

# ОСОБЕННОСТИ ГИПОЦЕНТРИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ В СРАВНЕНИИ СО СТРУКТУРОЙ ЛИТОСФЕРЫ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Л.И. Гонтовая<sup>1</sup>, Г.А. Павленкова<sup>2</sup>, З.А. Назарова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

<sup>3</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

Полуостров Камчатка относится к северо-западному сектору Тихоокеанской зоны перехода от Евразийского континента к океану. В межрегиональном плане он расположен в области пересечения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. С востока к полуострову максимально приближены структуры Тихого океана, в частности Императорские горы и Императорский разлом, а с запада и юго-запада он граничит с краевыми впадинами Охотского моря. В структурном плане Камчатку соответственно нужно делить на две части. Ее южная часть продолжает структуру Курильской дуги, а северная находится в зоне сочленения с Алеутской островной дугой [Гонтовая и др., 2010].

## Особенности гипоцентрии Камчатских землетрясений

В настоящее время Камчатским филиалом геофизической службы РАН накоплен значительный объем сейсмологических данных [Каталог КФ ГС РАН], который позволил охарактеризовать особенности сейсмичности этого региона по глубине и латерали и разработать трехмерные скоростные модели литосферы до глубины ~ 700 км. Эти модели построены различными авторами с применением разных модификаций метода сейсмотомографии [Дапенг и др., 2010; Кулаков и др., 2011]. Одним из основных признаков Камчатки, как и других переходных зон Тихоокеанского типа, является наличие сейсмофоральной зоны (СФЗ) в виде наклонной области концентрации гипоцентров землетрясений. Свойства этой зоны (угол наклон, глубина проявления в литосфере, изменение плотности и выделенной энергии в пределах зоны) изменяются вдоль Камчатки. При этом наблюдаются значительные изменения этих характеристик от северной к южной части полуострова. Главное из них, это резкое уменьшение глубины фокальной зоны в северной части полуострова. По сейсмотомографическим данным на глубине в среднем ~500 км отмечается инверсия знака скоростных аномалий в южном и северном блоках Камчатки. Эта граница раздела на поверхности контролируется наиболее крупными разломными структурами полуострова алеутского направления.

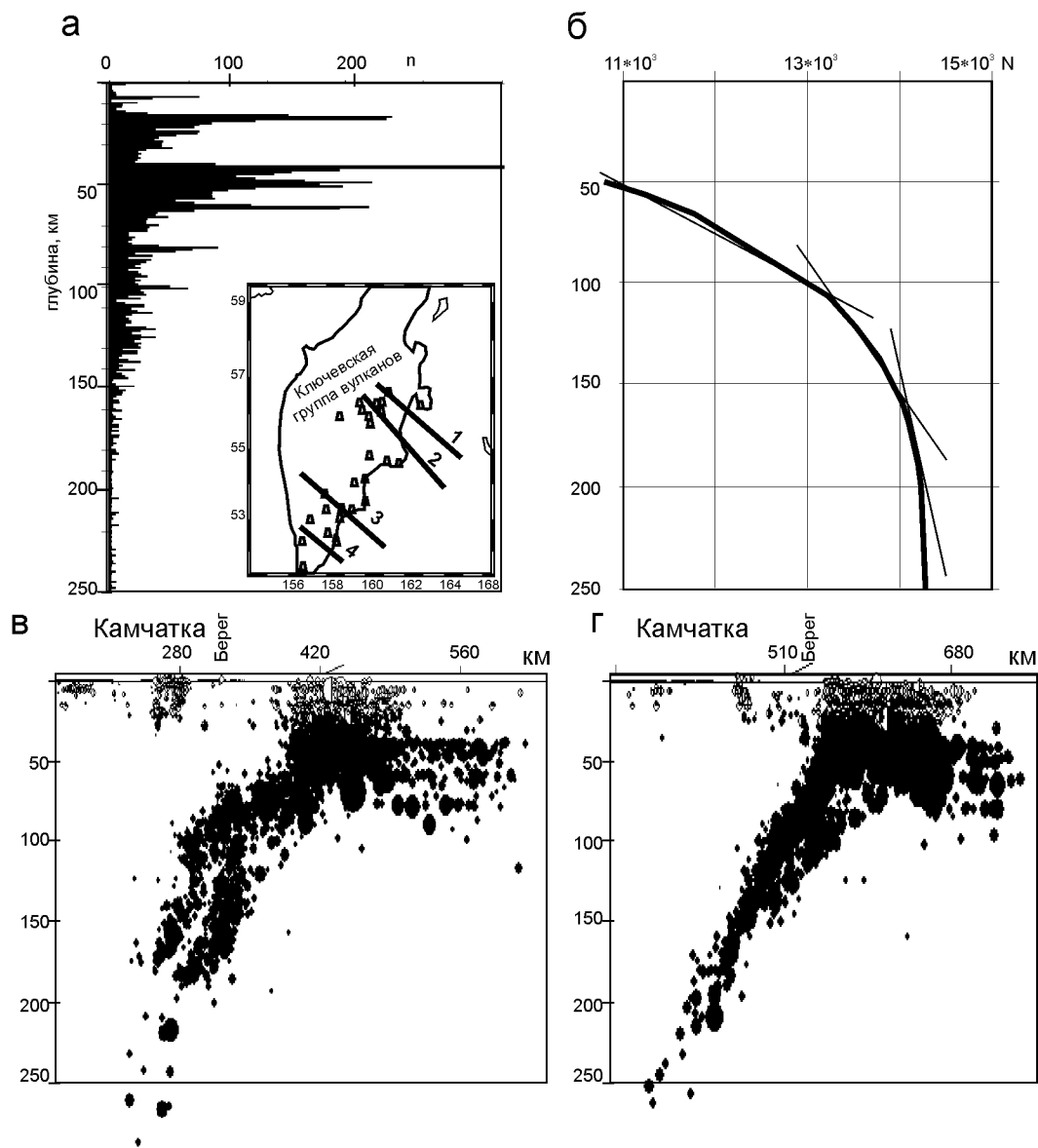
Однако в целом, для всей Камчатки четко выделяются общие свойства всей фокальной зоны. На рис. 1 представлены особенности этой зоны в разной форме: в виде графика распределения числа землетрясений  $n$  и роста общего числа землетрясений  $N$  с глубиной (рис. 1, а, б) и поперечных разрезов через Камчатку с распределением гипоцентров (рис. 1, в, г). Эти данные позволяют выделить основные закономерности гипоцентрии Камчатского региона следующим образом. Наиболее значительной общей особенностью фокальной зоны является в десятки и более раз уменьшение количества землетрясений глубже ~200-250 км. Основная часть выделенной энергии (до 90%) приходится на верхние 100 км литосферы. При этом максимумы количества гипоцентров проявляются в верхней коре до глубины 16-20 км и в зоне перехода кора-мантия на глубине 36-40 км. Наблюдается определенная закономерность и в изменении с глубиной структуры фокальной зоны. На глубине около 100 км происходит излом этой зоны и ее разрушение за счет увеличенного разброса гипоцентров (рис. 1в). Этот разброс отчетливо сокращается с глубиной. По характеру нарастания числа землетрясений с глубиной (рис.1б) тоже выделяются эти основные зоны: наибольшее их количество происходит в верхнем слое до глубины 100-110 км, затем их рост резко уменьшается в интервале 100-160 км и они практически отсутствуют глубже 200 км.

Еще одной интересной особенностью фокальной зоны Камчатки является наличие четко выраженного сгущения землетрясений в локальной зоне на глубине около 100 км (рис. 2).

В целом, для Камчатки отмечается три основные зоны резкого изменения гипоцентрии землетрясений: (1) отсутствие землетрясений («немая» зона) в нижней коре, (2) сгущение очагов землетрясений и изменение формы фокальной зоны на глубине около 100 км и (3) практическое отсутствие землетрясений ниже 200-250 км.

Некоторые эти закономерности выявлялись и ранее [Тараканов, Левый, 1967], но главное, они не являются случайными, характерными только для Камчатского региона. Так, в земной коре разных регионов мира, в сейсмоактивных зонах и на кристаллических щитах, землетрясения наблюдаются

обычно лишь до глубины 10-20 км [Parshad et al, 2015] Подобное Камчатке распределение землетрясений с глубиной наблюдается и в мантийной литосфере в разных частях планеты, и не только в зонах перехода континент-океан, но и внутри континентов. Для фокальных зон Южной Америки наблюдается удивительное сходство их строения с описанными выше зонами Камчатки: сгущение землетрясений и изменение формы фокальной зоны на глубине около 100 км. [Романюк, Ткачев, 2006; Igarashi et al., 2001; Asch et al, 2007]. Все это свидетельствует о глобальном характере выявленных закономерностей и о вероятной их связи с общими особенностями структуры литосферы.



**Рис. 1.** Структурные особенности сейсмофокальной зоны Камчатки: (а) распределение числа землетрясений  $n$  по глубине, (б) график роста общего числа землетрясений  $N$  с глубиной, (в, г) распределение гипоцентров землетрясений с глубиной для профилей 2 и 3 на рис. 1, а

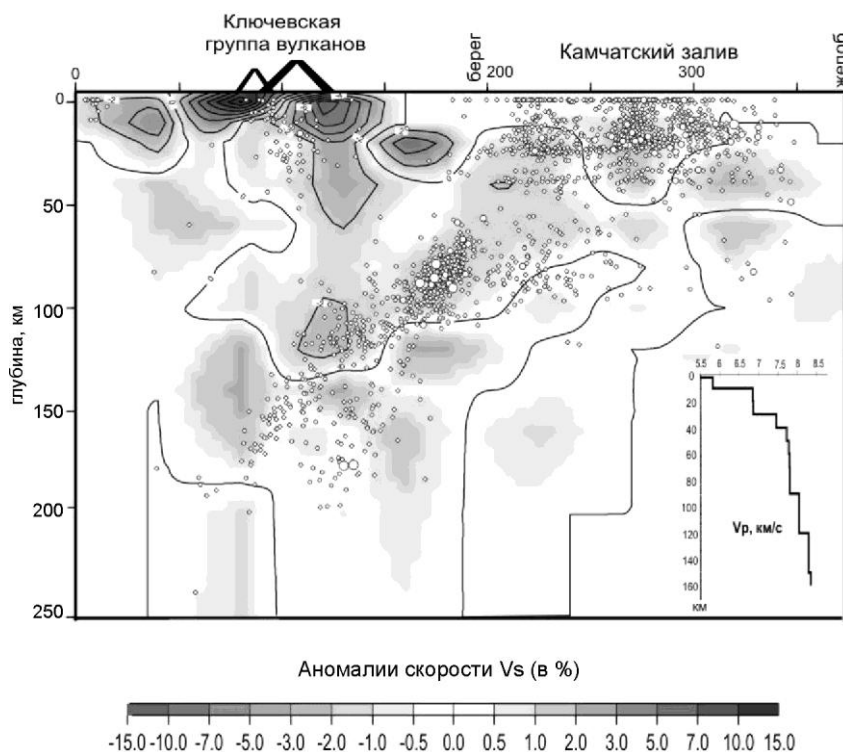
В гипоцентрии Камчатских землетрясений намечается некоторая связь со структурой земной коры и верхней мантии региона. Так, в земной коре отмеченные по распределению землетрясений протяженные границы на глубине ~14-16 км и в зоне перехода кора-мантия в интервале глубин ~30-40 км совпадают с сейсмическими границами, выявленными работами КМПВ-ГСЗ, МОВЗ-МТЗ и методом томографии в районе Ключевской группы вулканов. В верхней мантии на глубине около 100 км, где наблюдается изменение структуры фокальной зоны, на томографических изображениях выделяется слой отрицательной аномалии скорости  $V_p$  и повышенных значений параметра  $V_p/V_s$ . С этим же интервалом, где наблюдается наиболее высокий уровень сейсмической активности, связаны магматические очаги питания современных вулканов Восточно-Камчатского вулканического пояса. Но в целом, для более полного сопоставления особенностей фокальной зоны со структурой

литосферы Камчатки имеющих экспериментальных данных недостаточно. Это связано с малым объемом глубинных сейсмических исследований в этом сложном по строению регионе. Но такие сопоставления возможны со структурой континентальной литосферы.

### Сопоставление полученных данных со структурой литосферы Северной Евразии

Наиболее обоснованное сопоставление данных по гипоцентрии землетрясений со строением земной коры и верхней мантии можно провести на основе детального ГСЗ и сверхдлинных сейсмических профилей, отработанных в России с мирными ядерными взрывами [Павленковы, 2014].

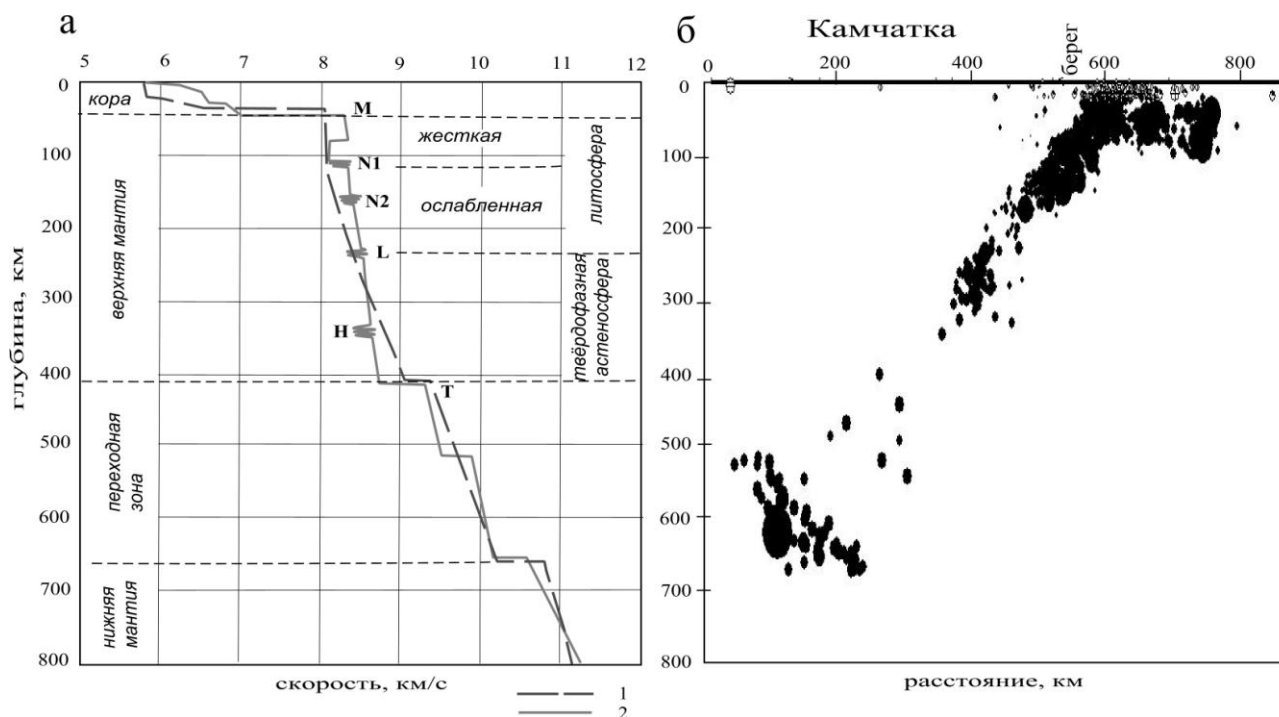
По этим данным слои с пониженными скоростями (волноводы) были обнаружены детальными работами ГСЗ. Их естественным объяснением является предположение о преобладающем влиянии на сейсмические скорости на глубине более 10-20 км повышенной температуры и соответствующего изменения пластичности пород. Такое толкование волноводов хорошо объясняет уменьшение в них числа землетрясений. Существует и другая трактовка коровых волноводов, которые были обнаружены в земной коре в пределах холодных кристаллических щитов с низким тепловым потоком, например, на Украинском и Балтийском щитах. Теоретические расчеты, данные детального ОГТ и Кольской сверхглубокой скважины показали уменьшение Р- и S-скоростей на отмеченной глубине, которое объясняется увеличением трещиноватости пород и их флюидонасыщенности [Николаевский, Шаров, 1985; Павленкова, 1989]. По лабораторным исследованиям физических свойств пород, насыщенных флюидами было показано, что небольшое содержание флюидов существенно снижает сейсмические скорости [Лебедев и др., 1989; Kern H., 1982]. Высокое содержание флюидов в слоях пониженной скорости разных регионов мира подтверждены и электромагнитными исследованиями [Ваньян, Павленкова, 2002; Hyndman, Shearer, 1989]. Такое сочетание позволяет сделать заключение, что коровые волноводы и в тектонически активных регионах и в пределах платформ являются реологически ослабленными зонами и поэтому «немыми» с точки зрения сейсмичности.



**Рис. 2.** Томографический разрез литосферы Камчатки по поперечным Vs волнам, скоростная модель по продольным Vp волнам и распределение гипоцентров землетрясений для профиля 1 на рис. 1, а

Детальные сейсмические исследования верхней мантией, проведенные на сверхдлинных профилях, также позволяют отметить четкую связь распределения землетрясений со структурными особенностями мантийной литосферы. Исчезновение землетрясений на глубине 200-250 км соответствует подошве литосферы, выделяемой под сибирскими платформами по данным теплового потока. Правда, в пределах всей Северной Евразии на этой глубине не выделено слоев с пониженной

скоростью, связанных с астеносферным слоем, но здесь наблюдается уменьшение добротности мантийного материала [Егоркин и др., 1981] и смена общего структурного плана верхней мантии, что подтверждает данные теплового потока о глубине астеносферного слоя (рис. 3, а)



**Рис. 3.** (а) Обобщенная скоростная модель верхней мантии Северной Евразии (1) в сопоставлении с референтной моделью IASP91 (2) [Павленковы, 2014]. Сейсмические границы N1, N2, L и H показаны как тонкослоистые пачки. (б) Распределение гипоцентров землетрясений по профилю 4 (рис. 1, а)

Четкая корреляция особенностей фокальной зоны Камчатки со структурой континентальной литосферы наблюдается и для интервала глубин 100-150 км. По сверхдлинным профилям на этой глубине отмечается смена структурных особенностей литосферы, позволяющих разделить ее на два слоя разной пластичности: верхний жесткий слой, характеризующийся сложной скоростной неоднородностью, и нижний более однородный, и следовательно, более пластичный слой [Павленкова, 2011]. Разделены эти слои резкой сейсмической границей N1 и зоной инверсии скоростей. Именно на этой границе меняется форма фокальной зоны Камчатки и наблюдается сгущение очагов землетрясений (рис. 1, 2 и 3).

Наличие в холодной литосфере на глубине около 100 км слоя с пониженной скоростью и четко выраженной сейсмической границы было достаточно неожиданным явлением, так как мантийные породы разного состава практически не различаются по сейсмическим скоростям, и никакие существенные фазовые переходы на этой глубине не предполагаются. Но сейсмические исследования в разных регионах мира показали, что эти границы не являются особенностью только Северной Евразии. По данным испытаний ядерных взрывов в Северной Америке граница N1 была прослежена практически по всему континенту: она была названа 8-градусной границей, так как волны от нее выходят в первые вступления чаще всего на расстоянии 8 градусов от источника. Была установлена и связь этой границы со слоем пониженной скорости [Thybo, Perchus, 1997].

Подошва литосферы на сверхдлинных профилях тоже отмечается четкой отражающей границей L (рис. 3, а). Ранее по данным сейсмологии граница L, граница Lehmann, выделялась и в сейсмоактивных зонах. В настоящее время отмечаются отдельные случаи регистрации волн от мантийных границ по обменным волнам [Винник и др., 2006].

Выделенные мантийные границы формируют интенсивные многофазовые отраженные волны, хотя существенного общего увеличения скорости на этих глубинах не наблюдается. Математическое моделирование показало, что такие волны могут сформироваться в тонкослоистых пачках с чередованием прослоев повышенной и пониженной скорости [Павленковы, 2014]. Прослои с малыми скоростями могут быть созданы повышенной концентрацией в них глубинных флюидов, а высокоскоростные прослои менее проницаемыми анизотропными слоями. Такую же природу имеет, по всей видимости, и слой с пониженной скоростью на глубине около 100 км.

Формирование тонко расслоенных пачек с большим перепадом скоростей, так же как и просто слоев с пониженными скоростями, можно объяснить резким изменением проницаемости вещества на некоторой глубине, что приводит к концентрации глубинных флюидов под менее проницаемыми покрывками и к формированию соответствующих прослоев с пониженными скоростями. Степень проницаемости вещества для флюидов на большой глубине, где пористость пород уже незначительна, определяется добротностью этого вещества: она уменьшается в жестких кристаллических породах и увеличивается в более пластичных.

Электромагнитные исследования подтверждают предположения о связи отмеченных сейсмических границ с областями повышенной флюидонасыщенности: во многих регионах мира в верхней мантии на глубине около 100 км выделены слои повышенной электропроводности [Ковтун и др., 1994; Jones et al., 2009].

Флюидная природа расслоенных сейсмических границ подтверждается и данными по ксенолитам. Статистика этих данных по кимберлитовым провинциям Сибирского кратона показала, что в кимберлитах, полученные с глубины описанных сейсмических границ часто отмечаются следы пленочного плавления [Соловьева и др., 1994]. При повышенной концентрации флюидов на больших глубинах могут образовываться даже области частичного плавления, так как по лабораторным исследованиям, небольшое содержание флюидов в верхней мантии существенно снижает температуру солидуса. Поскольку описанные границы представлены расслоенными пачками, это может означать возможное течение материала по этим слоям, и главное, горизонтальные подвижки по ним литосферных блоков

Все это означает, что отмеченные сейсмические границы образуются на некоторых критических уровнях давления и температуры, на которых происходят существенные физико-химические преобразования вещества. Землетрясения могут быть связаны с подобными преобразованиями и с горизонтальными подвижками вдоль этих ослабленных слоев.

Связь землетрясений с глобальными сейсмическими границами наблюдается и в низах верхней мантии и в зоне перехода к нижней мантии. На основе результатов глобальной томографии и анализа мантийной сейсмичности над зоной перехода к нижней мантии на глубине 340-450 км выделена аномальная зона «сейсмического молчания» и повышенной скорости  $V_p$ . Отметим, что подобный раздел был также обнаружен с использованием других методик в области Охотского и Японского морей [Тараканов и др., 2015]. Глубже, уже внутри переходной зоны между сейсмическими границами на глубине 520 и 680 км были зарегистрированы крупные землетрясения (рис. 3, б)

## **Заключение**

Таким образом, обобщение материалов по гипоцентрии Камчатских землетрясений выявило следующие закономерности в структуре ее сейсмофокальной зоны: (1) наблюдается резкое уменьшение количества гипоцентров глубже ~200-250 км. (2) основная часть выделенной при землетрясениях энергии приходится на верхних 100 км литосферы, (3) отмечается несколько интервалов глубин концентрации землетрясений: в земной коре на глубине 16-20 км, в зоне перехода кора-мантия на глубине 36-40 км и в литосферы на глубине 100 км, (4) на глубине около 100 км наблюдается также изменение угла наклона фокальной зоны и разрушение ее формы.

Выявленные закономерности не являются случайными, они наблюдаются и в других регионах, и не только в фокальных зонах континент-океан, но и внутри континентов. При этом устанавливается четкая корреляция этих закономерностей с реологической моделью литосферы Северной Евразии. Уменьшение числа землетрясений в средней коре соответствует часто наблюдаемой на этих глубинах зоне пониженных скоростей или смене структурного плана коры. Изменение угла наклона фокальной зоны на глубине около 100 км соответствует подошве более жесткой части литосферы, а резкое снижение числа землетрясений на глубине 200-250 км – подошве литосферы. Отдельные области сгущения гипоцентров приурочены к сейсмическим границам, представленным тонко расслоенными пачками повышенных и пониженных скоростей, то есть к реологически ослабленным зонам.

Четкая корреляция особенностей Камчатской фокальной зоны со структурой литосферы Северной Евразии свидетельствует о том, что для этой зоны перехода континент-океан характерно такое же строение литосферы, как и на континенте, лишь с несколько меньшей глубиной до подошвы литосферы.

Описанные глобальные закономерности в структуре сейсмофокальных зон позволяют сделать некоторые предположения об их природе. Общепринятой является модель пододвигающегося под континент клина океанической литосферы («слеба»). Но глубина слеба и его форма трудно

объяснимы в условиях описанной двухслойной литосферы. Более правдоподобным является предположение, что сейсмофокальные зоны являются просто зонами глубинных нарушений, вдоль которых происходят подвижки литосферных блоков.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО -15-1-2-008 и гранта РФФИ 16-05-00059.

## Литература

1. Ваньян Л.Л., Павленкова Н.И. Слой пониженной скорости и повышенной электропроводности в основании верхней части земной коры Балтийского щита // Физика Земли. 2002. № 1. С. 1-9.
2. Винник Л.П., Алешин И.М., Кабан Н.К., Киселев С.Г., Косарев Г.Л., Орешин С.И., Райгбер К. Кора и мантия Тянь-Шаня по данным томографии приемных функций // Физика Земли. 2006. № 8. С. 14-26.
3. Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В. Структура верхней мантии зоны перехода океан-континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13-29.
4. Дапэнг Жао, Франко Пирайно, Люси Лиу. Структура и геодинамика верхней мантии под Восточной Россией и прилегающими регионами // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 1888-1203.
5. Егоркин А.В., Кун В.В., Чернышев Н.М. Поглощение продольных и поперечных волн в коре и верхней мантии Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1981. № 2. С. 37-50.
6. Каталог КФ ГС РАН (Камчатский филиал геофизической службы РАН). <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/>.
7. Ковтун А.А., Вагин С.А., Вардьянц И.Л., Коквина Е.Л., Успенский Н.И. Магнитотеллурические исследования строения коры и мантии восточной части Балтийского щита // Изв. РАН. Физика Земли. 1994. № 3. С. 32-36.
8. Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 830-851
9. Лебедев Е.Б., Кадик А.А., Зебарин А.М., Дорман А.М. Экспериментальное изучение влияния воды на скорости упругих волн глубинных пород // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309, № 5. С. 1090-1093.
10. Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Физика Земли. 1985. № 1. С. 16-28.
11. Павленкова Н.И. Кольская скважина и ее значение для глубинных сейсмических зондирований // Советская геология. № 6. 1989. С. 17-23.
12. Павленкова Н.И. Реологические свойства верхней мантии Северной Евразии и природа региональных границ по данным сверхдлинных сейсмических профилей // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. С. 1287-1301.
13. Павленкова Н.И., Павленкова Г.А. Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами // Серия аналитических обзоров «Очерки по региональной геологии России», выпуск 10. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС. 2014. 192 с.
14. Романюк Т.В., Ткачев А.В. Крупные и суперкрупные кайнозойские месторождения минерального сырья на западных окраинах Северной и Южной Америки: геодинамическая обусловленность и связь со структурой литосферы // Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. Том 1. Глобальные закономерности размещения (Гл. ред. Д.В.Рунквист). ИГЕМ РАН. 2006. С. 275-310.
15. Соловьева Л.В., Владимиров Б.М., Днепровская Л.В., Масловская М.Н., Брант С.Б. Кимберлиты и кимберлитовые породы; вещество верхней мантии под древними платформами. Новосибирск. ВО «Наука». Сибирская издательская фирма. 1994. 256 с.
16. Тараканов Р.З., Веселов О.И., Андреева М.Ю. О возможной границе фазовых переходов на глубине 350км зоны переходов континента к океану // ДАН. 2015. Т. 460, №5. С. 585-588.
17. Тараканов Р.З., Левый Н.В. Полиастеносферная модель верхней мантии Земли по сейсмологическим данным // Докл. АН СССР. 1967. Т. 176, № 3. С. 571-574.
18. Asch G., Shurr B., Bohm M., Yuan X., Heberland Ch., Heit B., Kind R., Woelbern I., Bataille K., Comte D., Pardo M., Viramonte J., Richtbrock A., Giese P. Seismological studies in Central and Southern Andes // Andes. Active Subduction Orogeny. Series: Vrontiers in Earth Sciences. Oncken O. Springer. 2007. P. 443-457.
19. Hyndman, R.D., Shearer, P.M. Water in the lower continental crust: modelling magnetotelluric and seismic reflection results // Geophys. J. Int. 1989. V. 98, № 2. P. 343-365.
20. Igarashi, T., T. Matsuzawa, N. Umino, and A. Hasegawa. Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquakes associated with the subducting Pacific plate beneath the northeastern Japan arc: A tripled-planed deep seismic zone // J. Geophys. Res. 2001. № 106. P. 2177-2191.
21. Jiang, D. Zhao, F. Zhang, F. Zhang. Seismic tomography of the Pacific Slab edge under Kamchatka // Tectonophysics. 2009. № 465. P. 190-203.
22. Jones, A.G., Evans, R.L., Eaton, D.W. Velocity-conductivity relationships for mantle mineral assemblages in Archean cratonic lithosphere based on a review of laboratory data and Hashin-Shtrikman extremal bounds // Lithos. 2009. № 109. P. 131-143.
23. Kern H. Elastic-wave velocity in the crustal and mantle rocks at the high-low quartz transition and of dehydration reactions // Phys. Earth. Planet. Inter. 1982. № 29. P. 12-23.
24. Thybo H. and E. Perchuc. The Seismic 8<sup>0</sup> Discontinuity and Partial Melting in Continental Mantle // Science. 1997. № 275. P. 1626-1629.
25. Parshad R.S., Srivastva P., Rani R., Ganju A. Aseismic layer detected in the mid-crust of Nubra-Siachen Region, India, using local seismic data // Int. J. of Geoscience. 2015. № 6. P. 993-1006.