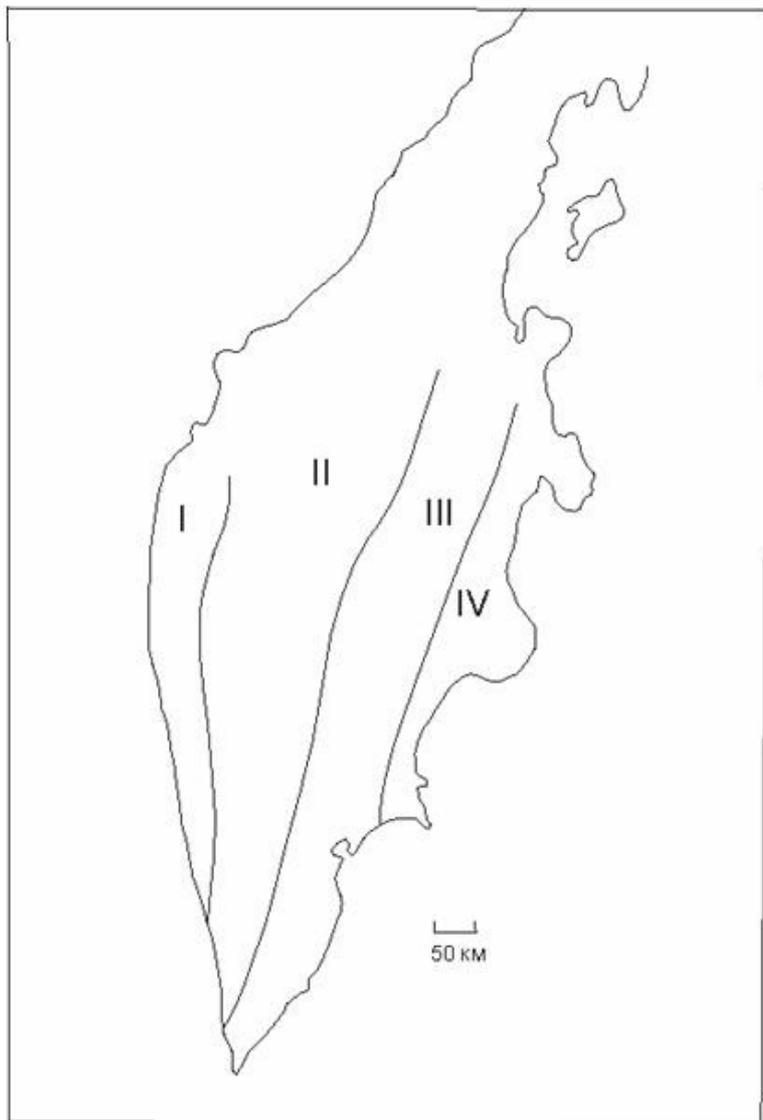
По данным МТЗ выполнено районирование Камчатки на области с различной глубинной электропроводностью [5]. В земной коре и верхней мантии выявлены слои повышенной электропроводности (рис.1). В западной части Камчатки на кривых МТЗ коровый слой не проявился. Если он здесь и существует, то по своей проводимости соизмерим с проводимостью осадочно-вулканогенного чехла. В центральной части полуострова выделяется область шириной около 200 км, протяженностью 1200 км, в которой коровый слой проявился как на поперечных, так и на продольных кривых. Он расположен на глубинах 15-35 км и имеет удельное электрическое сопротивление первые десятки Ом·м. В средней части области выде-



**Рис.1.** Схема проявления корового слоя повышенной электропроводности на Камчатке. 1-границы области проявления корового слоя (I) по продольным и поперечным кривым; 2 – границы зон проявления корового слоя (а,б,в) и литосферного (г) слоев по поперечным кривым.

ляется зона, в которой коровый слой приближен к дневной поверхности до глубин 15-20 км и характеризуется увеличенной проводимостью. Данная зона приурочена к Камчатско-Корякскому антиклинорию с наложенным вулканическим поясом, в основании которого предполагается Центрально-Камчатский глубинный разлом. В восточной части полуострова выделяется область, где коровый слой проявляется только на поперечных кривых. Показано, что здесь земная кора содержит поперечные проводящие зоны шириной до 50 км, имеющие продолжение в Тихий океан. К таким зонам приурочены крупные области современного вулканизма.

По продольным кривым МТЗ, выделяется астеносферный проводящий слой, кровля которого с глубины 150 км на западной Камчатке поднимается до глубины 70-80 км под зоной современного вулканизма и опускается в сторону восточного побережья полуострова до глубины примерно 120 км. Удельное электрическое сопротивление слоя оценивается в 5-10 Ом·м (рис.2).



**Рис.2.** Зоны с различной глубиной залегания астеносферного проводящего слоя на Камчатке. I – 150 км, II – 100 км, III – 70 км, IV – 120 км.

Таким образом, в результате анализа продольных и поперечных кривых МТЗ мы приходим к модели, в которой крупные центры современного вулканизма Восточной Камчатки приурочены к поперечным проводящим зонам в земной коре и к поднятию астеносферного выступа, вытянутого вдоль п-ва.

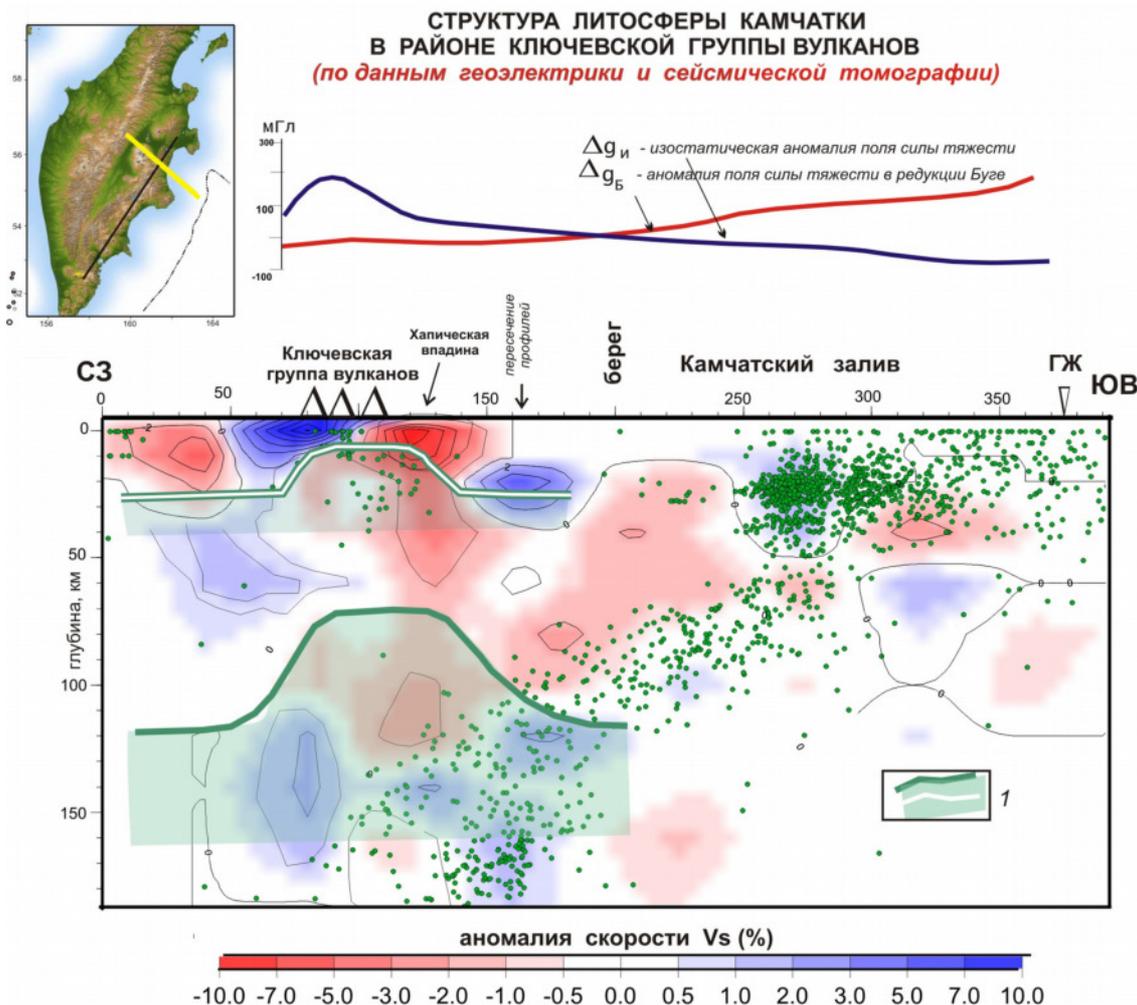
### Результаты сейсмотомографии

На Камчатке в 70-90 гг прошлого столетия с использованием взрывной сейсмологии были получены сведения о строении земной коры в в районах Авачинского и Ключевского вулканов [1, 2]. В настоящее время наиболее информативные данные о глубинной структуре Земли получены методом сейсмической томографии. Район Камчатки в плане применения различных модификаций данного метода можно рассматривать как своеобразный полигон. Результаты сейсмотомографических построений представляются в виде трехмерных изобра-

жений структуры коры и верхней мантии в аномалиях сейсмических волн  $V_p$ ,  $V_s$  и параметра  $V_p/V_s$ , а также других характеристик волнового поля [3, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 14 и многие другие]. В полученных различными авторами результатах присутствуют как черты сходства рисунка томограмм, так и определенные различия. Это касается не только непосредственно разработанных моделей, но и их последующей геологической интерпретации. Первое обусловлено неоднозначностью самого метода сейсмотомографии, а второе – в рамках какой геодинамической гипотезы рассматриваются полученные результаты и в какой степени они отвечают данным других геолого-геофизических методов, выполненных на Камчатке. Общим для всех, полученных различными авторами, результатом является высокоскоростная, наклоненная под полуостров, аномалия, к которой приурочена зона высокой сейсмичности (СФЗ). Эта структура в целом отражает процессы взаимодействия континентальной окраины и Тихого океана на камчатском отрезке переходной зоны. Отличия просматриваются как в области этой СФЗ, так и мантийном клине. К ним можно отнести рисунок изображений, интенсивность аномалий и их контрастность в общей структуре скоростного поля, вертикальная и латеральная протяженность аномалий, их взаимосвязи с характером сейсмичности. Свойства камчатской СФЗ детально проанализированы в работах [10, 11].

Известно, что построение моделей геологической среды методом сейсмической томографии не является однозначной задачей. Результаты моделирования в большой мере зависят от типа, количества и качества использованных данных, способов и подходов к решению обратной задачи, выбора исходной скоростной модели, относительно которой рассчитываются аномалии скорости, характера и степени демпфирования и многого другого. Очевидно, что комплексный анализ полученных на Камчатке сейсмотомографических моделей с данными других геолого-геофизических методов позволит однозначнее судить о возможной природе скоростных неоднородностей в земной коре и верхней мантии.

В основу нашего анализа положена сейсмотомографическая модель, разработанная коллективом ученых ИВиС ДВО РАН, ИДГ РАН и Университета г. Цюрих (Швейцария). Результаты моделирования частично (в основном касаясь технологии моделирования и данных по Р-волнам) опубликованы в работах [3, 13]. Скоростная модель построена на основе времен пробега волн от региональных камчатских землетрясений, которые были зарегистрированы камчатской сетью из 37 станций за период 1971-2006 годы. Данные взяты из регионального каталога, разработанном в Камчатском филиале Геофизической службы РАН (КФГС РАН, <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/>). Отбор данных из каталога выполнялся таким образом, все отобранные события удовлетворяли примерно одним и тем же критериям качества. В таком случае рассчитанная исходная скоростная модель совместно со стационарными поправками дают минимальное среднее значение среднеквадратичной ошибки времени пробега для всех землетрясений, используемых в расчетах. Исходя из особенностей камчатской сети станций и геометрии гипоцентрии региональных землетрясений, 3D скоростная модель литосферы, с разной степенью разрешенности, получена лишь для Восточной Камчатки до глубины 150-200 км.



**Рис. 3.** Скоростные аномалии и глубинные проводящие зоны в ЗК и ВМ вдоль поперечного сечения объемной модели через район Ключевской группы вулканов. А – данные гравиметрии; Б – аномалии  $V_s$ ; 1 – электропроводящие зоны.

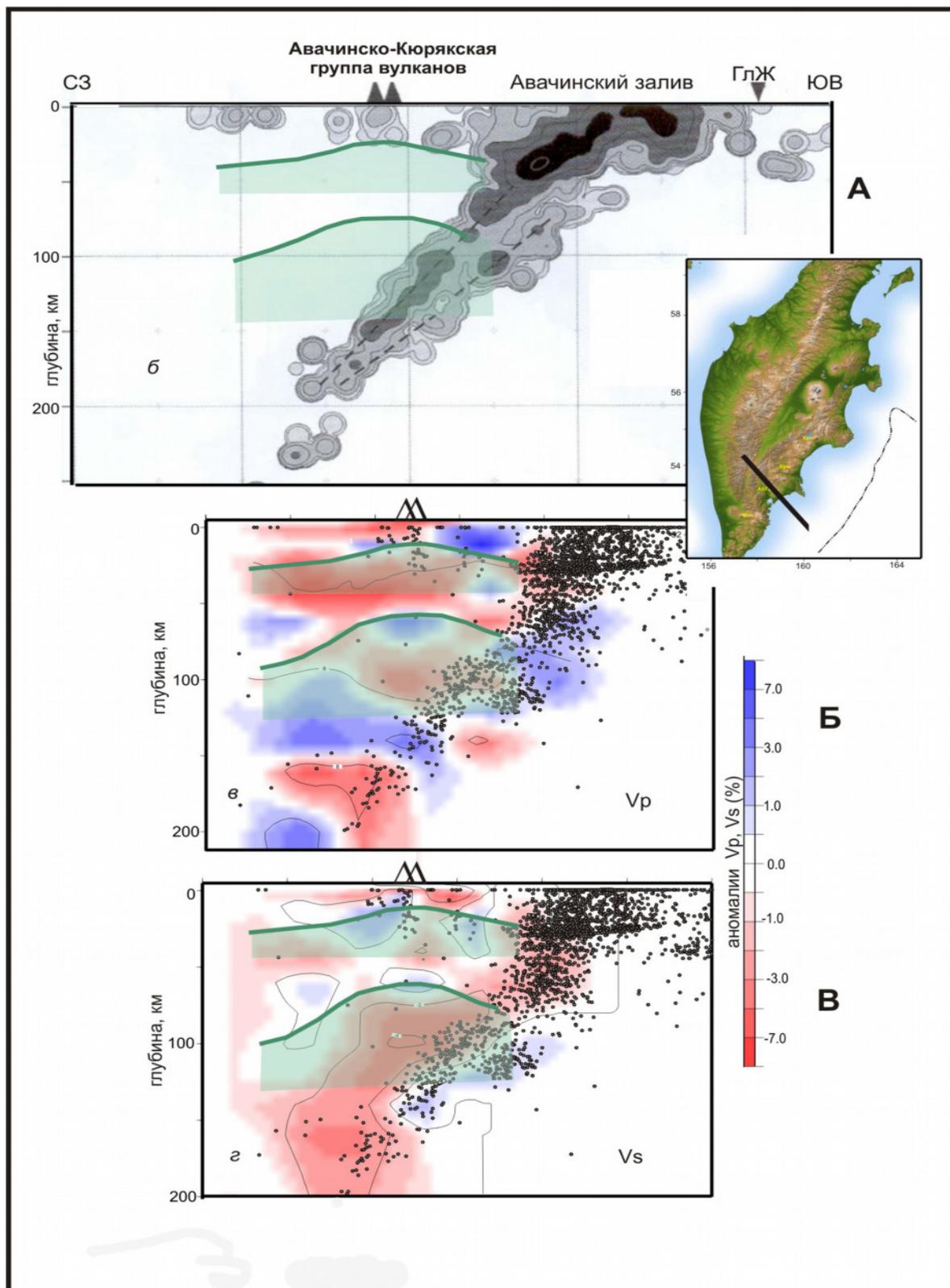
### Обсуждение результатов

Рассмотрим особенности скоростных изображений вдоль вертикальных сечений объемной модели. Первый профиль пересекает Ключевскую группу вулканов (КГВ) и выходит на С-В в Камчатский залив: он ориентирован примерно в направлении структур Императорских гор и разлома (рис. 3). На разрезе выражены аномалии  $V_s$  положительного и отрицательного знака в ЗК и ВМ. Низкоскоростная Коровая аномалия проявляется в районе КГВ. Верхнемантийная аномалия пониженной скорости расположена над СФЗ. На разрезе показаны слои повышенной электропроводности на глубине 15-35 км и 80-120 км. В районе КГВ Коровая аномалия повышенной электропроводности приближена к дневной поверхности до глубины около 15 км. Эти аномалии в общих чертах соответствуют рисунку аномалий  $V_s$ , что может быть связано с наличием в земной коре жидкой фазы (магматических расплавов и гидротермальных растворов). Отметим, что в верхней коре под КГВ зафиксирована аномалия повышенной сейсмической скорости обоих типов, которая находит подтверждение в данных электропро-

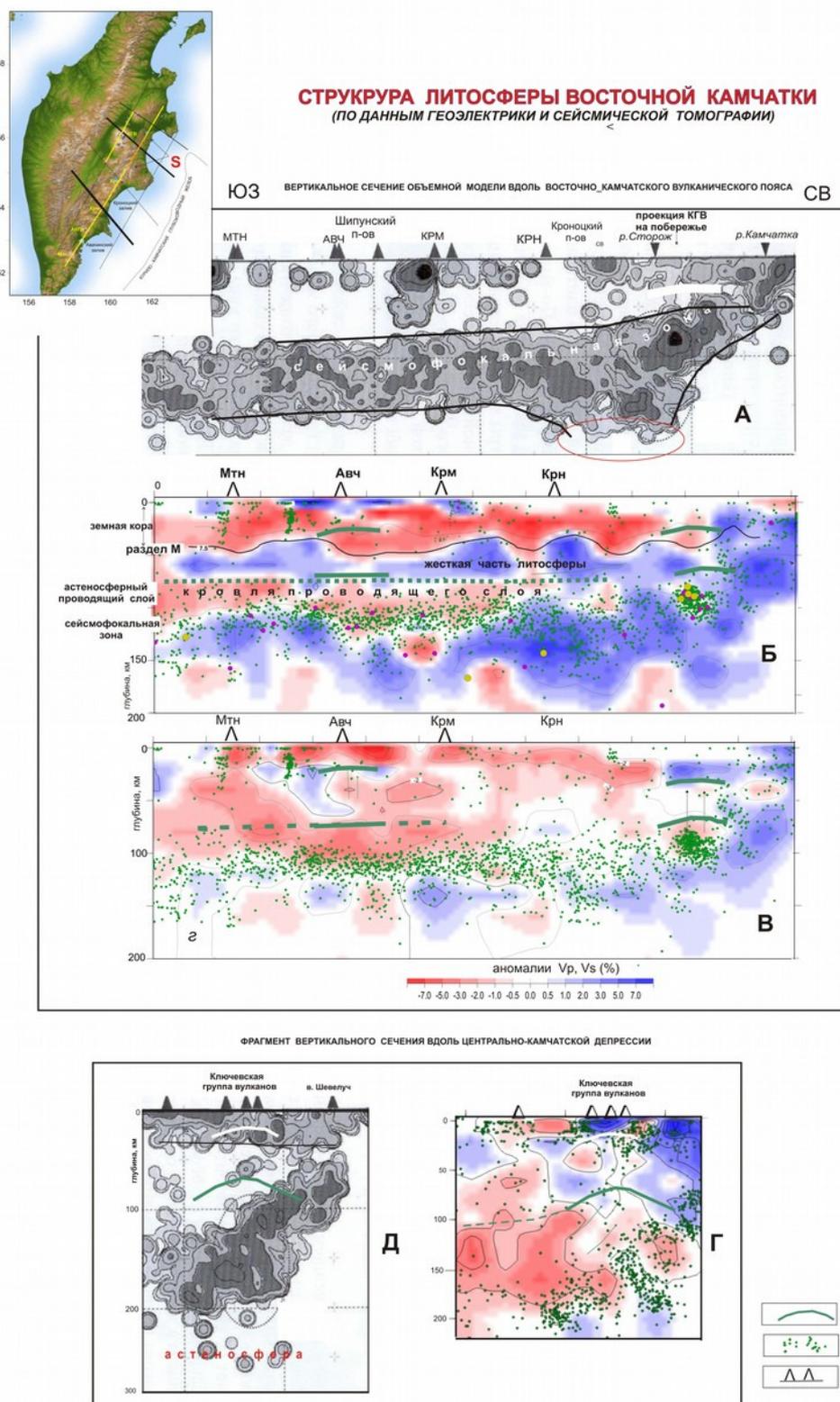
водности осадочно-вулканогенного чехла [7], поля силы тяжести и данных КМПВ [1]. Природа аномалии, по-видимому, обусловлена насыщенностью разреза магматическими породами. В левой части разреза, которая относится к Центрально-Камчатскому прогибу, в верхней коре хорошо выражена аномалия пониженной скорости, которая, вероятно, связана с мощной низкоскоростной толщей. Не исключено, что в основании прогиба заложен глубинный разлом, выраженный в скоростном поле до глубины средней части коры. Восточнее КГВ зафиксирована интенсивная аномалия пониженной скорости, которая имеет продолжение в верхнюю мантию (рис. 3). Можно предположить, что рисунок аномалии отображает проницаемую зону, по которой глубинные флюид-расплавы поднимаются в верхнюю часть литосферы, где формируются магматические очаги, питающие КГВ. Большой интерес представляет проводящий слой в верхней мантии. Он, с глубины 120 км на западе, поднимается до глубины 70-80 км под КГВ. Слой располагается над СФЗ в мантийном клине и в его основании соответствует расположенной здесь зоне пониженной скорости  $V_s$ , что можно связать с частичным плавлением ультраосновных пород при температурах более  $1200^{\circ}\text{C}$ .

Обратимся к поперечному профилю, пересекающему Авачинскую группу вулканов (АГВ) и выходящему в Авачинский залив. Земная кора под Камчаткой содержит аномалию пониженной скорости в интервале глубин 15-50 км. В общих чертах она согласуется с аномалией повышенной электропроводности. Природу выявленных аномалий, так же как и в районе КГВ можно увязать с повышенной проницаемостью коры, ее расслоенностью и, возможно, насыщенностью жидкими флюидами. Характерно, что над СФЗ верхней мантии выделяются аномалии пониженной скорости, которые могут быть обусловлены магматическими расплавами. В пользу этого свидетельствует проводящий слой верхней мантии, к которому приурочены скоростные аномалии рис. 4.

Общее представление по распределению скоростных неоднородностей в литосфере Восточной Камчатки дает сейсмотомографический разрез, ориентированный вдоль ВКВП и далее на север (рис. 5). На разрезе четко выражены аномалии повышенной и пониженной скорости  $V_p$  и  $V_s$ . В рисунке аномалий хорошо выражена латеральная расслоенность, которая включает земную кору, жесткую часть верхней мантии, астеносферный слой в интервале глубин  $\sim 70$ -100 км и высокоскоростной слой, к которому приурочена СФЗ. В аномалиях  $V_s$  астеносферный слой на этих глубинах выявлен  $\sim$  до широты Кроноцкого полуострова. Вдоль разреза выявлены близвертикальные зоны пониженных скоростей под зонами активных вулканов. Сейсмотомографический разрез сопоставлен с данными электропроводности, выявлено соответствие слоя повышенной электропроводности, кровля которого расположена на глубине  $\sim 70$  км ВКВП. Затухание интенсивности аномалии ВС соответствует зоне смещения электропроводящего слоя к СЗ в направлении Центральной Камчатки. Отмечен подъем проводящего слоя под АГВ до глубины  $\sim 15$ -20 км. В целом это соответствует поведению положительных и отрицательных аномалий повышенной и пониженной скорости и свидетельствует о возможном существовании здесь мощной разломной зоны, выраженной на глубине 100-120 км в рисунке высокоскоростного слоя («слэба» согласно терминологии гипотезы тектоники плит).



**Рис. 4.** Скоростные аномалии и глубинные проводящие зоны в ЗК и ВМ вдоль поперечное сечение объемной модели через район Авачинской группы вулканов. Условные на рис. 3.



**Рис. 5.** Скоростные аномалии P- и S- волн и глубинные проводящие зоны в ЗК и ВМ вдоль Восточно-Камчатского вулканического пояса и фрагмент профиля через КГВ). А, Д – плотность распределения слабых землетрясений ( $8 \leq K_s \leq 10$ ); Б – аномалии  $V_p$ ; В, Г – аномалии  $V_s$ ; 1 – проводящие зоны; 2 – вулканы: Мутновский (Мтн), Авачинский (Авч), Карымский (Крм), Кроноцкий (Крн); 3 – гипоцентры землетрясений ( $K_s > 10$ ).

### Выводы

По данным геоэлектрики и сейсмотомографии выявлены основные особенности в распределении скорости сейсмических волн и электропроводности в земной коре и верхней мантии Восточной Камчатки. Комплексный анализ данных электропроводности и сейсмической скорости позволяет оценить возможную природу геофизических аномалий в мантийном клине и сейсмофокальной зоне и определить их связь с магматическими очагами, питающими вулканы.

В литосфере на глубинах 10-40 км выявлены поперечные зоны, содержащие аномалии повышенной электропроводности и сейсмической скорости, к которым приурочены работы современного вулканизма. Выявленные аномалии в общих чертах согласуются между собой и практически совпадают. Это позволяет предполагать, что они отражают расслоенность литосферных зон, их разуплотнение, повышенную пористость и насыщенность жидкими флюидами (гидротермальными растворами и частичными расплавами).

В верхней мантии Камчатки выделяется астеносферный проводящий слой, который поднимается с глубин 120-150 км на Западной Камчатке до глубин 70-80 км под зоной современного вулканизма Восточной Камчатки. Поднятие астеносферного слоя вытянуто вдоль зоны современного вулканизма и располагается над сейсмофокальной зоной. Астеносферный проводящий слой согласуется с астеносферным слоем пониженной скорости сейсмических волн под зоной современного вулканизма. Природа астеносферных слоев может быть связана с частичным плавлением ультраосновных пород.

В районах Ключевской и Авачинской групп вулканов выступам астеносферных слоев соответствуют аномалии повышенной электропроводности и пониженной сейсмической скорости, которые могут быть связаны с расплавами мантийных пород на глубинах 70-100 км, питающими вулканы.

Сейсмофокальная зона характеризуется сложным распределением скорости сейсмических волн. Характерно, что в ее пределах выделяются аномалии пониженной сейсмической скорости, природа которых требует более глубокого изучения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: 13-05-12090(И); гранта ДВО-15-И-2-008; гранта РФФИ-16-05-00059.

### Список литературы

1. Балеста, С. Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев А. и др. Результаты сейсмических наблюдений земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3-18.
2. Гонтовая Л.И., Левина В.И., Санина И.А. и др. Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 56-64.

3. *Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В.* Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 4. С. 13-29.
4. *Дапенг Жао, Франко Пираино, Люси Лиу* Структура и динамика мантии под восточной Россией и прилегающими регионами // *Геология и Геофизика*. 2010. Т.51. № 9. С. 1188 - 1203.
5. *Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И.* Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и влк. Кизимен (Камчатка) 2016
6. *Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А.* Глубинные проводящие зоны в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // *Физика Земли*. 2006. № 6. С.60-68.
7. *Мороз Ю.Ф., Лагута Н.А., Мороз Т.А.* Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 2008. № 2. С. 83-93.
8. *Санина, И.А., Низкоус И. В., Гонтовая Л. И. и др.* Структура Камчатской зоны субдукции по результатам сейсмической томографии // *ДАН*. 2005. Т.404. №5. С. 678-683.
9. *Гонтовая Л. И., Санина, И.А., Сеньюков С.Л. и др.* О скоростной объемной модели литосферы Восточной Камчатки (по данным сейсмической томографии) // *Вулканология и сейсмология*. 1995. № 4-5. С.150-159.
10. *Селиверстов Н.И.* Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // *ИВиС ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский*. 2009. С. 291.
11. *Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // *Вулканология и сейсмология*. 1985. № 4. С. 91-107.
12. *Gorbatov A., Dominguez J., Suarez G. et al.* Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // *Geophys. J. Int.* 1999. v. 137. P. 269-279.
13. *Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et. al.* Correlation of Kamchatka Lithosphere Velocity Anomalies With Subduction Processes // *Volcanism and Subduction The Kamchatka Region Geophysical Monograph Series 172*. P. 97-106. Copyright 2007 by the AGU. 10/1029/172GM09 (350pp).
14. *Jiang, G., Zhao, D., Zhang. G.* Seismic tomography of the Pacific slab edge under Kamchatka. // *Tectonophysics*. 495. 2009. P. 190-203.