

ВЕРХНЯЯ МАНТИЯ КАМЧАТКИ: ГЛУБИННАЯ МОДЕЛЬ И СВЯЗЬ С ТЕКТОНИКОЙ

*Л.И. Гонтовая¹, С.В. Попруженко², И.В. Низкоус³, С.Е. Апрельков¹*¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*²*Камчатнедра, Министерство природных ресурсов РФ, г. Петропавловск-Камчатский*³*Schlumberger Logelco Inc., г. Москва*

Поступила в редакцию 19 апреля 2007 г.

По результатам сопоставления данных геолого-геофизических исследований Камчатки со скоростной сейсмотомографической моделью верхней мантии получена согласованная пространственная структура литосферы региона. Впервые под Центрально-Камчатской рифтовой зоной выявлен астенолит, определены его границы, мощность и область распространения в литосфере Восточной Камчатки. Под современными вулканическими поясами установлены низкоскоростные включения, имеющие связь со скоростной структурой фокального слоя и характером сейсмичности в его пределах. Показано, что преобладающим на ряде глубинных уровней верхней мантии является подчиненность ее структуры разломной тектонике. Наиболее контрастной является система северо-западных разломов (в районе г. Петропавловска-Камчатского), с которой, вероятно, связаны значительные горизонтальные смещения в верхней мантии. Предполагается, что выявленные астенолитные неоднородности имеют продолжение под Срединный хребет.

Ключевые слова: сейсмическая томография, скоростная модель, литосфера, верхняя мантия, астеносфера, рифтовая зона, вулканы, разломы, п-ов Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Камчатка, являясь частью переходной зоны между Азиатским континентом и Тихим океаном в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (ОД), характеризуется значительной сложностью протекающих здесь глубинных процессов. Это находит отражение в чрезвычайно высоком уровне сейсмической активности и изменении параметров сейсмофокальной зоны (СФЗ) вдоль полуострова [25], уникальном по объему и составу лав вулканизму [1, 6, 7, 23, 26, 33], дискордантности динамических процессов на разных уровнях литосферы [22], сосуществовании двух тектонических режимов (орогенеза и рифтогенеза) [10, 11] и других характеристиках. В такой ситуации естественно возникновение различных точек зрения для реконструкции истории тектонического развития Камчатки, природы и направленности протекающих здесь глубинных процессов. С позиций тектоники плит (а сторонников этой гипотезы в настоящее время большинство) формирование тектонических элементов Камчатки связывается с различными этапами субдукции [2, 12, 27, 31 и др.]. Развиваются и другие, альтернативные плейт-тектонике точки зрения относительно природы протекающих в данном районе

глубинных процессов [5, 9, 10, 19, 21 и др.]. Сегодня вряд ли у кого-нибудь остались сомнения в определяющем влиянии термодинамического состояния, петрофизических, геохимических и других характеристик вещества верхней мантии на историю и современную направленность тектонического развития самой верхней оболочки Земли – земной коры.

В данной работе делается попытка рассмотреть характер этой взаимосвязи на территории Камчатки. Для этого используется совместный анализ результатов комплексной интерпретации и обобщения данных глубинных геофизических исследований (МОВЗ, МТЗ, гравиметрии), выполненных в Корякско-Камчатской складчатой области, и уточненной на их основе тектонической схемы региона и сейсмотомографического моделирования скоростной структуры земной коры и верхней мантии Камчатки.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕКТОНИКЕ КАМЧАТКИ

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

На приведенной нами тектонической схеме, составленной с учетом данных глубинных геофизических исследований, в качестве основных структурных единиц выделены крупные блоки и разделяющие их складчатые зоны (рис. 1). К числу структур с типично континентальной земной корой отнесен Срединно-Камчатский массив; с континентальной-субконтинентальной корой – Большерецкая плита и Срединно-Укэляятский 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), а также наложенные вулканические пояса. К последним относятся Центрально-Камчатский (ЦКВП) и Восточно-Камчатский (ВКВП) вулканические пояса. ВКВП рядом исследователей подразделяется на Южно- и Восточно-Камчатскую вулканические зоны и зону Центрально-Камчатской депрессии (ЦКД), в составе которой можно условно выделить северную активную вулканическую группу, включающую Ключевскую группу вулканов и вулкан Шивелуч (рис. 1). 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 простираии: 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. Простираии зон имеет на Южной Камчатке северо-восточное направление, а севернее – субмеридиональное и северо-восточное). Характерной особенностью данной схемы является то, что район, охватывающий ЦКРЗ, отличается относительно сокращенной (28–30 км) мощностью земной коры (рис. 2).

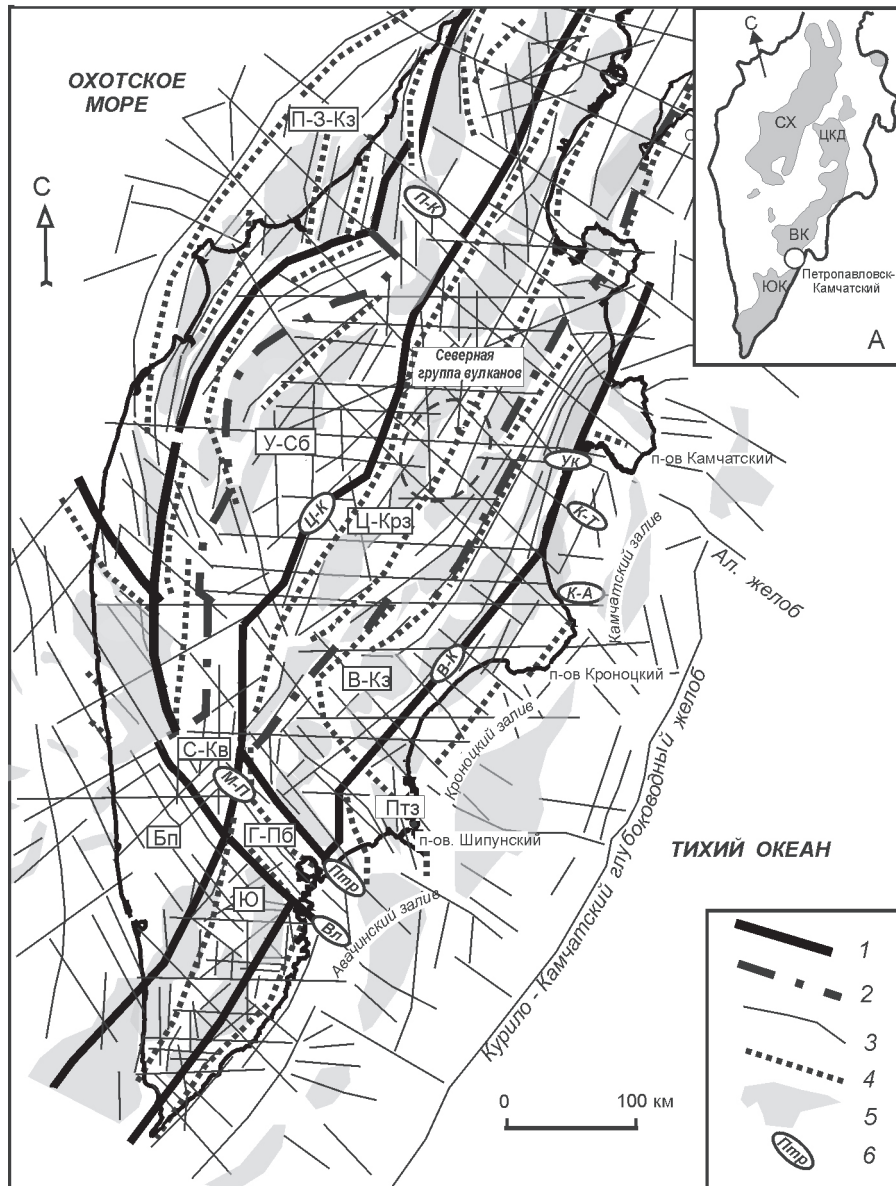
Из приведенной схемы очевидно, что важнейшее значение как в современной структуре, так и в истории геологического развития Камчатки, несом-

ненно, имеют разнонаправленные системы, в первую очередь 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.

СКОРОСТНАЯ МОДЕЛЬ ЛИТОСФЕРЫ ПОД ВОСТОЧНОЙ КАМЧАТКОЙ

Глубинная скоростная модель верхней мантии под Камчаткой построена методом сейсмической томографии на основе времен вступлений продольных (P) и поперечных (S) волн камчатских землетрясений, взятых из каталога данных, разработанных КОМСП ГС РАН. Основная масса землетрясений сосредоточена в области СФЗ. В процессе расчетов был использован усовершенствованный подход к моделированию скоростного поля в коре и верхней мантии [14, 30], который позволил значительно повысить разрешающую способность пространственных построений по сравнению с более ранними работами [8, 17, 24, 28, 29, 32]. Результаты моделирования представлены в виде горизонтальных и вертикальных сечений объемной скоростной модели и достаточно наглядно демонстрируют структуру скоростных неоднородностей литосферы под Восточной Камчаткой (рис. 3, 4). Площадь, на которой удалось получить надежные данные в различных интервалах глубин, ограничена особенностями сети сейсмологических станций и расположением гипоцентров местных землетрясений. Как следует из рисунков, пространственная разрешающая способность метода с глубиной существенно уменьшается. 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 ± 10 км; для горизонтальных сечений они сносились из интервалов глубин ± 5 км.

Рис. 3 иллюстрирует скоростную структуру литосферы вдоль вертикальных сечений, ориентированных согласно “камчатскому” (юго-запад – северо-восток) простираиию. Профиль 1 пересекает ВКВП и побережье Камчатского залива; профили 2 и 3 – Центрально-Камчатскую рифтовую зону (ЦКРЗ), 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



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.

Зоны разломов:

Ц-К – Центрально-Камчатская, М-П – Малко-Петропавловская, Вл – Вилючинская,

К-А – Кроноцко-Андриановская,

К-Т – Кроноцко-Тигильская,

У-К – Усть-Камчатская,

В-К – Восточно-Камчатская,

П-К – Паланско-Командорская.

Рис. 1. Фрагмент схемы тектонического районирования Корьякско-Камчатской складчатой области (составили Апрельков и Попруженко).

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 – зоны глубинных разломов (эллипсы ориентированы согласно простиранию 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.

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: грани-

ца раздела кора-мантия, мантийная высокоскоростная наклонная аномалия, связанная с сейсмофокальной зоной (СФЗ) Беньюфа и низкоскоростные мантийные аномалии (астеносферные включения) под вулканическими поясами.

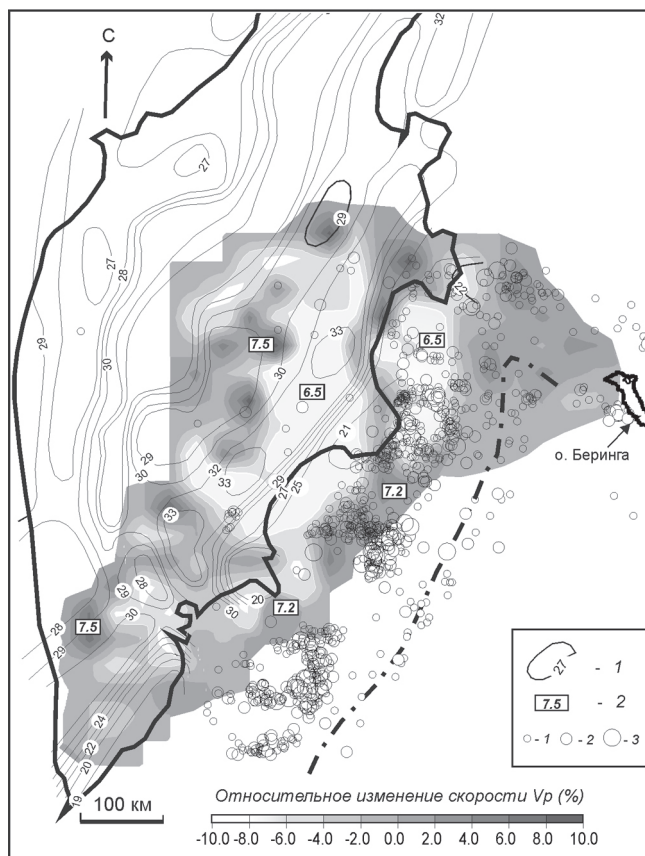


Рис. 2. Схема сопоставления мощности земной коры и скоростных аномалий в слое 20–40 км.

1 – изолинии мощности земной коры; 2 – значение скорости V_p . Кружками показаны эпицентры землетрясений с энергетическим классом K_s , равным 10–11 (1), 11–13 (2), больше 13 (3).

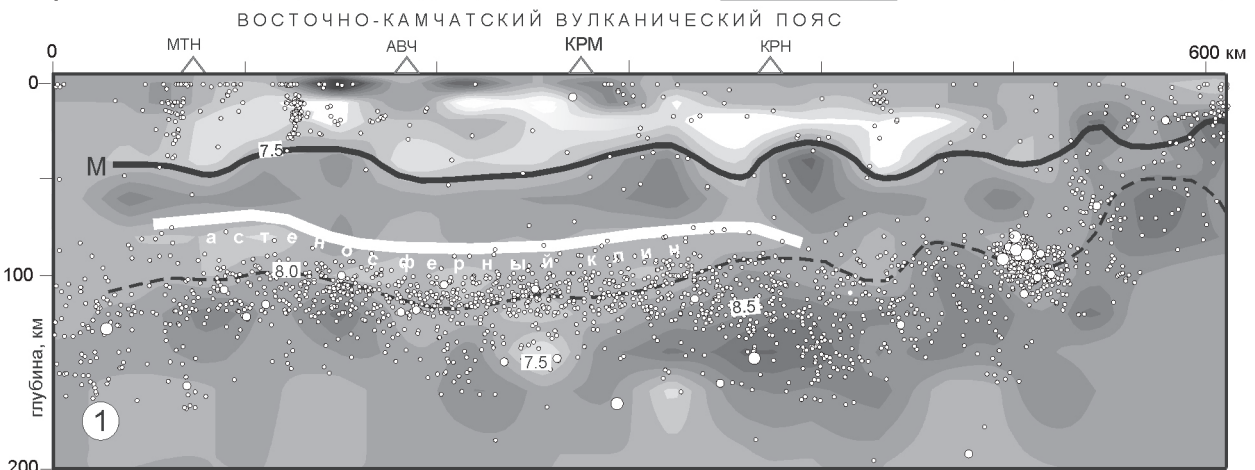
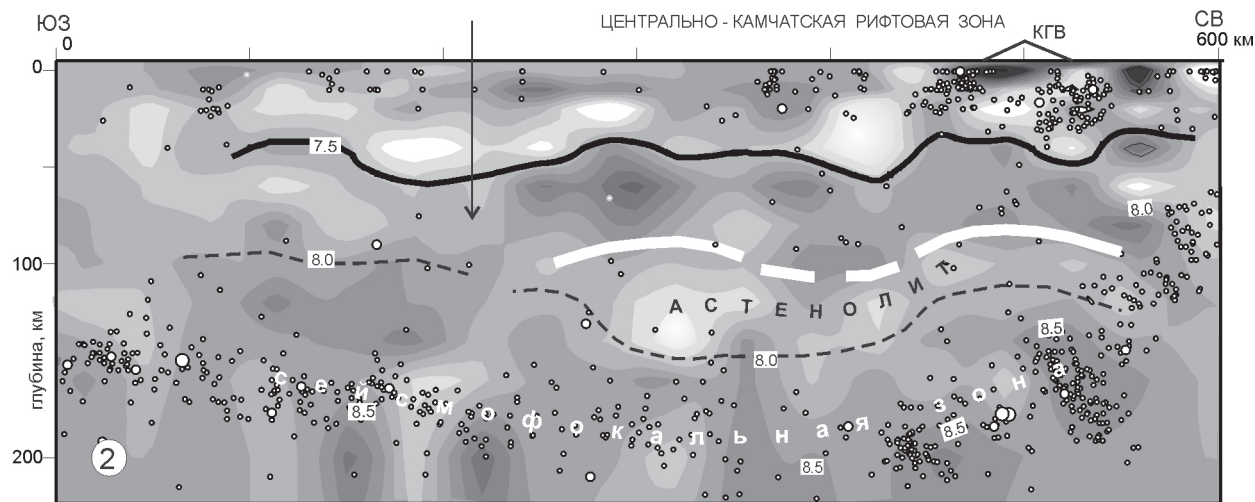
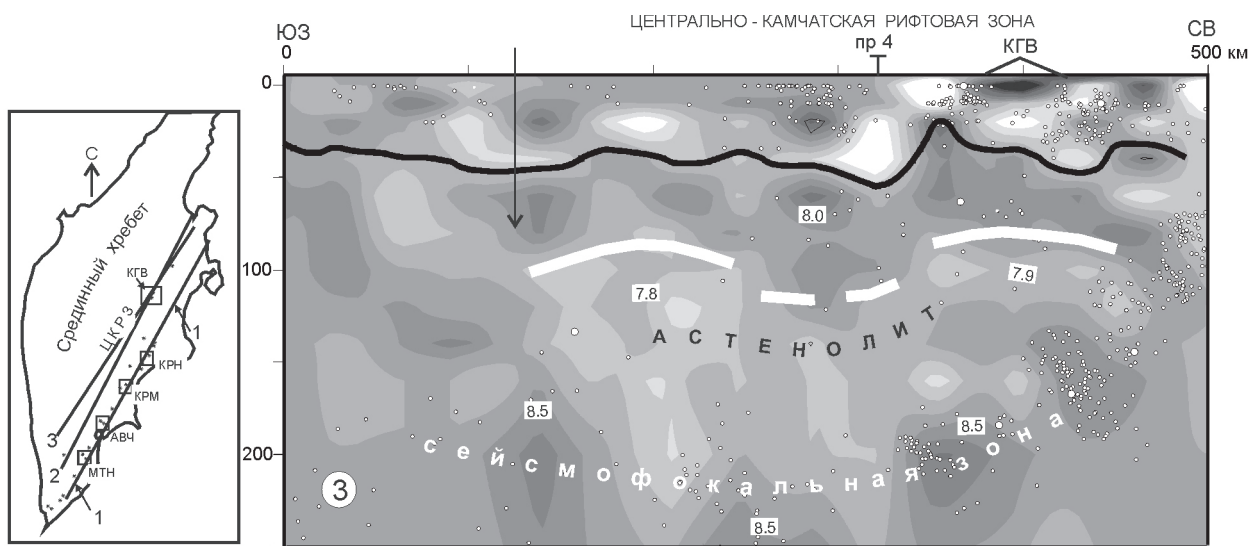
Раздел Мохо (условно мы его связываем с изолинией скорости $V_p = 7.5$ км/с) прослеживается достаточно уверенно как кровля высокоскоростной верхней мантии. Последняя – неоднородна по строению и в рисунке аномалий отчетливо проявляется взаимосвязь высоко- и низкоскоростных мантийных неоднородностей со 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 мантийная аномалия (слой) – переходная зона между океанической и континентальной мантиями – в целом представляется областью с преобладающими высокоскоростными “пятнами”. Однако ее мощность и скоростные свойства отличаются значительной неоднородностью по латерали и глубине. Кровле этого слоя (его западная граница) соответствуют значения скорости V_p , равные 8.0–8.5 км/с. Средние скорости в пределах слоя характеризуются

невероятно высокими значениями, для объяснения которых используются различные предположения, в частности [9, 16]. Наклонный слой разбит относительно низкоскоростными включениями; повышенный уровень сейсмичности, как правило, связан с высокоскоростными аномалиями или зонами значительных скоростных градиентов.

Кровле зон инверсии скорости (астеносферных включений) в верхней мантии соответствует изолиния со значением V_p , примерно равным 8.0 км/с. Скорость в пределах зоны инверсии понижена на 0.2–0.4 км/с. Следует отметить, что астеносферные неоднородности на примерно такой же глубине (им соответствует сейсмическая граница N) выделяется в верхней мантии континентов и океанов; их связывают со слоем повышенной пластичности [16]. Таким образом, переходная зона океан–континент также не является исключением из общего “глобального” правила. 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 ЦКРЗ (профили 2 и 3) – это, по-видимому, астенолит, представляющий собой мощную низкоскоростную неоднородность; в его пределах значения V_p понижены на 2–4%. Мощность астенолита максимальна в центральной части ЦКД, уменьшаясь в восточном, южном и северном направлениях. Ее распространение в верхней мантии четко ограничивается глубинными разломными зонами: с юга – Малко-Петропавловской зоной поперечных дислокаций, с севера – разломами алеутского направления; относительно восточной и западной границ ситуация более прозрачна при анализе скоростных карт. Отметим, что наибольшей мощности астенолита соответствует наибольшая “прогнутость” СФЗ (ее вертикального сечения под ЦКРЗ) и одновременно ослабление уровня сейсмичности. Обращает на себя внимание соответствие форм кровли астенолита и раздела Мохо, что свидетельствует, очевидно, о взаимосвязи механизмов 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. 4 показано пространственное положение астенолита в общей структуре верхней мантии под Восточной и Центральной Камчаткой (модель



демонстрирует пересечение двух разно ориентированных вертикальных сечений – вдоль и вкрест простирания Камчатки – на широте полуострова Кроноцкий). Четко видно, что “корни” астенолита приурочены к узкой линейной зоне, связанной, очевидно, с Центрально-Камчатским глубинным разломом.

Горизонтальные сечения (схемы) объемной модели позволяют проконтролировать выявленные скоростные аномальные объекты в пространственной структуре литосферы (рис. 5). Так, высокоскоростной наклонный слой – раздел между континентальной и океанической мантиями – на глубине около 200 км (глубже данные отсутствуют) имеет довольно простую форму и разбит поперечными низкоскоростными аномалиями, которые, вероятно, связаны с разломными зонами мантийного заложения, секущими этот слой. Наиболее значимая из них, северо-западного простирания, соответствует на поверхности Малко-Петропавловской зоне поперечных дислокаций. На схемах удается проследить изменение структуры фокального слоя практически до раздела Мохо. В слое 100–120 км он представляет собой чередование аномальных скоростных “пятен”: с высокоскоростными, как правило, 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 неоднородностей. Однако в целом все-таки удается проследить ее общее простирание, которое резко изменяется в районе Кроноцкого полуострова, разворачиваясь к северу. Особенности сейсмичности в пределах СФЗ, как следует из рисунка аномалий и распределения гипоцентров, в целом взаимосвязаны.

Из рисунка аномалий очевидна приуроченность вулканических поясов к мантийным астеносферным неоднородностям. Можно проконтролировать мощность инверсионных зон, их взаимосвязь с другими структурами верхней мантии. Так, на глубине 80–120 км контрастно проявляется область пересечения разуплотненных мантийных слоев “камчатского” и “алеутского” направлений, в центре этой области – Северная группа вулканов (рис. 5). Полученная ско-

ростная структура и связанный с ней высокий уровень сейсмичности в районе побережья Камчатского залива нам представляется важным результатом с точки зрения дальнейших геодинамических построений. “Корни” астенолита в пределах ЦКРЗ приурочены к узкой (не более 50 км) низкоскоростной полосе на глубине около 200 км. С востока аномалия ограничена фокальным слоем и представляется очевидной взаимосвязью этой структуры с мантийными неоднородностями под вулканическими поясами

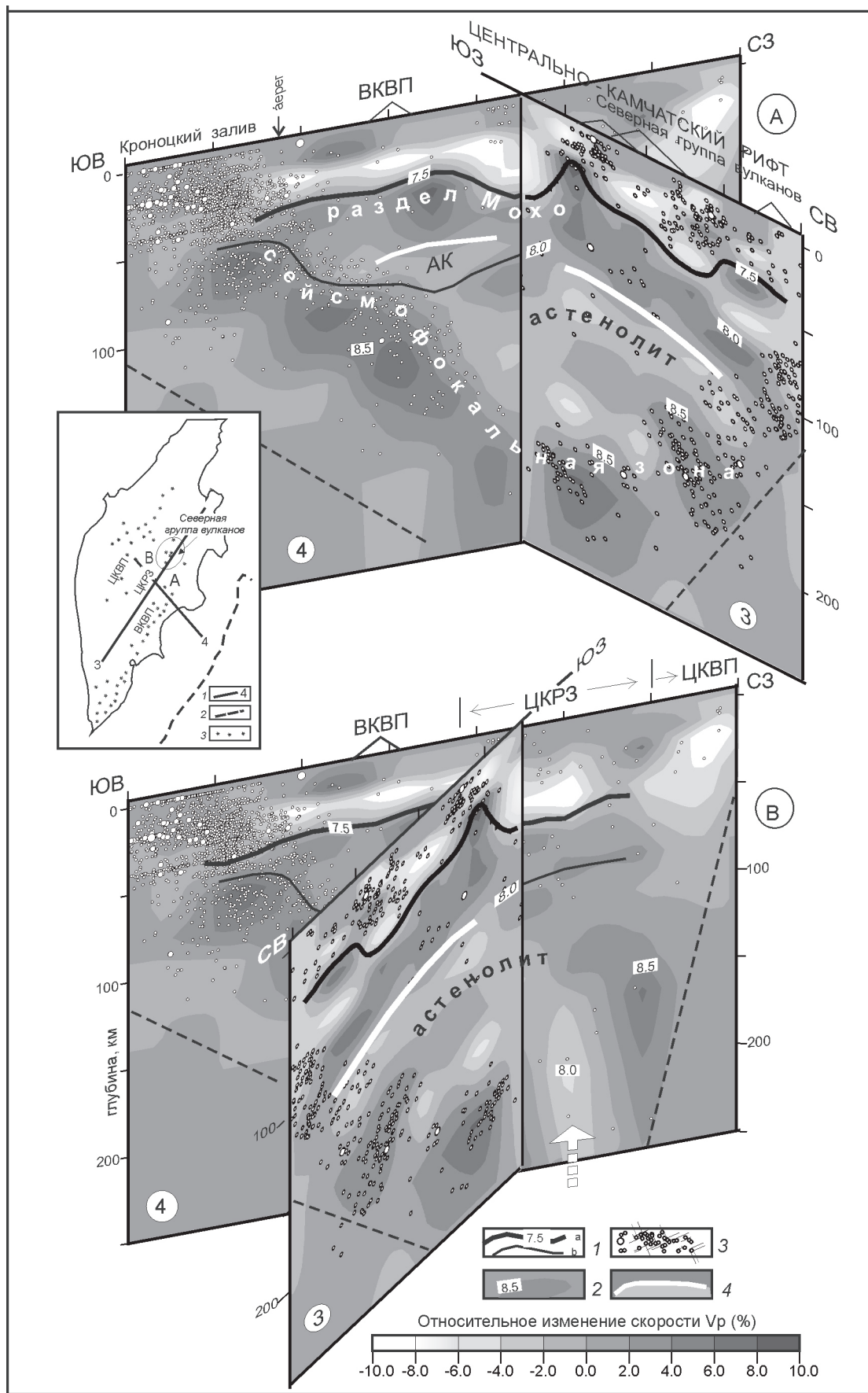
Представленные разрезы и схемы аномалий скоростного поля убедительно свидетельствуют о том, что литосфера под Камчаткой характеризуется латеральной и вертикальной геофизической неоднородностью. Отсюда естественно возникает вопрос о связи особенностей глубинного строения земной коры и верхней мантии. 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 зон, поясов, состава продуктов извержений [3, 4, 13, 15, 18, 22 и многие другие]. Ниже рассмотрим более детально характер и вероятные причины некоторых из этих связей.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕКТониКИ СО СКОРОСТНОЙ МОДЕЛЬЮ ЛИТОСФЕРЫ

На рис. 2 сопоставляется скоростная структура в слое 20–40 км со схемой мощности земной коры. Поскольку как по данным МОВЗ, так и по данным сейсмической томографии оценки мощности земной коры имеют достаточно высокую (не менее 5 %) погрешность, постольку сопоставление этих данных целесообразно проводить на качественном уровне. Как следует из рисунка, мощность коры под Камчаткой изменяется в интервале 20–35 км. Поэтому можно сделать вывод, что при анализе схемы скоростных аномалий в слое 20–40 км, включающем в разных пропорциях как низы коры, так и верхи мантии, для тех районов, где по данным ГСЗ, МОВЗ и гравиметрии предполагаются максимальные мощности зем-

Рис. 3. Вертикальные сечения пространственной скоростной модели литосферы Восточной Камчатки.

1 – изолинии значений скорости V_p (в км/с), соответствующие разделу Мохо (а) и другим границам (б); 2 – аномалии скорости V_p ; 3 – эпицентры землетрясений с $M_s = 10–11$ (1), 11–13 (2), более 13 (3); 4 – изолиния скорости V_p , соответствующая кровле астеносферных неоднородностей; цифрами на разрезах показаны абсолютные значения скорости в пределах аномалий; 5 – вулканы вдоль ВКВП: МТН – Мутновская, АВЧ – Авачинская группы вулканов, КРМ – Карымский вулканический центр, КРН – Кроноцкий вулкан, КГВ – Ключевская группа вулканов. Стрелками показана граница резкой смены структуры литосферы, соответствующая на поверхности Петропавловской зоне разломов. Положение вертикальных сечений (профилей) показано на врезке.



ной коры, должны наблюдаться относительно пониженные скоростные аномалии и, соответственно, повышенные, если мощность коры минимальна. Из рисунка следует, что в области ЦКРЗ и Большерецкой плиты на юго-западе полуострова с относительно пониженной (до 29 км) мощностью коры наблюдаются участки с относительно повышенными средними скоростями. Протяженная линейная зона повышенной мощности коры к востоку от этой зоны характеризуется, как и следовало ожидать, отрицательными аномалиями. Зона с относительно уменьшенной мощностью коры вдоль восточных полуостровов и район Берегового хребта (Южная Камчатка) характеризуются в рассматриваемом плане неоднозначно. Несмотря на достаточно высокие градиенты уменьшения мощности коры к востоку и наличие “закономерных” положительных аномалий в области СФЗ, в прибрежной части заливов Восточной Камчатки наблюдаются, напротив, отрицательные скоростные аномалии. Объяснение такого несоответствия можно, очевидно, относить к влиянию тектонической раздробленности, повышенной макро- и микротрещиноватости, значительной анизотропии скорости в этой зоне, что является следствием наблюдаемой здесь максимальной сейсмичности как в верхней мантии, так и земной коре. Во всяком случае, нам представляется, что усредненные особенности распределения скоростных аномалий в слое 20–40 км согласуются (с учетом влияния сейсмического фактора) с мощностями земной коры.

Особо следует отметить четкую корреляцию в распределении скоростных неоднородностей верхней мантии с глубинными разломами, выделенными ранее по геолого-геофизическим данным [4, 18 и др.]. На сквозькоровый характер ряда таких разломов указывает приуроченность к ним молодого вулканизма и корово-верхнемантийной межблоковой сейсмичности. Необходимо подчеркнуть чрезвычайно контрастную выраженность структуры разломных зон в верхней мантии и “подчиненность” характера скоростных полей разломной тектонике. 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

простираются (рис. 1) 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 Малкинско-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 следствием развития здесь процессов апвеллинга.

К сожалению, конфигурация региональной телеметрической сети станций на Камчатке и особенности местной сейсмичности не позволяют провести уверенные сейсмотомаграфические построения для района Срединного хребта, сложенного позднекайнозойскими вулканическими комплексами (ЦКВП). В этом районе в голоцене проявился ареальный вул-

Рис. 4. Пространственное изображение скоростной модели литосферы в области пересечения профилей 3 и 4.

А – вид с востока, В – севера (см. врезку). Условные обозначения аналогичны рис. 3 и 4. АК – астеносферный клин под ВКВП. Штриховой линией выделены области надежных построений. Стрелкой показано положение “корня” астенолита. По горизонтальным осям деления показаны через 100 км.

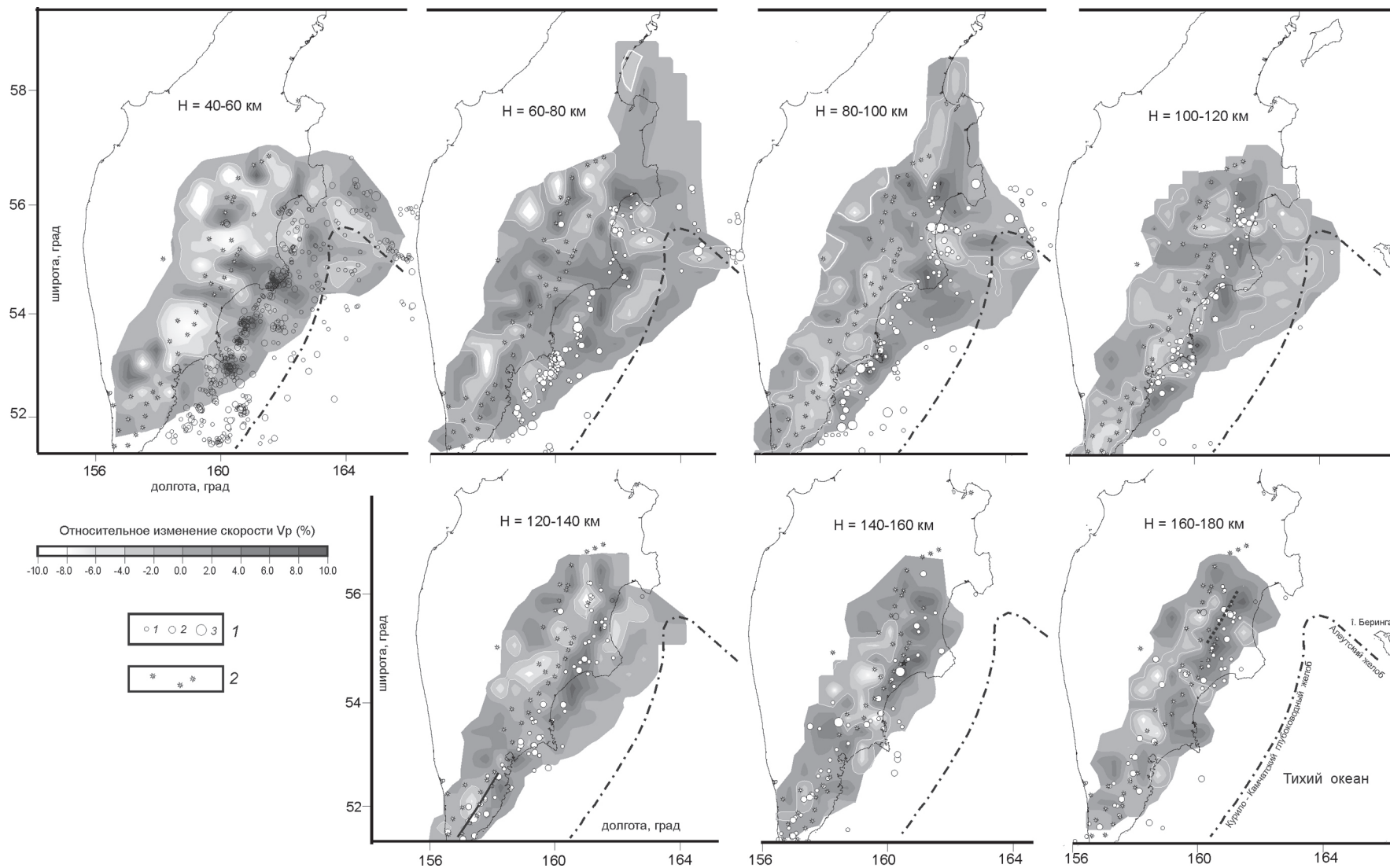


Рис. 5. Горизонтальные сечения пространственной скоростной модели литосферы (слои 40–60, 60–80, 80–100, 100–120, 120–140, 140–160, 160–180 км) под Восточной Камчаткой.

1 – эпицентры землетрясений с K_s 10–11 (1), 11–13 (2), более 13 (3); 2 – вулканы.

канизм, а в современное время область хребта испытывает интенсивное поднятие и наблюдается повышенный тепловой поток [20]. Все это, вероятно, является следствием активных процессов, сохраняющихся в верхней мантии. В связи с этим можно предполагать ее существенную геофизическую неоднородность.

Из скоростной модели следует, что под центральной, наиболее широкой частью Камчатки, в области между Малко-Петропавловской (М-П) и Паланско-Командорской (П-К) зонами поперечных дислокаций на глубинах 80–140 км имеется астеносферное включение (астенолит), геодинамические процессы в котором, вероятно, обуславливают общее воздымание территории и формирование геоантиклинального поднятия (в центральной, наиболее широкой части Камчатки). Геоантиклинальное 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 [13], 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. 1). 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 (рис. 5). Результаты геоплотностного моделирования 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 Ичинская сопка, продолжающий развитие долгоживущих (неогеновых) вулканических комплексов (центров).

В целом, согласно сейсмотомографической модели, особенности скоростной структуры верхней мантии во многом увязываются с региональ-

ной тектоникой. Это лишним раз доказывает существование тесной парагенетической связи современной структуры земной коры и геофизической неоднородности верхней мантии в интервале изученных глубин. Если предположение о существовании определенной симметрии центрального типа в мантии верно (что в большой степени следует из рис. 4), 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 прогнутость сейсмофокального слоя 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 данная асимметрия является следствием более фундаментальной (глубинной) неоднородности верхней мантии и самообразование структуры СФЗ, как границы океан–континент, является отражением этого следствия. Но в таком случае глубинные процессы под Камчаткой должны протекать по другой, альтернативной тектонике плит, геодинамической схеме. Авторы предполагают рассмотреть эти вопросы в продолжении настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- результаты геофизических исследований, в частности, выполненных методом сейсмотомографии, свидетельствуют, что верхняя мантия под Камчаткой характеризуется резкой вертикальной и латеральной скоростной, плотностной и, возможно, петрофизической неоднородностью и имеет слоисто-блоковую структуру;

- неоднородности структуры мантии имеют связь с тектоническим строением земной коры, часто контролируются системами глубинных разломов различного направления;

- молодой вулканизм, наиболее фундаментальные (региональные) особенности строения земной коры, региональная морфотектоника связаны с характером распределения в мантии астенолитных включений и в целом с ее сложной структурой;

- “корни” вулканических поясов приурочены к зоне инверсии скорости на глубине 80–120 км;

- выявленный под Центрально-Камчатской рифтогенной зоной астенолит, мощность которого со-

ставляет не менее 100 км, возможно, обусловлен более глубоким источником поступления вещества, с которым опосредованно взаимосвязан современный вулканизм северной части ВКВП:

- 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).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдейко Г.П., Вольнец О.Н., Антонов А.Ю. Вулканизм Курильской островной дуги, структурно-петрохимические аспекты проблемы и проблемы магнообразования // Вулканология и сейсмология. 1989. № 5. С. 3–16.
2. Авдейко Г.П., Попруженко С.В., Палуева А.А. Тектоническое развитие и вулканотектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С. 64–80.
3. Апрельков С.Е., Ольшанская О.Н., Иванова Г.И. Тектоника Камчатки // Тихоокеан. геология. 1993. Т. 12, № 3. С. 62–75.
4. Апрельков С.Е., Иванов Б.В., Попруженко С.В. Тектоника и геодинамическая эволюция Юго-Восточной Камчатки (Петропавловский геодинамический полигон) // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 4. С. 16–28.
5. Белоусов В.В. Основы геотектоники. М.: Недра, 1989. 382 с.
6. Вольнец О.Н., Карпенко С.Ф., Кэй Р.У. и др. Изотопный состав позднеэоценовых К-Na-щелочных базальтоидов Восточной Камчатки: отражение гетерогенности мантийного источника магм // Геохимия. 1997. № 10. С. 1005–1018.
7. 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.
8. Гонтовая Л.И., Левина В.И., Санина И.А. и др. Скоростные неоднородности литосферы под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. 2003. № 4. С. 56–64.
9. Гонтовая Л.И., Гордиенко В.В. Глубинные процессы и геофизические модели мантии Восточной Камчатки и Кроноцкого залива // Геология и полез. ископаемые мирового океана. 2006. № 2. С. 107–122.
10. Ермаков В.А. Континентализация или океаногенез? // Тектоника и геодинамика: общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС, 1998. Т. 1. С. 188–190.
11. 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. 158–188.
12. Леглер В.А. Деформация погружающейся литосферной плиты и продольные сдвиги Курило-Камчатской островной дуги // Тектоника литосферных плит. М.: Наука, 1976. С. 103–147.
13. Морфотектонические системы центрального типа Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1988. 214 с.
14. Низкоус И.В., Санина И.А., Кисслинг Э. и др. Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан-континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли. 2006. № 4. С. 18–29.
15. Очерки тектонического развития Камчатки. М.: Наука, 1987. 248 с.
16. Павленкова Н.И. Структура земной коры и верхней мантии и глобальная геотектоника // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С. 64–83.
17. Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б., Тушко Т.А. Моделирование трехмерных скоростных полей // Физика сейсмических волн и внутреннее строение Земли. М.: Наука, 1983. С. 139–150.
18. 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.
19. Пушаровский Ю.М., Меланхолина Е.Н. Тектоническое развитие Земли: Тихий океан и его обрамление. М.: Наука, 1992. 263 с.
20. Смирнов Я.Б., Сугробов В.М., Яновский Ф.Ф. Земной тепловой поток Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1991. № 2. С. 41–65.
21. Тектоносфера Тихоокеанской окраины Азии. Владивосток: ДВО РАН, 1998. 238 с.
22. Трифионов В.Г., Востриков Г.А., Кожурин А.И. и др. Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов. М.: Наука, 1988. 365 с.
23. Федоров П.И., Шапиро М.Н. Геохимия неогеновых вулканитов перешейки Камчатки в связи с геодинамикой Алеутско-Камчатского сочленения // Геотектоника. 1998. № 2. С. 44–56.
24. 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.
25. 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.
26. Флеров Г.Б., Федоров П.И., Чурикова Т.Г. Геохимия позднеэоценовых палеогеновых калиевых пород ранней стадии развития Камчатской островной дуги // Петрология. 2001. Т. 9, № 2. С. 189–208.
27. Baranov B.V., Seliverstov N.I., Murav'ev A.V. et al. The Komandorsky basin as a product of spreading behind a transform plate boundary // Tectonophysics. 1991. V. 199, N 2–4. P. 237–270.
28. Gorbатов A., Kostoglodov V., Suarez G. et al. Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // JGR. 1997. V.102. P. 17883–17898.
29. Gorbатов 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.

30. Kissling E. Geotomography with Local Earthquake Data // *Reviews of Geophysics*. 1988. V. 26. P. 659–698.
31. Levin V., Shapiro N., Park J. et al. Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*. 2002. V. 418. P. 763–766.
32. Slavina L.B., Pivovarova N.B. Three-dimensional velocity models of focal zones and refinement of hypocentral parameters. // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1992. N 75. P. 77–78.
33. 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.

Рекомендована к печати А.В. Колосковым

L. I. Gontovaya, S.V. Popruzhenko, I.V. Nizkous, S. E. Aprelkov

The upper mantle of Kamchatka: the depth model and its relation to tectonics

According to the results of comparison of geologic-geophysical data on investigations in Kamchatka with the seismic tomography model of the upper mantle, a consistent spatial structure of the lithosphere in the region was obtained. This was for the first time that in the upper mantle of the Central Kamchatka rift zone asthenolith was found. Its thickness and boundaries as well as the character of correlation with tectonics were determined. Low velocity inclusions were established beneath the contemporary volcanic belts; the former being related to the velocity structure of the focal layer and the character of seismicity within its bounds. It is shown that the structure of the upper mantle at some depths depends on fault tectonics. The system of NW faults (in the Petropavlovsk-Kamchatskiy area) is most contrasting. It is, probably, related to significant horizontal movements in the upper mantle. The recognized asthenolith inhomogeneities are presumed to have their continuation beneath the Sredinnyy Range. The revealed characteristics of the deep structure of Kamchatka and, in particular, of the focal zone are very important for understanding the geodynamic processes in the continent-Pacific Ocean junction zone.

Key words: seismic tomography, velocity model, lithosphere, upper mantle, asthenosphere, rift zone, volcanoes, faults, Kamchatka.