

УДК 550.34

СЕЙСМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЛИТОСФЕРЫ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ
КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ И АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ**Л.И. Гонтовая¹, И.В. Низкоус²**¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*² *Институт динамики геосфер РАН, Москва, 119334*

В последние годы появилось значительное количество данных, в той или иной мере противоречащих некоторым положениям концепции тектоники литосферных плит. Принципиально не согласуется с данной концепцией и целый ряд закономерностей в структуре литосферы [7]. В связи с этим детальное изучение глубинного строения районов, связанных с сейсмофокальными зонами (СФЗ) Беньофа, представляется одной из актуальнейшей задач геодинамики. Полуостров Камчатка, расположенный в узле сочленения литосферных плит (Тихоокеанской, Евразийской и Североамериканской), является в этом плане одним из наиболее интересных и сложных районов. Безусловно, что глубинное взаимодействие литосферных масс столь глобального масштаба предопределило современную структуру полуострова. Основным геодинамическим «репером» этого процесса является сейсмофокальная зона (СФЗ). Особенности геометрии СФЗ, сейсмичности в ее пределах и связь с вулканизмом детально рассмотрены в [13]. В целом «фактура» СФЗ аналогична другим островным дугам мира, однако она имеет существенные отличия в северной части Курило-Камчатской островной дуги (ОД) - в области ее пересечения с Алеутской ОД. Это предоставило ряду авторов исходный материал для геодинамического анализа происходящих здесь тектоно-магматических процессов [1,8,16,17 и др.]. Он выполнен, в основном, в рамках концепции тектоники плит, и по многим пунктам авторы противоречат друг другу. Особенно уязвимым является вопрос о природе Срединного хребта, хотя представляется, что это, прежде всего, связано практически с отсутствием комплекса геофизических данных по глубинному строению центральных районов Камчатки. Выполнить же здесь структурные сейсмологические построения не представляется возможным в связи с особенностями местной сейсмичности и конфигурации сети камчатских станций.

В данной работе анализируются результаты расчета трехмерной модели скорости продольных (Р) волн в земной коре и верхней мантии в районе Камчатки. Для ее построения использован метод высокоточной томографии, реализованный программами VELEST и SIMULPS14 [14,15,18]. По сравнению с другими, используемыми в настоящее время подходами к решению сейсмотомографической задачи, данный метод обладает рядом преимуществ как на уровне постановки задачи, так и способов ее решения. В качестве исходных данных использовались времена вступлений Р-волн от местных землетрясений (6702 события за период 1971-2003 гг.), выбранных из регионального каталога ОМСП ГС РАН по ряду критериев, а именно: для каждого события должно быть не менее 8 четких записей Р-волн, азимутальный охват менее 180 град. и ошибка времени вступления менее ± 0.2 с. Трехмерная скоростная модель построена для блока литосферы глубиной ~200 км и включает районы Восточно-Камчатского вулканического пояса (ВКВП), Центрально-Камчатскую депрессию (ЦКД) и восточные заливы - Авачинский (западная часть), Кроноцкий и Камчатский. Результаты расчета представлены в виде карт (последних срезов для разной глубины модели) и вертикальных сечений этой модели вдоль и вкрест простирания Курило-Камчатской островной дуги (ОД). Мы попытались расположить профили в наиболее интересных и значимых, с точки зрения глубинной тектоники, районах полуострова.

Характеристика скоростной модели

Сейсмические разрезы иллюстрируют рис. 1 и 2. Скоростная структура литосферы

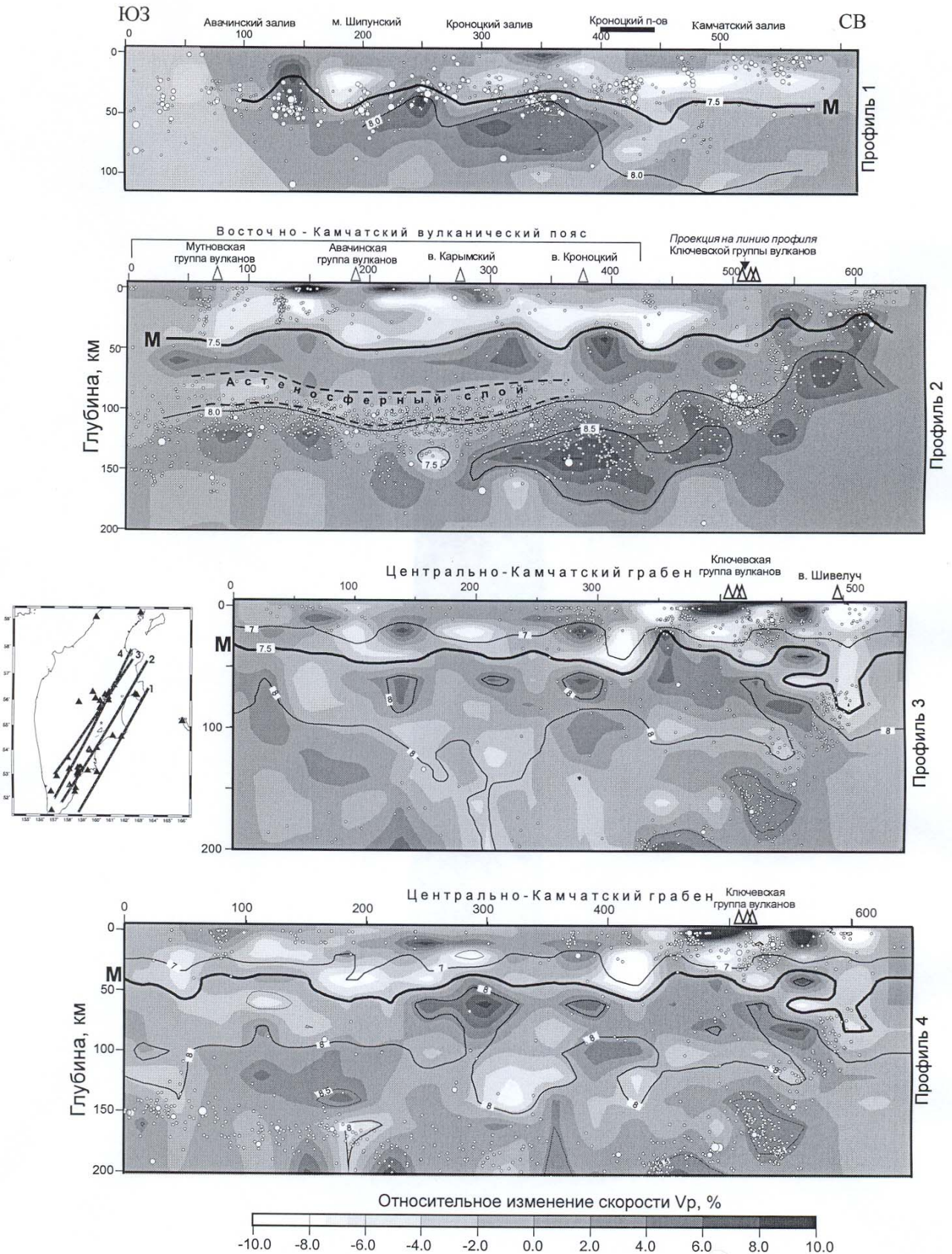


Рис. 1. Сейсмические разрезы литосферы, ориентированные по простиранию Курило-Камчатской островной дуги. На разрезе приведены изолинии абсолютных значений скорости (в км/с) и использованные при расчете объемной скоростной модели гипоцентры землетрясений (самый маленький размер кружков соответствует $K_s=10-11$; средний $11 < K_s < 13$; самый большой $K_s \geq 13$). М - разрез Мохо. Расположение профилей показано на врезке.

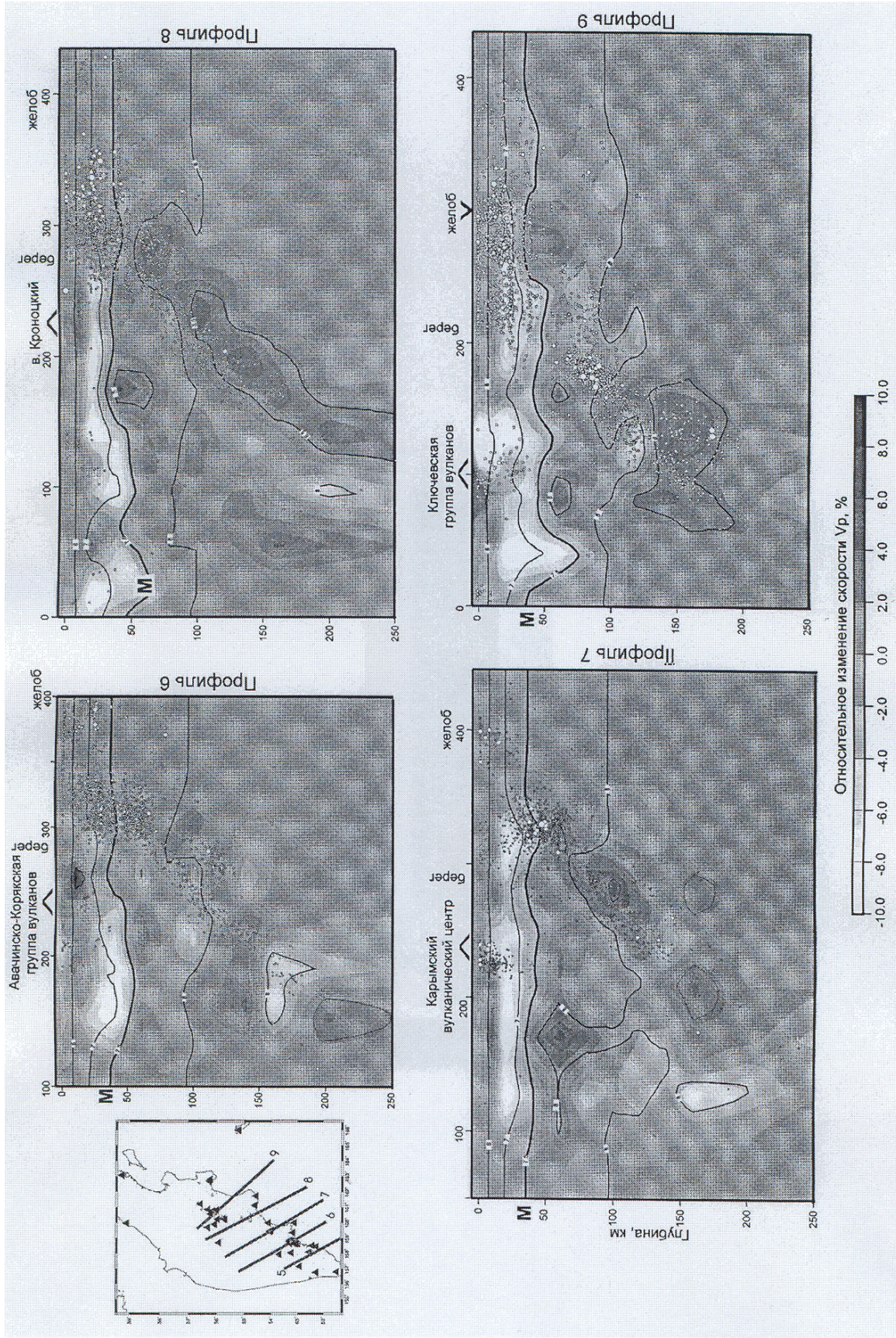


Рис. 2. Сейсмические разрезы, ориентированные вкост Курило-Камчатской островной дуги. Расположение профилей показано на врезке. Условные обозначения соответствуют приведенным на рис. 1.

представлена в значениях аномалий скорости Р-волн относительно средней скоростной кривой, которая рассчитывалась для всего блока литосферы Камчатки и принималась в качестве исходной при восстановлении трехмерной модели [18]. Кроме того, на разрезах показаны изолинии абсолютных значений скорости (7.0, 7.5, 8.0, 8.5 км/с); условно изолиния 7.5 км/с интерпретируется нами как уровень раздела Мохо. На разрезы вынесены также гипоцентры землетрясений, использованных при расчетах модели.

Профиль 1 ориентирован по простиранию камчатского участка Курило-Камчатской ОД и проходит вдоль восточных полуостровов Камчатки в области максимальной сейсмичности. На глубине раздела М к высокоскоростному слою (океанической плите) приурочено наибольшее количество землетрясений представительного класса, при этом они связаны (в большинстве случаев) с наиболее контрастными «пятнами» повышенной скорости. Обращает на себя внимание резкое изменение характера скоростного разреза и сейсмичности к северу от Кроноцкого полуострова - в Камчатском заливе. На этом участке СФЗ развернута к северу, и профиль проходит в пределах Тихоокеанского блока. Верхняя мантия здесь (по крайней мере до глубины 100 км) аномально низкоскоростная, а зона наиболее высоких скоростных градиентов приурочена к широте Кроноцкого полуострова.

Профиль 2 пересекает ВКВП; севернее Кроноцкого полуострова он проходит вблизи побережья Камчатского залива, пересекая область сочленения дуг. Скоростная структура земной коры вдоль профиля имеет ряд особенностей, среди которых основным представляется то, что низкоскоростные аномалии в южном блоке Камчатки приурочены, в основном, к верхней коре, а в северной части Кроноцкого залива и под Кроноцким полуостровом - к средней и нижней. В интервале глубин 70-110 км в верхней мантии выделен астеносферный слой пониженной скорости, с ним, вероятно, связано глубинное питание вулканов ВКВП. В районе Кроноцкого полуострова он практически выклинивается (или становится невыразительным по значениям аномалий скорости). К этому участку приурочены наиболее высокие значения скорости (выше 8.5 км/с) вдоль профиля, что, скорее всего, связано со значительным увеличением жесткости среды; здесь начинается разворот СФЗ к северу. Область интенсивной сейсмичности на глубине 80-100 км в центральной части побережья Камчатского залива, вероятно, обусловлена глубинной разломной структурой. По данным МТЗ сюда проецируется зона аномальной электропроводности, которую авторы [5] связывают с глубинным разломом. На западном продолжении этого разлома расположена Ключевская группа вулканов. В структуре скоростного поля эта зона четко проявляется полосой низкоскоростных аномалий практически по всей изученной мощности литосферы до глубины не менее 100-120 км (рис. 3). Если принять во внимание геологические данные об ареале распространения магнезиальных пород [3], то можно предполагать, что выявленная зона имеет прямую связь с верхней мантией.

Профили 3 и 4 ориентированы примерно одинаково вдоль ЦКД, пересекаясь в районе Северной группы вулканов. Однако 3-й профиль в южной части проходит вдоль Восточного хребта Камчатки, а 4-й - пересекает Валагинский и Ганальский хребты. При относительном сходстве рисунка аномалий имеются и существенные отличия. Они касаются, в основном, мощности и интенсивности отрицательной аномалии в верхней мантии, кровля которой соответствует глубине около 100 км. Эта аномалия наиболее контрастно выражена в интервалах 180-250 км профиля 3 и 300-350 км профиля 4. Географически этому участку ЦКД со стороны запада соответствует изгиб Срединного хребта. Обращает на себя внимание то, что и на профиле 2 к нему приурочено аномальное «углубление» до 140 км подошвы астеносферного слоя (скорость V_p в пределах этого участка 7.5 км/с). На скоростной схеме в слое 100-140 км границы данной аномалии можно провести условно по широтным разломам - Петропавловскому (на юге) и Кроноцкому (на севере) (рис. 3). Севернее Кроноцкого полуострова характер скоростной структуры под ЦКД иной. Ключевская группа вулканов приурочена к области «переслаивания» аномалий относительно пониженных и повышенных значений скорости, соответствующих области понижения и повышения уровня сейсмичности. Профили 3 и 4 в своей северной части заданы практически вкрест структурам Алеутского направления, имеющим значительную протяженность под Камчатку [8].

Поэтому полученная в этой части ЦКД скоростная модель иллюстрирует свойства верхней мантии непосредственно в области стыка литосферных плит. Здесь очень контрастно проявилась расслоенность верхней мантии, взаимосвязанной с характером сейсмичности. В настоящее время ряд авторов допускает (либо доказывает) разрыв Тихоокеанской плиты с образованием окна, через него мантийный материал поступает под Северную группу вулканов [16,17]. На карте скоростных аномалий Ключевская группа вулканов действительно приурочена к центру («окну») обширной низкоскоростной аномалии, окруженной по контуру полосой относительно повышенной скорости (рис. 3, слой 100-120 км). Однако глубже это «окно» не проявляется, а Ключевские вулканы расположены на западном борту узкой низкоскоростной аномалии, связанной, очевидно, с глубинным разломом мантийного заложения.

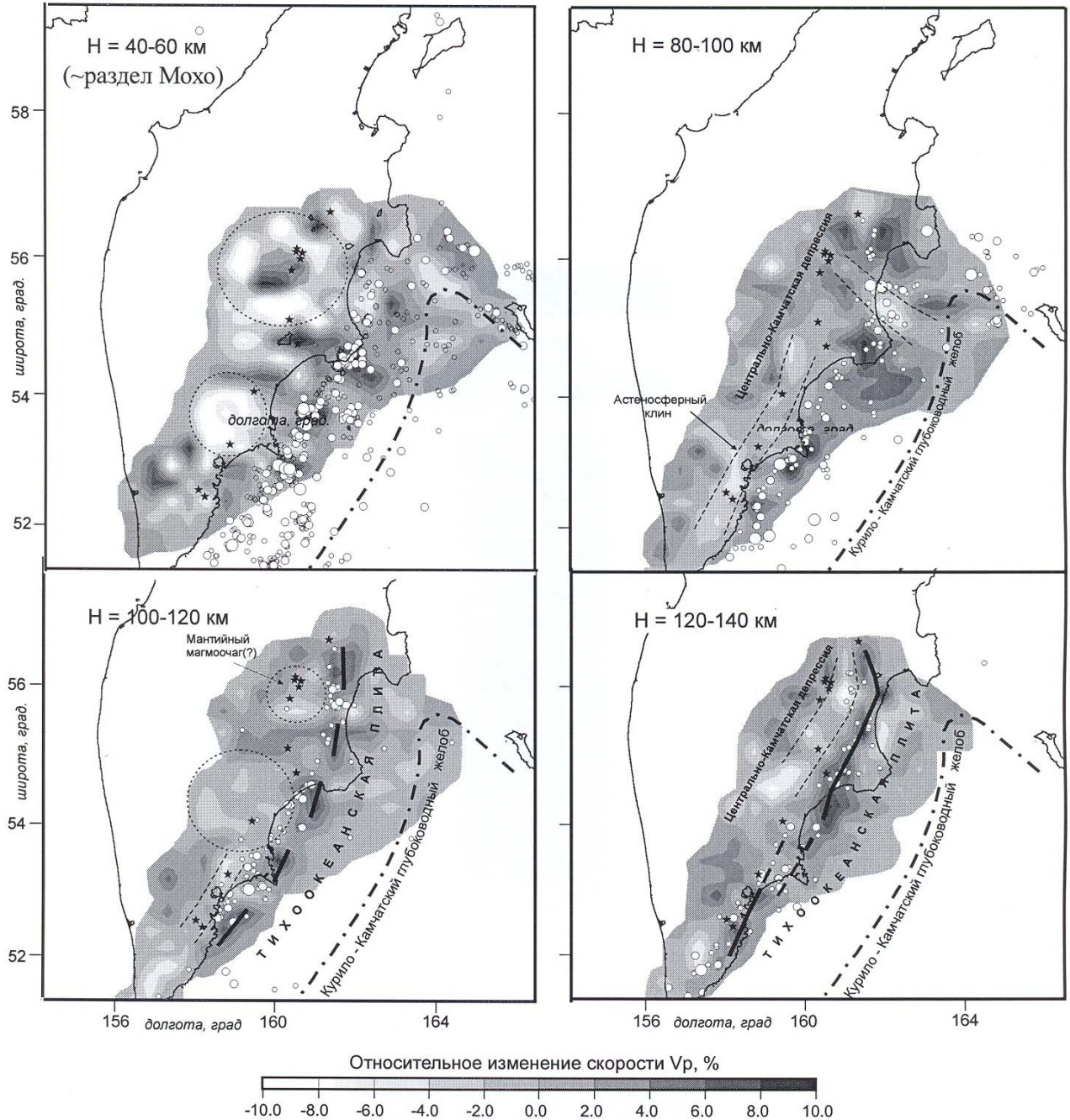


Рис. 3. Карты скоростных аномалий в слоях литосферы.

На картах вынесены эпицентры землетрясений соответственно интервалу глубин каждого слоя. Показаны характерные аномалии: низкоскоростные - под ВКВП, в районе Главного Камчатского разлома и в Камчатском заливе (тонким пунктиром); под Ключевской группой вулканов, в районе Малко-Петропавловской структуры и в центральном блоке Камчатки (кружками); высокоскоростные - вдоль СФЗ (жирными линиями).

Профили 6-9 характеризуют изменение скоростной структуры вкост простирания камчатского участка Курило-Камчатской ОД (рис. 2). Особенности этой структуры, как нам представляется, четко взаимосвязаны с основными тектоническими элементами Восточной Камчатки. Поперечные разрезы рассекают объемную модель по широте Авачинско-Корякской групп вулканов в Южном блоке полуострова; Карымского вулканического центра и Кроноцкого вулкана - в его центральной части, Ключевской группы вулканов – в области трансформного сочленения островных дуг. Из рисунка аномалий прежде всего следует, что океаническая плита вовсе не является некой однородной «пластиной». Очаги землетрясений в фокальном слое приурочены к зоне в целом повышенной скорости, однако в пределах этой зоны отмечены и низкоскоростные неоднородности. Они имеют связь (или продолжение) с аналогичного знака аномалиями мантийного клина и коррелируются изменением уровня сейсмичности. Отметим, что на разрезах представлены гипоцентры наиболее представительных землетрясений из камчатского каталога; если же вынести все зарегистрированные события, то, безусловно, проследить какие-либо «тонкие» закономерности их размещения в фокальном слое будет невозможно. На профилях 6 и 7 в области мантийного клина четко выделен низкоскоростной (астеносферный) слой на глубине 70-110 км (рис. 2). Именно на этот уровень глубин СФЗ проектируются активные вулканы ВКВП, и их связь с протекающими на этих глубинах процессами взаимодействия плит не вызывает сомнений. Интересно отметить, что низкоскоростные слои на аналогичной глубине выявлены и в континентальных блоках литосферы различных регионов [7]. Рис. 4, взятый из данной работы, иллюстрирует один из таких примеров. Сейсмическая граница N (подошва литосферного волновода) характеризуется значительно повышенной скоростью, которую можно объяснить подвижками литосферы относительного ослабленного слоя (волновода). В работе [6] показано, что в мантийных породах при более высоких, чем в земной коре, термодинамических условиях тоже может происходить хрупкое разрушение, и корни разломов, выполаживаясь на определенной глубине, создают разуплотненный слой. Логично допустить, что выделенная под ВКВП низкоскоростная неоднородность связана именно с подобным процессом. Глубинный материал в виде газов, флюидов, расплавов может распространяться по этому слою и фиксируется в виде аномалии электропроводности, зарегистрированной на Камчатке методом МТЗ [4,5]. Наиболее высокие скорости отмечены в фокальном слое по **профилю 8** в районе Кроноцкого полуострова (абсолютные значения $V_p \geq 8.5$ км/с). Если допустить, что они характеризуют «холодную» океаническую плиту, то эти значения все равно аномально завышены, и их можно объяснить высоким уровнем напряжений. Профиль 8 фиксирует очень контрастную аномалию в пределах мантийного клина - это выдержанная наклонная под Камчатку полоса пониженной скорости, которая со стороны запада также контактирует с областью высокой скорости. Севернее (профиль 9) высокоскоростная океаническая плита практически не проявляется в скоростной структуре - скоростной разрез **расслоен**, и очаги землетрясений приурочены к наиболее контрастным неоднородностям. Рисунок аномалий может говорить о смещении литосферных слоев относительно друг друга; они более значительны в северной части Камчатки, что, возможно, связано с более «теплой» и значит более пластичной литосферой. Данные о значительной расслоенности и неоднородности зоны субдукции в районе Камчатки не являются «открытием», они получены для ряда других участков области перехода океан-континент и анализируются многими авторами [9-12]. В частности, для района Центральной Камчатки с процессом горизонтальных перемещений связываются различия структур ЦКД и грабен-синклиналей вулканических поясов, структурные планы их соответствуют различной глубине заложения [11]. Согласно скоростным сечениям (профили 6 и 7), ВКВП приурочен к астеносферному слою мантийного клина, выделенному на глубине 70-110 км. Глубже этого слоя высокоскоростная аномалия (океаническая плита) смещена относительно верхних этажей. В западной части разрезов на глубине около 150 км выделяется астеносферная неоднородность, на поверхности соответствующая структуре ЦКД. В ее пределах резко

убывает сейсмичность, и, возможно, эта аномалия имеет связь с границей верхней мантии, в которой проходят фазовые переходы вещества.

На основе представленных разрезов и схем скоростную структуру в области фокального слоя в районе Камчатки можно охарактеризовать следующим образом. Тихоокеанская плита проявляется в низах коры и верхней мантии, начиная с раздела Мохо,

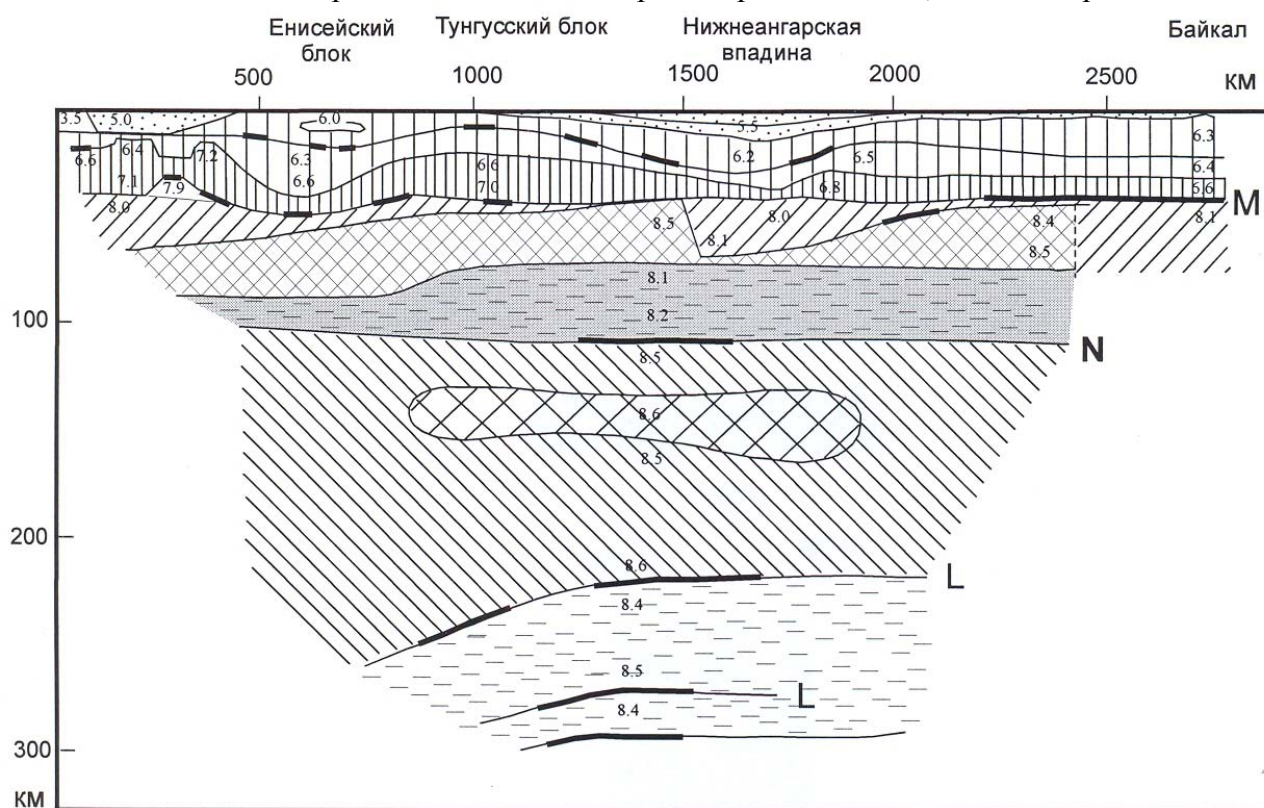


Рис. 4. Сейсмический разрез земной коры и верхней мантии по профилю «Рифт», через западную часть Сибирской платформы и характеризующему слоенность литосферы кратона. Цифрами даны скорости продольных волн в км/с. Разрез взят из работы [7]. Граница N выделена в других регионах (см. там же).

цепочкой слабоположительных аномалий (рис. 3). На этом уровне глубин в скоростном поле четко прослеживаются поперечные аномалии в районах заливов (север Авачинского, Кроноцкого и Камчатского); они, очевидно, связаны с разломными структурами. В Камчатском заливе наиболее контрастно проявилась поперечная структура, по которой аномалия повышенной скорости, картирующая океаническую плиту, развернута к северу. Удивительно, что эта аномалия проявляется в верхней мантии в большом интервале глубин - до 120-140 км. Возможно, что на этом участке происходит разрыв Тихоокеанской плиты. Глубже 100 км «фактура» фокального слоя изменяется: уменьшается мощность связанной с ним высокоскоростной аномалии и увеличивается значение скорости в ее пределах. На глубине 100-120 км океаническая плита в скоростном поле похожа на тонкую (ширина не больше 40-50 км) изогнутую пластину с примерно одинаковыми размерами участков разнознаковых аномалий. Глубже она выражена еще более контрастно с четким разрывом в районе Малко-Петропавловских поперечных дислокаций.

Основные результаты

1. Скоростная структура литосферы Камчатки свидетельствует о влиянии области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской ОД практически на всю территорию полуострова, по крайней мере, до зоны Малкинско-Петропавловских поперечных дислокаций.
2. Установлена значительная скоростная неоднородность литосферы переходной зоны и ее слоенность. Показана взаимосвязь особенностей сейсмичности фокального слоя с выявленными аномалиями. Она позволяет предположить влияние процесса *детачмента* на формирование геометрии СФЗ.

3. Выделено две зоны, к которым приурочены структуры вулканических поясов - Восточной Камчатки в интервале глубин 80-120 км и Центральной Камчатки в интервале от ~150 км, возможно, до зоны фазовых переходов в мантии.

По рисунку аномалий можно допустить, что Тихоокеанская плита пододвигается под континентальный блок до глубины ~150 км, то есть до области пересечения с узкой низкоскоростной аномалией в центральной части Камчатки, являющаяся «каналом» поступления мантийного вещества с больших глубин Земли.

Список литературы

1. *Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Тектоническое развитие и вулканно-тектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С.64-80.
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. *Вольнец О.Н., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В. и др.* Харчинский и Заречный вулканы - уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: структурная приуроченность, морфология, возраст и геологическое строение вулканов // Вулканология и сейсмология. 1998. № 4-5. С. 5-18.
4. *Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Мороз Т.А.* Глубинная геоэлектрическая модель Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Физика Земли. 2001. № 6. С. 58-66.
5. *Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г.* Глубинная геоэлектрическая модель области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2004. № 6. С. 54-67.
6. *Николаевский В.Н.* Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. Механика деформируемого твердого тела. М., 1983. Т. 15. С. 149-230.
7. *Павленкова Н.И.* Структура земной коры и верхней мантии и глобальная геотектоника // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ИФЗ РАН, 2002. С. 64-83.
8. *Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир. 1998. 164 с.
9. *Тараканов Р.З.* Скоростные особенности строения верхней мантии области перехода от азиатского континента к Тихому океану. Южно-Сахалинск: изд-во ИМГИГ ДВО РАН. 1997. 53 с.
10. Тектоническая расслоенность литосферы. М.: Наука, 1983. 120 с.
11. *Трифонов В.Г., Востриков Г.А., Кожурин А.И. и др.* Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1988. 365 с.
12. *Туезов И.К.* Литосфера Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода. Новосибирск: Наука, 1975. 120 с.
13. *Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В., Шумилина Л.С.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91-107.
14. *Kissling E., Ellsworth W.L., Ederhart-Pillips D., Kradolfer U.* Initial reference models in local earthquake tomography // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99. P. 19635-19646.
15. *Kissling E.* Geotomography with Local Earthquake Data // Reviews of Geophysics. 1988. V. 26. P. 659-698.
16. *Lees J.M., Davaille A.* Heat transport in the torn edge of the Pacific slab in Kamchatka//Recent volcanism of the Kurile-Kamchatkan and Alaska-Aleutian island arcs: the questions of volcanic hazard, tsunami hazard, magma genesis, earthquakes, geodynamics: comparative analysis. Abstracts of International Seismic Workshop on Kamchatkan-Aleutian Subduction Processes. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVGG FED RAS, 1998. P. 65-66.

17. *Levin V., Shapiro N., Park J., Ridzwoller M.* Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*. 2002. V. 418. P. 763-766.
18. *Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et al.* Structure of Velocity Heterogeneities and Their Interconnection with Geodynamics of Transition Zone (Kamchatka) // *Abstracts of IV International Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs*. Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FED RAS, 2004. P. 104-106.