

УДК 550.34

## ГЛУБИННАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КАМЧАТКИ

© 2007 Л. И. Гонтовая<sup>1</sup>, В. В. Гордиенко<sup>2</sup>, С. В. Попруженко<sup>3</sup>, И. В. Низкоус<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, бульвар Пийна, 9;  
e-mail: vortex@ksnet.ru

<sup>2</sup>Институт геофизики Национальной Академии наук Украины, Киев, 03680, пр. Палладина, 32;  
e-mail: earth@igph.kiev.ua

<sup>3</sup>Управление по недропользованию по Камчатской области и Корякскому АО, Роснедра, МПР РФ. 683016  
Петропавловск-Камчатский, Мишенная, 106; e-mail: geolog@mail.kamchatka.ru

<sup>4</sup>Schlumberger Logelco Inc., Москва; e-mail: aldiva@mail.ru

По результатам сопоставления данных геолого-геофизических исследований Камчатки со скоростной моделью верхней мантии получена согласованная пространственная структура литосферы региона. Под Центрально-Камчатской рифтовой зоной выявлен астенолит, определены его мощность и область распространения в верхней мантии Восточной Камчатки. Под современными вулканическими поясами выделены астенолитные включения, имеющие связь с аномальными свойствами фокального слоя и океанической мантии. Рассмотрена схема глубинных процессов в литосфере Восточной Камчатки с использованием представлений адвекционно-полиморфной гипотезы. Их последствия согласуются с экспериментальной скоростной моделью мантии в изученном интервале глубин.

### ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатка (как часть активной континентальной окраины либо активной переходной зоны между континентом и северо-западной окраиной Тихого океана) расположен в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (ОД). Сложность протекающих здесь геодинамических процессов находит отражение в высоком уровне сейсмической активности и изменении параметров сейсмофокальной зоны (СФЗ) вдоль полуострова (Федотов, 2006; Федотов и др., 1985), уникальном по объему и составу лав вулканизму (Volynets, 1994; Волюнец и др., 1997; Волюнец и др., 1998; Флеров и др., 2001 и др.), дискордантности динамических процессов на разных уровнях литосферы (Леглер, 1976; Трифонов и др., 1988 и др.), сосуществовании двух тектонических режимов (орогенеза и рифтогенеза) (Ермаков, 1998, 2002) и других характеристиках. В такой ситуации естественно возникновение различных точек зрения для реконструкции истории тектонического развития Камчатки. С позиций тектоники плит (а сторонников этой гипотезы в настоящее вре-

мя большинство), формирование глубинной структуры Камчатки связывается с различными этапами субдукции и свойствами плит в зоне коллизии (Авдейко и др., 1989, 2002; Леглер, 1976; Селиверстов, 1998; Levin et al., 2002 и др.). Развиваются альтернативные взгляды в тектонике точки зрения, в основу которых положены процессы адвекции, деструкции континентальной земной коры, ее океанизации (Гонтовая, Гордиенко, 2006; Гордиенко, 2001; Ермаков, 1998; Тектоносфера..., 1998). На сегодняшний день вряд ли остались сомнения об определяющем влиянии термодинамического состояния, петрофизических, геохимических и других характеристик вещества верхней мантии на историю и современную направленность тектонического развития земной коры. В данной работе делается попытка рассмотреть и выделить наиболее общие характерные особенности верхней мантии Камчатки и установить характер их связи с современной тектоникой полуострова. Для этого используется совместный анализ результатов обобщения данных глубинных геофизических исследований, выполненных в Корякско-Камчатской складчатой области

(Отчет..., 2006<sup>1</sup>) и сейсмотомографического моделирования скоростной структуры земной коры и верхней мантии Камчатки (Низкоус и др., 2006; Gorbatov et al., 1997, 1999).

### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕКТОНИКЕ КАМЧАТКИ

Большая часть территории Камчатки закрыта рыхлыми и молодыми покровными вулканогенными образованиями и поэтому наиболее целесообразно применением тектонических схем, составленных с использованием максимального спектра геолого-геофизических данных.

На схеме тектонического районирования, составленной с учетом данных глубинных геофизических исследований, в качестве основных структурных единиц выделены крупные блоки и разделяющие их складчатые зоны (рис. 1А). К числу структур с типично континентальной земной корой отнесен Срединно-Камчатский массив, с континентальной-субконтинентальной корой - Большерецкая плита и Укэлят-Срединный блок. К востоку, юго-востоку от них находятся Восточно-Камчатская и Южно-Камчатская структурно-формационные зоны, разделенные Ганальско-Петропавловским блоком (именуемым также Малко-Петропавловской или Начикинской зоной поперечных дислокаций) и Притихоокеанская зона, включающая систему блоковых поднятий восточных полуостровов Камчатки. Значительную роль в современной структуре полуострова играют многочисленные кайнозойские унаследованные и наложенные прогибы (Восточно-Камчатский, Южно-Камчатский) и депрессии (Центрально-Камчатская и другие), а также наложенные вулканические пояса. К последним относится Центрально-Камчатский (ЦКВП) и Восточно-Камчатский (ВКВП) вулканические пояса. Рядом исследователей ВКВП подразделяется на Южно- и Восточно-Камчатскую вулканические зоны и зону Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД). В составе последней можно условно выделить северную группу вулканов, включающую Ключевскую группу вулканов и вулкан Шивелуч (рис. 1А). На схеме в районе ЦКД, включая ее западное обрамление, где распространены покровные вулканические комплексы (ЦКВП), выделена Центрально-Камчатская рифтогенная зона (ЦКРЗ), включающая,

по-видимому, систему линейных структур северо-восточного простираения: две унаследованные депрессионные зоны и два, большей частью погребенных, поднятия. Земная кора региона в плане характеризуется достаточно четко проявленным зональным (блоково-полосовым) строением. В районе Южной Камчатки выделяются три, а к северо-востоку от Ганальско-Петропавловского блока - шесть зон, различающихся как мощностью, так и особенностями строения земной коры. Простираение этих зон имеет на Южной Камчатке северо-восточное, а севернее - субмеридиональное и северо-восточное направление. Характерной особенностью данной схемы является то, что район, охватывающий ЦКРЗ, отличается относительно сокращенной (28-30 км) мощностью земной коры (рис. 1Б).

На приведенной схеме показано, что важнейшее значение как в современной структуре, так и в истории геологического развития Камчатки, несомненно, имеют разнонаправленные системы глубинных разломов. К ним в первую очередь относятся глубинные сквозькоровые разломы, которые контролируют главные структурные элементы и проявления магматической деятельности. Важнейшее значение для понимания направленности развития региона имеет связь выявленных структур с особенностями строения верхней мантии.

### СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРЫ

В настоящее время основным источником информации о структуре и состоянии земных недр в областях коллизий являются данные сейсмической томографии. В этом плане не является исключением и литосфера Камчатки. Следует подчеркнуть, что особенности сейсмичности и система пунктов сейсмологических наблюдений здесь предоставляют информацию для сейсмотомографического моделирования скоростной структуры литосферы только для района Восточной Камчатки, включая восточные острова, заливы и Центрально-Камчатскую депрессию. В настоящей работе анализируются результаты расчетов аномального скоростного поля продольных волн  $V_p$  одним из методов сейсмотомографии (Kissling, 1988), который позволил значительно повысить разрешенность пространственных построений по сравнению с выполненными здесь ранее (Гонтовая и др., 2003; Федотов, Потапова, 1974; Gorbatov et al., 1997, 1999; Slavina, Pivovarova, 1992 и др.). Методика расчетов изложена в (Низкоус и др., 2006). Результаты моделирования представлены в виде горизонтальных и вертикальных сечений объемной скоростной модели и достаточно наглядно

<sup>1</sup> Отчет «Глубинные геолого-геофизические исследования сейсморазведочными (МОВЗ) и электроразведочными (МТЗ, ГМТЗ, АМТЗ) методами на региональных профилях Ейск-Ставрополь-Нефтекумск-Каспийское море (850 пог. км) и Корф-Верхнее Пенжино (500 пог. км). Анализ и обобщение данных глубинных геофизических исследований, проведенных на Северном Кавказе, Камчатке и юге Сибири». 2006 г. Гос. рег. №1-03-149/4. Т. 2-3. 490 с.

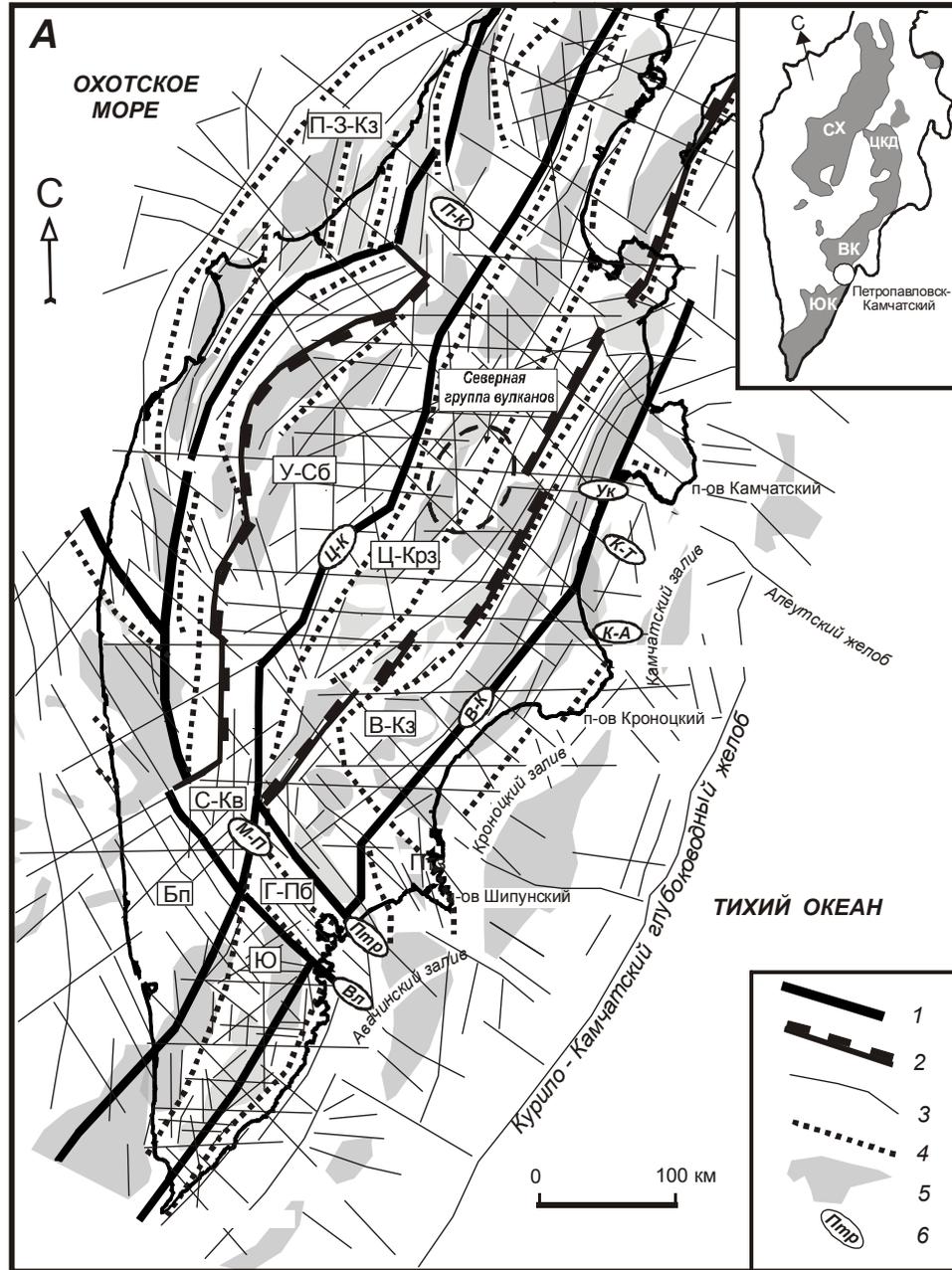


Рис. 1.

ГОНТОВАЯ И ДР.

**Рис. 1.** Фрагмент схемы тектонического районирования Корякско-Камчатской складчатой области (Отчет..., 2006<sup>1</sup>) (А) и схема мощности земной коры (Б). 1 – границы структурно-формационных зон, массивов, плит, блоков; 2 – предполагаемая восточная граница Центрально-Камчатской рифтогенной зоны и структурно-вещественных комплексов проблематичного генезиса (вулканогенно-кремнистые образования Хайрюзовского горст-антиклинория); 3 – прочие крупные разломы по геолого-геофизическим данным; 4 – оси крупных антиклинальных структур по геолого-геофизическим данным (в том числе погребенных); 5 – кайнозойские прогибы, впадины; 6 – эллипсы с буквенными обозначениями разломов (длинная ось ориентирована согласно их простиранию). Буквенные обозначения. Складчатые, складчато-глыбовые зоны: П-З-Кз – Пенжинская (Пенжинско-Западно-Камчатская), В-Кз – Восточно-Камчатская (Олюторско-Восточно-Камчатская), Ю – Южно-Камчатская, ПТз – Притихоокеанская восточных полуостровов, Ц-Крз – Центрально-Камчатская рифтогенная; У-Сб – Укэлят-Срединный блок; Бп – Большерецкая плита; С-Кв – Срединно-Камчатский массив; Г-Пб – Ганальско-Петропавловский блок. Ц-К – Центрально-Камчатская, М-П – Малко-Петропавловская, Вл – Вилючинская. К-А – Кроноцко-Андриановская, К-Т – Кроноцко-Тигильская, У-К – Усть-Камчатская, Вк – Восточно-Камчатская, П-К – Паланско-Командорская зоны разломов. На врезке серым цветом показано положение островодужных плиоцен-четвертичных вулканических поясов: ВК – Восточной Камчатки, ЮК – Южной Камчатки, ЦКД – Центральной Камчатской депрессии, СХ – Срединного хребта. Изолинии значений мощности земной коры в км.

демонстрируют структуру скоростных неоднородностей литосферы под Восточной Камчаткой (рис. 2, 3; 4 на 4 странице обложки, 5). На все профили и схемы спроецированы землетрясения, которые использовались в расчетах (показаны только события с  $K_s \geq 11$ ). Ширина полосы, из которой они выбраны для каждого вертикального сечения, составляет  $\pm 10$  км; для горизонтальных сечений они сносились из интервалов глубин  $\pm 5$  км.

Рис. 2 иллюстрирует скоростную структуру литосферы вдоль вертикальных сечений, ориентированных согласно «камчатскому» (юго-запад - северо-восток) простиранию. Профиль 1 пересекает ВКВП и побережье Камчатского залива; профили 2 и 3 - ЦКД, в северо-восточной части которой расположена Северная группа вулканов. Иллюстрируя глубинный разрез ЦКРЗ двумя близко ориентированными профилями, мы имели целью проследить характер неоднородности литосферы в широтном направлении. Скоростные разрезы демонстрируют значительную реологическую расслоенность коры и верхней мантии с протяженными и хорошо выраженными на разрезах границами раздела; основные из них охарактеризованы на рисунках абсолютными значениями скорости  $V_p$ . Наиболее четко выделяются: граница раздела кора-мантия, мантийная высокоскоростная наклонная аномалия, связанная с сейсмофокальной зоной (СФЗ) Беньюфа, и астеносферные мантийные включения под вулканическими поясами и ЦКРЗ.

Раздел Мохо (условно мы его связываем с изолинией скорости  $V_p = 7.5$  км/с) прослеживается достаточно уверенно как кровля высокоскоростной верхней мантии. Последняя – неоднородна по строению; в рисунке аномалий отчетливо проявляется взаимосвязь высоко- и низкоскоростных неоднородностей со скоростной структурой земной коры. Как правило, чем выше значение  $V_p$  в слое мантии под границей М, тем на меньших глубинах эта граница расположена.

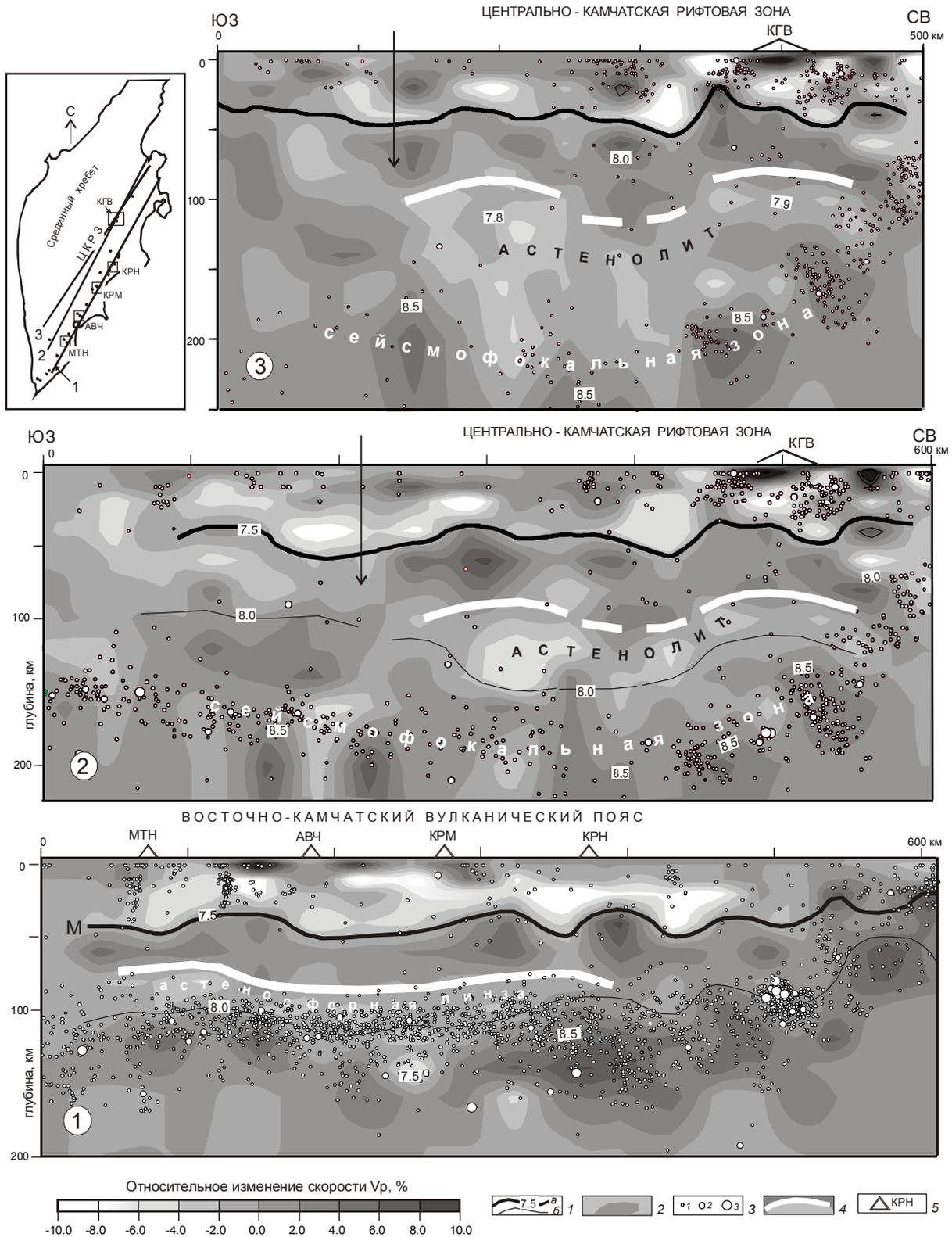
Наклонная скоростная аномалия, разделяющая океаническую и континентальную литосферы и контролируемая СФЗ, в области ее вертикальных сечений в целом представляется слоем с повышенными значениями  $V_p$  (на рисунке темные «пятна» аномалий). Однако его мощность и скоростные свойства отличаются значительной неоднородностью по латерали и глубине. Западной границе аномалии соответствуют значения скорости  $V_p = 8.0-8.5$  км/с. Непосредственно в пределах «пятен» средняя скорость характеризуется невероятно высокими значениями, которые не удается объяснить свойствами океанической плиты (отметим, что аналогичная картина получена и в других активных переходных зонах). Предлагается, к

примеру, в (Павленкова, 2002), связывать данные аномалии с каналами (зонами) проницаемости для потоков флюидов из очень глубоких горизонтов мантии. На рисунках видно, что фокальный слой разбит относительно низкоскоростными включениями; повышенный уровень сейсмичности соответствует как правило «пятнам» повышенных значений скорости.

Кровля мантийных зон инверсии скорости (астенолитных включений, астенолинз) приурочена к глубине 70-80 км; ей соответствует изолиния  $V_p = 8.0$  км/с. Скорость в пределах зон инверсии понижена на 0.2-0.4 км/с. Астеносферные неоднородности, выделенные под Камчаткой на указанной глубине, соответствуют глобальному сейсмическому разделу (N), который повсеместно выделяется в верхней мантии континентов и океанов и связывается со слоем повышенной пластичности (Спорные..., 2002). Однако под различными тектоническими зонами Камчатки астеносфера проявляется по-разному. Под ВКВП (профиль 1) она представляет собой относительно маломощный низкоскоростной слой, который практически выклинивается на широте Кроноцкого полуострова; здесь начинается разворот СФЗ к северо-западу. В литосфере ЦКД (профили 2 и 3) - это астенолит, представляющий собой мощную низкоскоростную неоднородность, в пределах которого значения  $V_p$  понижены на 2-4%. Мощность астенолита максимальна в центральной части ЦКД, уменьшаясь в восточном, южном и северном направлениях. Его положение в верхней мантии четко ограничивается глубинными структурами: с юга - Малко-Петропавловской зоной поперечных дислокаций, с севера - разломами алеутского направления; относительно восточной и западной границ ситуацию представляется возможным оценить из анализа скоростных карт. Отметим, что наибольшей мощности астенолита соответствует наибольшая «прогнутость» СФЗ (в ее вертикальном сечении) и одновременно ослабление здесь уровня сейсмичности. Обращает на себя также внимание соответствие форм кровли астенолита и раздела Мохо, что свидетельствует, очевидно, о взаимосвязи механизма их формирования. Под Северной группой вулканов северо-восточное «крыло» выделенной аномалии приподнято до глубины 80-100 км и скорость в ее пределах понижена примерно на 4%. Мощность земной коры здесь заметно меньше, а скорость в верхней коре значительно повышена.

На рис. 3 и 4 приведены блок-схемы скоростной объемной модели в виде пересечений вертикальных сечений. Профиль 3 ориентирован вдоль ЦКРЗ, профили 4, 5, 6 пересекают структуры Восточной Камчатки на широтах Карымского вулканического центра (КВЦ),

## ГЛУБИННАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КАМЧАТКИ



**Рис. 2.** Вертикальные сечения пространственной скоростной модели литосферы Восточной Камчатки. 1 – изолинии значений скорости  $V_p$  (в км/с), соответствующие разделу Мохо ( $a$ ) и другим границам ( $b$ ); 2 – аномалии скорости  $V_p$ ; 3 – эпицентры землетрясений с  $K_s = 10-11$  (1), 11-13 (2), более 13 (3); 4 – изолиния скорости  $V_p$ , соответствующая кровле астеносферных неоднородностей; 5 – вулканы вдоль ВКВП: Мутновская (МТН) и Авачинская (АВЧ) группы вулканов, Карымский вулканический центр (КРМ), Кроноцкий вулкан (КРН), Ключевская группа вулканов (КГВ). Цифрами на разрезах показаны абсолютные значения скорости в пределах аномалий, стрелками – граница смены структуры литосферы, соответствующая Петропавловской зоне разломов. Положение вертикальных сечений (профилей) показано на врезке.



Кроноцкого вулкана и Ключевской группы вулканов (КГВ). Рисунок скоростных аномалий позволяет составить представление о пространственной структуре верхней мантии и взаимосвязи мантийных, в частности астенолитных, неоднородностей под вулканическими поясами. Очевидно, что под ВКВП они имеют связь с астенолитом под ЦКРЗ (однако отметим, что в южной части ВКВП эта связь уже не прослеживается). На рис. 3 показано, что «корни» («ножка») астенолита на глубине около 200 км приурочены к узкой линейной зоне северо-восточного простирания – вероятно, Центрально-Камчатскому глубинному разлому. С востока эта «ножка» ограничена структурой наклонного фокального слоя, а на западе высокоскоростной аномалией, предположительно имеющей продолжение под восточную границу ЦКД.

Северная группа вулканов располагается над астенолитным слоем, кровля которого приподнята под КГВ на глубину около 80 км (рис. 4). Этой мантийной неоднородности соответствует на поверхности область относительных и абсолютных позднеплейстоцен-голоценовых опусканий, границы которых четко контролируются тектоническими нарушениями, проникающими в верхнюю мантию; они достаточно отчетливо проявляются в скоростном поле. В верхней мантии океанической литосферы в районе Камчатского залива на глубине 80 км выделен астеносферный слой, с которым, очевидно, связана тектоно-магматическая активность данного района. Это находит подтверждение в повышенном тепловом потоке и вещественном составе продуктов магматических извержений (Волынец и др., 1998; Селиверстов, 1998; Смирнов и др., 1991). На рис. 4 представлен скоростной разрез через КГВ в аномалиях скорости поперечных волн  $V_s$ . На глубине порядка 40–50 км наблюдается как бы «вдавливание» низкоскоростной области; под наклонным фокальным слоем скорость в мантии понижена, а под КГВ четко прослеживается практически вертикальная разуплотненная область, очевидно, насыщенная флюидами и расплавами. Таким образом, литосфера этого района настолько контрастна по упругим параметрам, что удастся выделить канал «связи» мантийных и коровых неоднородностей под вулканами и четко представить разнонаправленные движения вещества в области сочленения ОД; вероятно, с этими движениями может быть связан поворот ВКВП к западу.

Горизонтальные сечения (скоростные схемы) объемной модели позволяют проконтролировать выявленные аномальные области в пространственной структуре литосферы (рис. 5). Так, структура фокального слоя на глубине около 200 км (глубже данные отсутствуют) имеет довольно простую форму: пограничная зона океан-континент разбита поперечными низкоскоростными аномалиями, которые вероятно связаны с разломными зонами глубокого мантийного заложения. Наиболее значимая из них, северо-западного простирания, соответствует на поверхности Петропавловской зоне разломов. На схемах удастся проследить изменение структуры фокального слоя практически до раздела Мохо. В слое 100–120 км он представляет собой чередование аномальных скоростных «пятен», как правило, с высокоскоростными включениями связаны области повышенной сейсмичности. Выше по разрезу слой теряет четкие контуры, усложняется его структура, увеличивается неоднородность, он представляет собой широкую полосу из набора низко и высокоскоростных включений. Однако в целом все-таки удастся проследить общее простирание слоя, которое резко изменяется в районе Кроноцкого полуострова, разворачиваясь к северу.

На рисунке аномалий очевидна приуроченность вулканических поясов к мантийным астеносферным включениям и можно проконтролировать мощность инверсионных зон, их взаимосвязь с другими структурами верхней мантии. «Корни» астенолита в пределах ЦКРЗ приурочены к узкой (не более 30 км) низкоскоростной полосе на глубине около 200 км. Выше по разрезу область астенолитной неоднородности расширяется и на глубине 80–120 км она приобретает явную связь с областью пониженной скорости под ВКВП. В целом, скоростная модель изученного блока литосферы представляется в виде структуры растяжения, связанной с ЦКРЗ. И, вероятно, рифтовая система может обеспечить процессы сжатия в районе континентального склона, что соответствует представлениям (Ермаков, 2002).

### СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРЫ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ТЕКТНИКА

Представленные разрезы и схемы аномалий скоростного поля убедительно свидетельствуют о том, что литосфера под Камчаткой характе-

**Рис. 3.** Пространственное изображение скоростной модели литосферы в виде пересечения профилей 3 и 5. *А* – вид со стороны северо-востока, *Б* – северо-запада. Условные обозначения см. рис. 2. АЛ – астенолит под ВКВП. Штрих-пунктиром ограничены области надежных построений. Стрелкой показано положение «корня» астенолита. На врезке – положение профилей и вулканических поясов. По горизонтальным осям деления показаны через 100 км.



ризуется латеральной и вертикальной геофизической неоднородностью. Отсюда естественно возникает вопрос о связи особенностей глубинного строения земной коры и верхней мантии. Эта связь, казалось бы, не столь очевидна, однако она следует из расположения крупнейших морфотектонических структур полуострова, систем разломных зон, в том числе неотектонических блоковых поднятий и опусканий земной коры, протяженности и размещения вулканических поясов, состава продуктов извержений (Аносов и др., 1978; Апрельков и др., 1993; Гордиенко, 2002; Ермаков, 1998; Низкоус и др., 2006, Попруженко и др., 1987 и многие другие).

Рассмотрим детальнее характер и вероятные причины некоторых из этих связей. Прежде всего необходимо подчеркнуть чрезвычайно контрастную выраженность структуры разломных зон в верхней мантии и «подчиненность» характера скоростных полей разломной тектоники. Более того, анализ скоростных «пятен» (аномалий) на различных глубинах верхней мантии свидетельствует, что ряд систем глубинных разломов таких как Птр и К-Т северо-западного, К-А широтного и У-К северо-западного простираний (рис. 1А) и некоторые другие имеют фундаментальное значение в формировании современной тектоники полуострова. Наиболее контрастно в перечне глубинных разломных зон выделена система северо-западных разломов, проходящих в районе г. Петропавловска-Камчатского, ограничивающих с северо-востока Малко-Петропавловскую (Ганальский блок) зону поперечных дислокаций (рис. 3, 4). С этой зоной связаны изменения скоростной структуры фокального слоя и, вероятно, значительные горизонтальные смещения в верхней мантии. Можно предположить, что пересечение этой зоны с ЦКРЗ формирует наиболее значительную (в пределах изученных глубин) низкоскоростную область, возможно, имеющую продолжение под Срединным хребтом. И, наконец, по этой системе разломов происходит резкое изменение характера слоистости скоростной структуры верхней мантии с выклиниванием выявленного в области ЦКРЗ астенолита, что, вероятно, может объяснить более слабое проявление четвертичного вулканизма в Малко-Петропавловской зоне.

Представляется закономерным, что зональное строение земной коры (и ее мощности) в плане четко согласуется с распределением скоростных аномалий в интервале глубин 80-140 км, именно с тем слоем мантии, на уровне которого выделяются астеносферные «тела». Очевидно, термодинамические процессы в астеносфере определяют геодинамическую направленность развития литосферы в целом, включая ее верхний слой - земную кору. Ярким подтверждением

этому предположению служит распределение скоростных неоднородностей вдоль вертикальных сечений (рис. 3). Четко видно, что участкам относительного поднятия кровли астеносферы отвечают участки с относительно сокращенной мощностью коры, что может являться развитием здесь процессов апвеллинга.

К сожалению, практически отсутствуют геофизические данные о глубинном строении литосферы под Срединным хребтом. Однако, исходя из характера теплового потока и современных движений, можно предположить, что они являются следствием активных процессов, сохраняющихся в настоящее время в неоднородной верхней мантии. Из скоростной модели следует, что под центральной наиболее широкой частью Камчатки, в области между Малко-Петропавловской и Паланско-Командорской зонами поперечных дислокаций на глубинах 80-140 км существует астеносферное включение (астенолит). Геодинамические процессы в его пределах, вероятно, обуславливают общее воздымание территории и формирование геоантиклинального поднятия. Поднятие характеризуется достаточно сложным строением в связи с проявившимися и продолжающимися в позднем кайнозое вулканизмом и компенсационными процессами. Более того, если сопоставить область развития астенолита, условно продлив его в область Срединного хребта, с общими морфоструктурными особенностями строения Камчатки, которые получены по данным дешифрирования мелкомасштабных космических снимков (Морфотектонические..., 1988), то выявляется, что над областью астенолита на фоне общего воздымания сформировалась Центрально-Камчатская кольцевая депрессия. В ее тектоническое обрамление входит ряд горст-антиклинальных поднятий Восточно-Камчатских хребтов Восточно- и Западно-Камчатской зон (рис. 1А). Учитывая весьма широкое развитие в области Центрально-Камчатской кольцевой депрессии позднекайнозойских вулканитов, можно рассматривать ее как компенсационную. Эти процессы, вероятно, парагенетически связаны и со скоростной структурой мантии, отражающей термодинамические, петрофизические и другие ее свойства. Результаты геоплотностного моделирования (Отчет..., 2006<sup>1</sup>) показывают, что разуплотнение и, следовательно, отрицательные аномалии скорости сейсмических волн можно предполагать и в западной, не освещенной томографическими построениями области вулканической зоны Срединного хребта. Отметим, что здесь находится крупный действующий вулкан Ичинский, продолжающий развитие долгоживущих (неогеновых) вулканических комплексов (центров).

В целом, согласно сейсмотомографической модели особенности скоростной структуры верхней мантии во многом увязываются с региональной тектоникой. Если предположение о существовании определенной симметрии центрального типа в мантии верно (что в большой степени отражено, например, на рис. 1 и 3), то с учетом выявленных ослабленных зон («каналов»), пронизывающих СФЗ, можно предполагать существование глубинного источника поступления вещества в область астенолита (мантийного диапира). На развитие подобной структуры, возможно, указывает и изменение геометрии СФЗ под областью Центрально-Камчатского рифта. Подобное предположение, конечно же, не является бесспорным в связи с асимметрией картины общей сейсмичности, которая очень слабо проявляется в пределах Центральной Камчатки. Однако можно допустить, что последняя является следствием более фундаментальной (глубинной) неоднородности верхней мантии и само образование структуры СФЗ, как границы океан-континент, является отражением этого следствия.

#### ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ГЛУБИННЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАНТИИ ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКИ

В настоящее время основным источником информации о глубинном строении земных недр являются данные сейсмотомографии. В большинстве случаев они используются в качестве неоспоримого доказательства того или иного геодинамического процесса, протекающего в мантии, в частности в зонах субдукции. Гораздо меньшее внимание уделяется проблеме анализа внутреннего строения непосредственно самих наклонных слоев, разделяющих различные по физическим свойствам области мантии (т.н. океанических плит, поддвигающихся под континентальную мантию). Хотя ранее один из основоположников сейсмотомографии А. Дзевонски отмечал, что «при формировании скоростных аномалий в определенных областях мантии состав и строение вещества могут быть так же значимы как и термические эффекты» и что «в конечном счете для заключений о динамических процессах в недрах Земли расчет этих свойств несомненно имеет такую же важность» (Ekstrom, Dziewonski, 1998; Спорные..., 2002).

Ясно, что результаты геофизических исследований могут быть сопоставлены с гипотетическими глубинными процессами с помощью различных методик. Очевидно и то, что более эффективен контроль принятой гипотезы теми из них, которые позволяют построить гипотетическую модель литосферы и затем сравнить ее с

геофизическим полями (без подбора параметров среды). Различия при этом должны объясняться погрешностями построений. Такой уровень разработок достигнут в настоящее время адвекционно-полиморфной гипотезой глубинных процессов (Гордиенко, 2001, 2002; Гордиенко, Усенко, 2003; Тектоносфера..., 1998). На ее основе выполнено теоретическое моделирование скоростной модели верхней мантии Восточной Камчатки и сопоставлено с экспериментальной моделью, которая приведена нами выше. В качестве промежуточного результата была также построена тепловая модель региона; осуществлен ее контроль геологическими данными (Гонтовая, Гордиенко, 2006). В настоящей работе приводятся некоторые из полученных результатов.

В связи со значительными различиями глубинных процессов под Восточной Камчаткой на сегодняшний день мы ограничились районом, для которого влиянием киммерийских процессов под Охотоморской плитой на тепловую модель можно пренебречь (рис. 6). Безусловно, как следует из приведенных выше данных, скоростная модель и здесь отличается значительной неоднородностью, которая может быть рассмотрена на более детальном этапе исследований при условии наличия необходимой информации. В настоящее время это не входило в нашу задачу. Исходя из этого, для участка, ограниченного широтами Карымского вулкана (с юга) и КГВ (с севера) из набора данных пространственной сейсмотомографической модели был построен осредненный разрез верхней мантии (рис. 6). Как видно на рисунке, скоростные аномалии на осредненном профиле менее контрастны, чем на отдельных сечениях, приведенных выше (рис. 2, 3, 4). Однако различия  $V_p$  между частями модели достаточно значимы и часто превышают 0.2 км/с на одинаковой глубине. Выделяется астеносфера - интервал глубин, где значения скоростей меньше, чем в точке солидуса.

*Расчетная тепловая модель* представлена на рис. 7. Она включает мантийную астеносферу (с превышением  $T$  солидуса) на глубинах примерно 70-120 км и небольшой по мощности слой частичного плавления в коре на глубинах около 20-30 км. В последнем случае частичное плавление считалось появляющимся при  $T$  более 600°C (Тектоносфера..., 1998). Возможно отсутствие обоих слоев частичного плавления в интервале профиля 130-170 км. Вероятным кажется и существование небольшого слоя частичного плавления в низах наиболее прогретой части самой толстой коры при  $T > 1050^\circ\text{C}$ .

*Расчетная скоростная модель* вдоль интерпретационного профиля представлена на рис. 8. Она была построена на основе тепловой модели (по отличиям температур на разных глубинах от

ГЛУБИННАЯ МОДЕЛЬ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ КАМЧАТКИ

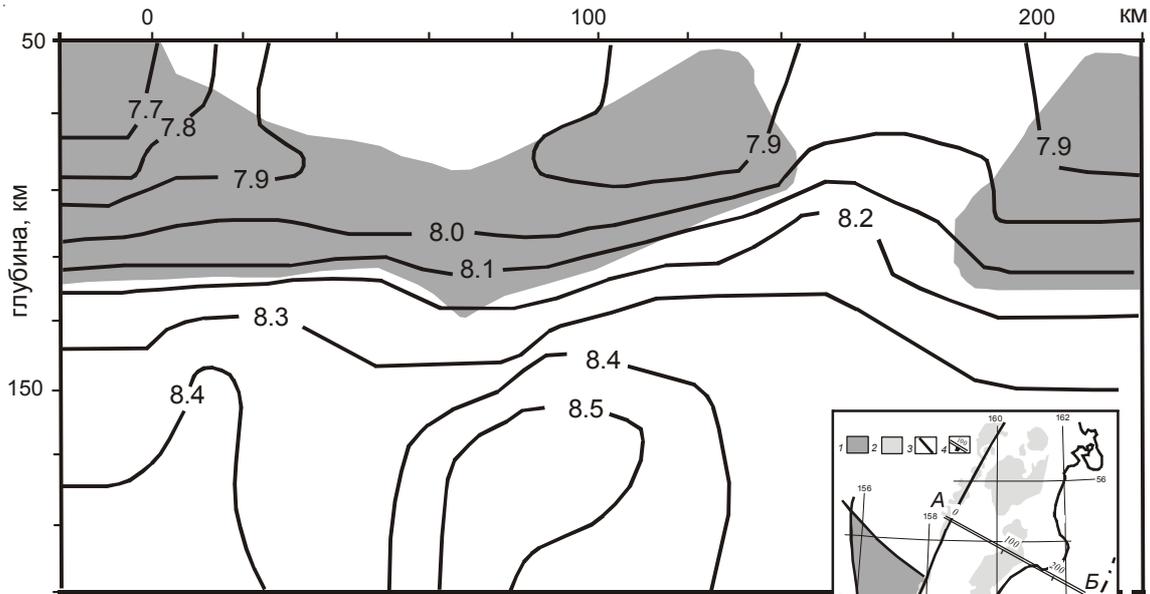


Рис. 6. Осредненный разрез экспериментальной трехмерной модели в изолиниях скорости  $V_p$ , км/с. Положение сводного интерпретационного профиля  $AB$  показано на врезке: 1 – активизированная часть Охотоморской плиты, 2 – молодые эффузивы, 3 – разломы, 4 – условная линия профиля.

фоновых под докембрийской платформой) и данным о распределении скоростей в мантии докембрийской платформы (отвечающим принятой гипотезе и лерцолитовому составу мантийных пород). Данные об изменении  $V_p$  с температурой на разных глубинах в настоящее время неплохо исследованы (Sobolev et al., 1996). При

расчете зависимость  $V_p(T)$  упрощалась до линейной, что в целом не приводит к погрешностям более 0.01 км/с. Считалось, что отличия в температуре от фоновой (под платформой) в 100°C изменяют  $V_p$  на 0.06 км/с. При появлении расплава (превышении  $T$  солидуса пород мантии  $T_c = 1013 + 3.914N - 0.0037N^2$ , где  $N$  – глубина в км (Гордиенко и др., 2003)) значения  $V_p$  дополнительно понижаются на 0.07 км/с на каждый процент его концентрации. Количество расплава считалось увеличивающимся от 1% в точке солидуса на 1% с ростом  $T$  на 50°C (Гордиенко, Усенко, 2003).

Очевидны совпадающие с экспериментальной моделью и отличающиеся от нее элементы. В целом (за исключением самой верхней части разреза) расчетные скорости оказываются незначительно ниже экспериментальных.

*Изменения плотности*, возникшие в ходе активных глубинных процессов в мантии Восточной Камчатки, были рассчитаны по аномальным температурам. Считалось (Гордиенко, Усенко, 2003; Sobolev et al., 1996 и др.), что плотность изменяется на 0.013 г/см<sup>3</sup> при изменении  $T$  на 100°C, 1% расплава разуплотняет

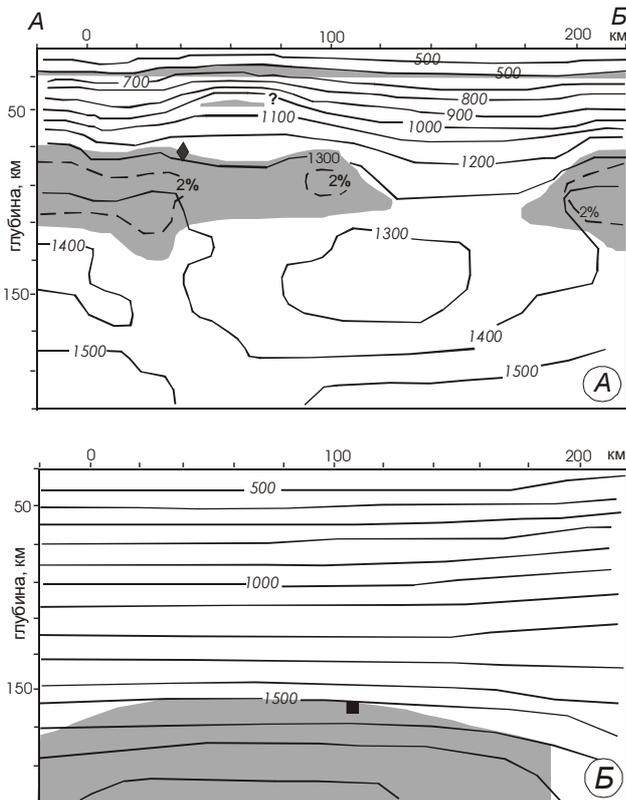
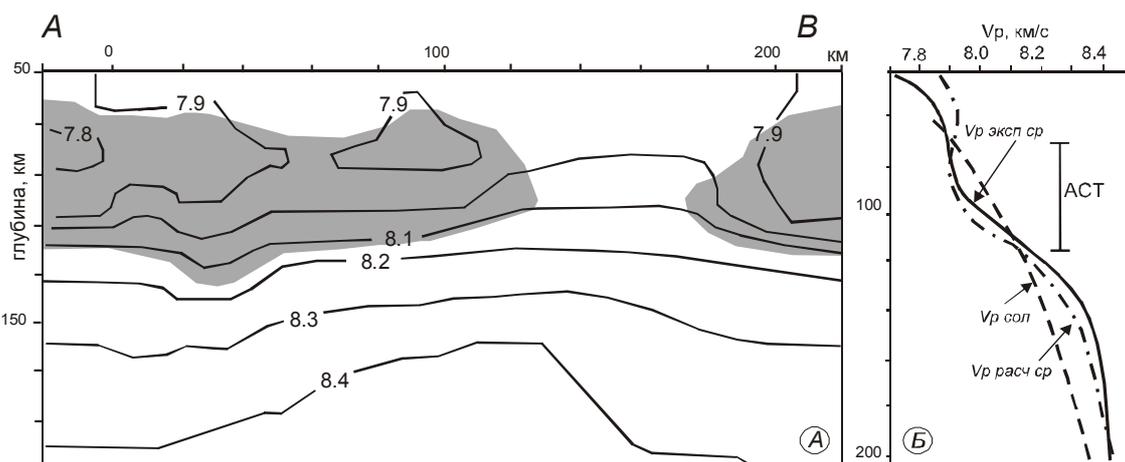


Рис. 7. Тепловая модель (изотермы в °C) вдоль сводного профиля  $AB$ .  $A$  – современная модель,  $B$  – для 100 млн. л. назад. Серым показаны слои частичного плавления. Штриховая линия – граница области концентрации расплава более 2%. Черными ромбом и квадратом отмечены очаги магматизма (Гонтовая, Гордиенко, 2006).



**Рис. 8.** Расчетная скоростная модель (км/с), серым показана астеносфера (А). Сравнение средних расчетной, экспериментальной и на солидусе пород мантии скоростей вдоль сводного профиля АБ (Б). АСТ – астеносфера по данным сейсмологии и геотермии. Положение профиля показано на рис. 6.

породу на  $0.003 \text{ г/см}^3$ . На каждой глубине была рассчитана средняя плотность и определены отличия от нее, представленные на рис. 9. Можно говорить о качественном сходстве распределений двух параметров – аномальной плотности и концентрации землетрясений (рис. 9А и 9Б). Представляется, что сравнительно плотный наклонный блок пород, разделяющий континентальную и океаническую мантии, может создавать сейсмогенерирующие напряжения. Но для более достоверного заключения, безусловно, необходим количественный анализ ситуации.

Рассмотренные плотностные аномалии показывают, что в регионе был бы эффективен контроль принятой схемы глубинных процессов

величиной мантийной гравитационной аномалии (Тектоносфера..., 1998). Но для ее вычисления необходим скоростной разрез коры по данным ГСЗ непосредственно в изучаемом районе. К сожалению подобные данные на Камчатке отсутствуют.

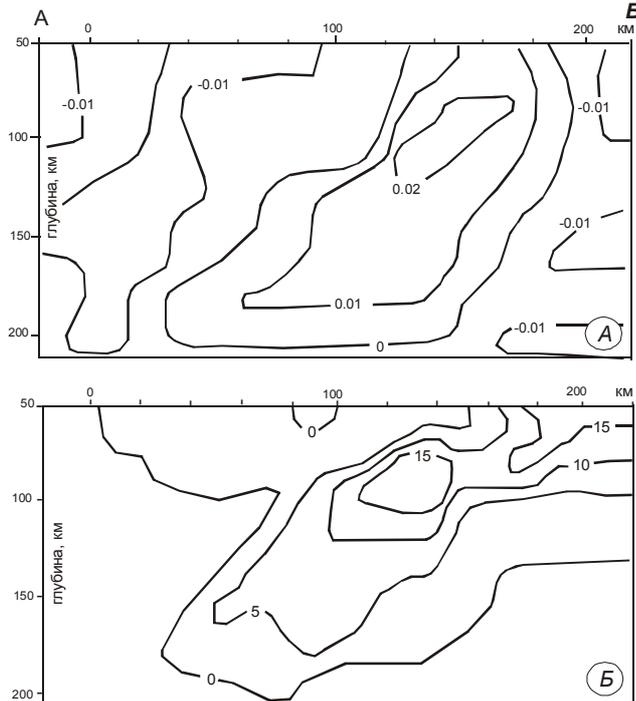
Однако, в целом, как нам представляется, удалось на количественном уровне (в рамках реальных погрешностей расчетов) объяснить распределение скорости продольных сейсмических волн в мантии Восточной Камчатки глубинным процессом, протекающим по адвекционно-полиморфной схеме.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя изложенное, можно сделать ряд в различной степени обоснованных выводов:

- результаты геофизических исследований, в частности выполненных методом сейсмотомографии, свидетельствуют о том, что верхняя мантия под Камчаткой характеризуется резкой вертикальной и латеральной скоростной, плотностной и, возможно, петрофизической неоднородностями и имеет слоисто-блоковую структуру;
- «корни» вулканических поясов приурочены к зонам инверсии скорости на глубине 80-120 км;
- выявленный под Центрально-Камчатской рифтогенной зоной астенолит, мощность которого составляет не менее 100 км, возможно, обусловлен более глубоким источником поступления вещества, с которым опосредованно взаимосвязан современный вулканизм северной части ВКВП;

**Рис. 9.** Аномальные плотности пород  $\text{г/см}^3$  (А) и распределение количества гипоцентров землетрясений (с  $K_s = 11$ ) в мантии под сводным профилем АБ (Б). Положение профиля показано на рис. 6.



- с астенолитными включениями океанической верхней мантии в области сочленения островных дуг, вероятно, связана новейшая тектономагматическая активность в районе Камчатского залива;

- на ряде глубинных уровней верхней мантии преобладающим является подчиненность ее структуры разломной тектонике; более того, разломные зоны проникают сквозь фокальный слой и, вероятно, могут являться каналами выноса глубинного вещества (расплавов и флюидов).

- особенности глубинных процессов, протекающих под Восточной Камчаткой, могут быть объяснены тепловым режимом верхней мантии и адвекционно-полиморфным механизмом подъема глубинного вещества. Их последствия согласуются со скоростной моделью мантии и составами магматических пород.

Авторы выражают благодарность И.Л. Беловой за помощь в техническом оформлении и В.А. Рашидову за внимательный анализ статьи.

#### Список литературы

- Авдейко Г.П., Волюнец О.Н., Антонов А.Ю.* Вулканизм Курильской островной дуги, структурно-петрохимические аспекты проблемы и проблемы магмообразования // Вулканология и сейсмология. 1989. № 5. С. 3-16.
- Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Тектоническое развитие и вулканотектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С. 64-80.
- Аносов Г.И., Биккенина С.К., Попов А.А. и др.* Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.
- Апрелков С.Е., Ольшанская О.Н., Иванова Г.И.* Тектоника Камчатки // Тихоокеанская геология. 1993. № 3. С. 62-75.
- Волюнец О.Н., Карпенко С.Ф., Кэй Р.У. и др.* Изотопный состав позднеэоценовых К-Нашелочных базальтоидов Восточной Камчатки: отражение гетерогенности мантийного источника магм // Геохимия. 1997. № 10. С. 1005-1018.
- Волюнец 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.
- Гонтовая Л.И., Левина В.И., Санина И.А. и др.* Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 56-64.
- Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В.* Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива // В сб. Геология и полезные ископаемые мирового океана. Киев, Наукова думка, 2006. № 2. С. 107-122.
- Гордиенко В.В.* Адвекционно-полиморфный процесс в тектоносфере переходной зоны тихоокеанского типа // Геофизический журнал. 2001. № 6. С. 21-39.
- Гордиенко В.В.* О возможной альтернативе тектонике плит (тепловые процессы в тектоносфере, геологическая история и физические поля) // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 84-96.
- Гордиенко В.В., Усенко О.В.* Глубинные процессы в тектоносфере Украины. К. ИГФ НАНУ, 2003. 147 с.
- Ермаков В.А.* Континентализация или океаногенез? // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС, 1998. Т.1. С. 188-190.
- Ермаков В.А.* Особенности развития активной континентальной окраины (на примере Курило-Камчатского региона) // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 58-188.
- Леглер В.А.* Деформация погружающейся литосферной плиты и продольные сдвиги Курило-Камчатской островной дуги // Тектоника литосферных плит. М.: Наука, 1976. С. 103-147.
- Морфотектонические системы центрального типа Сибири и Дальнего востока.* М.: Наука, 1988. 214 с.
- Низкоус И.В., Санина И.А., Кислинг Э, Гонтовая Л.И.* Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан-континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли. 2006. № 4. С. 18-29.
- Очерки тектонического развития Камчатки.* М.: Наука, 1987. 248 с.
- Павленкова Н.И.* Структура земной коры и верхней мантии и глобальная геотектоника // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. С. 64-83.
- Попруженко С.В. Апрельков С.Е., Ольшанская О.Н.* Восточно-Камчатский вулканический пояс в свете геофизических данных // Вулканология и сейсмология. 1987. № 2. С. 14-24.
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 164 с.

- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., Яновский Ф.Ф.* Земной тепловой поток Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 1991. № 2. С. 41-65.
- Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 190 с.
- Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. Владивосток. ДВО РАН, 1998. 238 с.
- Трифонов В.Г., Востриков Г.А., Кожурин А.И. и др.* Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1988. 365 с.
- Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 455 с.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышева Г.В. и др.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // *Вулканология и сейсмология*. 1985. № 4. С. 91-107.
- Федотов С.А., Потапова О.В.* Предварительная карта тел на глубинах 30-100 км в верхней мантии под Камчаткой, экранирующих Р- и S-волны // *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке*. М.: Наука, 1974. С. 176-178.
- Флеров Г.Б., Федоров П.И., Чурикова Т.Г.* Геохимия позднемеловых палеогеновых калиевых пород ранней стадии развития Камчатской островной дуги // *Петрология*. 2001. том 9. № 2. С. 189-208.
- 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.
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Suarez G. et al.* Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // *JGR*. 1997. V. 102. P. 17883-17898.
- Ekstrom G., Dziewonski A. M.* The unique anisotropy of the Pacific upper mantle // *Nature*. 1998. 394. P. 168-172.
- Kissling E.* Geotomography with Local Earthquake Data // *Reviews of Geophysics*. 1988. V. 26. P. 659-698.
- Levin V., Shapiro N., Park J. et al.* Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*. 2002a. V. 418. P. 763-766
- Slavina L.B., Pivovarova N.B.* Three-dimensional velocity models of focal zones and refinement of hypocentral parameters. // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1992. № 75. P. 77-78.
- Sobolev S., Zeyen H., Stoll G. et al.* Upper mantle temperatures from teleseismic tomography of French Massif Central // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. 139. P.147-163.
- Volynets O.N.* Geochemical types, petrology, and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // *Intern. Geol.* 1994. V. 36. P. 373-405.

## A DEPTH MODEL FOR THE UPPER MANTEL OF KAMCHATKA

L. I. Gontovaya<sup>1</sup>, V. V. Gordienko<sup>2</sup>, S. V. Popruzhenko<sup>3</sup>, I. V. Nizkous<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology RAS FEB, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Geophysics, Ukraine National Academy of Sciences, Kiev, 03680*

<sup>3</sup>*Territorial Agency for Subsoil Use of Kamchatka Region and Koryak Autonomous Okrug (Kamchatnedra), Ministry of Natural Resources of Russian Federation, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683016, Russia, e-mail: geolog@mail.kamchatka.ru*

<sup>4</sup>*Schlumberger Logelco Inc., Moscow, e-mail: aldiva@mail.ru*

Data of geologic and geophysical research done in Kamchatka were compared to the velocity model for the upper mantel. The comparison revealed a consistent spatial structure in the lithosphere of the region. The modeling showed asthenolith under the Central-Kamchatka rift zone. Its thickness and boundaries were detected in the upper mantel of Eastern Kamchatka.

Asthenolyth inclusions at 70-120 km depth beneath modern volcanic belts revealed a relationship between these inclusions, continental lithosphere and seismic focal zone velocity structures. Structure of the upper mantle at variety of depths corresponds to fault tectonics.

Revealed characteristics of the deep structure of Kamchatka were studied using advection-polymorphous hypothesis. Results revealed that deep-structure processes agree with the suggested model for the mantle in the studied interval of depths.