

Н. И. ПАВЛЕНКОВА (ИФЗ РАН), С. Н. КАШУБИН (ВСЕГЕИ),  
Л. И. ГОНТОВАЯ (ИВиС ДВО РАН), Г. А. ПАВЛЕНКОВА (ИФЗ РАН)

## Глубинное строение и геодинамика Охотоморского региона

Проведенные в последние годы в Охотском море глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ) и обобщение других геофизических работ позволяют решить многие геодинамические проблемы, связанные со структурой земной коры и верхней мантии этой зоны перехода от континента к океану. Выполненные при очень детальной системе наблюдений два профиля ГСЗ окончательно решили проблему типа земной коры Охотского моря – это континентальная кора с мощным гранито-гнейсовым слоем, и лишь в узкой Прикурильской зоне сформировалась впадина с тонкой корой субконтинентального типа. Скоростные модели верхней мантии по этим профилям также соответствуют моделям прилегающего континента. Их сопоставление со структурой Курило-Камчатской фокальной зоны глубоких землетрясений и моделью верхней мантии Северной Евразии показало, что весь Охотоморско-Камчатский регион сохраняет структурные особенности литосферы Азиатского континента с небольшими локальными изменениями лишь в верхних 100 км. Новый важный структурный элемент Охотского моря – выявленное работами ГСЗ мантийное нарушение, вытянутое вдоль Сахалина, которое по структурным особенностям и сейсмичности этого региона прослеживается далеко в Тихом океане и на Азиатском континенте.

Ключевые слова: *глубинные сейсмические исследования, земная кора, верхняя мантия, Охотское море, гипоцентрия землетрясений, мантийные нарушения, геодинамика.*

N. I. PAVLENKOVA (IPE RAS), S. N. KASHUBIN (VSEGEI),  
L. I. GONTOVAYA (IVS FEB RAS), G. A. PAVLENKOVA (IPE RAS)

## Deep structure and geodynamics of the Sea of Okhotsk region

The new deep seismic sounding (DSS) in the Okhotsk Sea and a generalization of other geophysical data in this region allow to solve many geodynamic problems on the structure of the earth's crust and the upper mantle of this continent – ocean transition zone. Two DSS profiles, made with a very detailed system of observation, finally decided the problem of the Okhotsk Sea crustal type: it is a typical continental crust with a thick granite-gneiss layer. The thin crust of the sub-oceanic type is distinguished only in the narrow basin near the Kuril Islands. The upper mantle velocity models along the DSS profiles are also similar to the continental models. A comparison of the Kuril-Kamchatka deep earthquake focal zone with the upper mantle velocity model of the North Eurasia shows the Okhotsk-Kamchatka region has the lithosphere structure of the Asian continent with some local changes only in the upper 100 km depth. The new important structural element of the Okhotsk Sea is the deep fracture zone along the Sakhalin Island. This zone is traced far to the Pacific Ocean and in the Asian continent.

Keywords: *deep seismic studies, Earth's crust, upper mantle, Sea of Okhotsk, earthquake focal zone, deep mantle faults, geodynamics.*

**Введение.** В настоящее время глубинное строение Охотоморского региона хорошо изучено сейсмическими и сейсмологическими методами, что позволяет достаточно определенно судить о природе земной коры впадины Охотского моря и о глубинных корнях главных ее элементов.

Первые работы ГСЗ были проведены в этом регионе еще в 50–60 гг. прошлого столетия [20]. Это были малодетальные наблюдения, но уже тогда они позволили определить, что кора Охотского моря в основном континентального типа: ее мощность 25–30 км и сложена она породами со скоростями продольных волн  $V_p = 6,0–6,7$  км/с, т. е. породами гранито-гнейсового комплекса. Лишь в небольшой по площади Южно-Охотской (Курильской) впадине была выявлена кора субокеанического типа с мощностью консолидированной коры 5–7 км и с типичными для пород основного состава скоростями  $V_p = 6,7–6,9$  км/с.

Проведенная позже переобработка этих материалов на основе современных методов интерпретации

данных ГСЗ и дополнительные экспериментальные работы подтвердили эти построения [7, 25]. Тем не менее предполагалось, что первые малодетальные исследования не могли обеспечить надежного определения типа коры Охотского моря, поэтому она по аналогии с другими впадинами этого региона часто рассматривалась как кора океанического происхождения [3, 4].

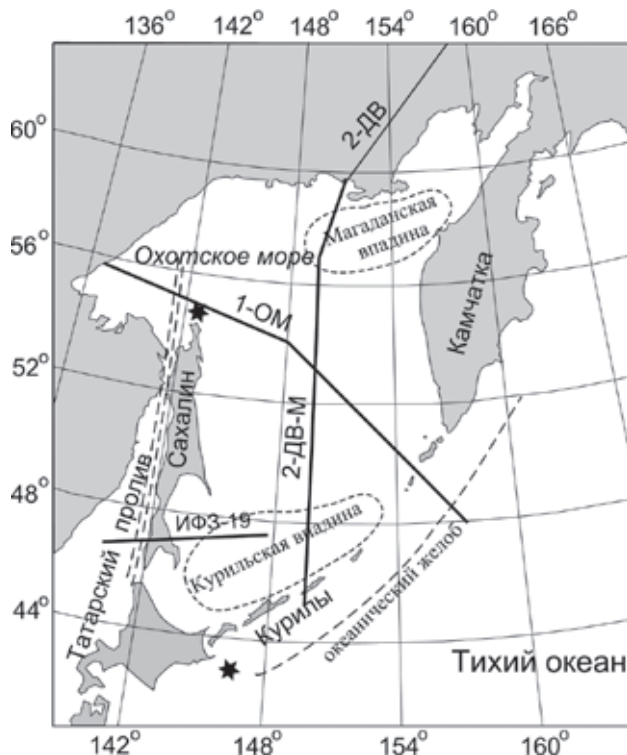
В 2006–2009 гг. экспедициями ФГУ НПП «Севморгео» (Санкт-Петербург) в Охотском море были проведены детальные глубинные сейсмические исследования по двум профилям, пересекающим все море (рис. 1) [8, 9, 18, 29]. Это позволяет окончательно решить вопрос о типе земной коры Охотоморской впадины и истории ее формирования. Новые данные получены по этим профилям и по структуре верхней части мантии. Ниже приводятся результаты этих исследований, которые сопоставляются с сейсмологическими данными этого региона [5, 13] и данными сверхдлинных сейсмических профилей в азиатской части [17].

**Экспериментальный материал по новым профилям ГСЗ.** Первичная обработка материалов по профилям 1-ОМ и 2-ДВ-М проводилась в Севморгео. Основное внимание уделялось созданию программ для машинной обработки большого объема записей и построения на их основе монтажей сейсмограмм с четким выделением опорных волн [18]. Последующая обработка этих данных с построением скоростных разрезов проводилась также во ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) и ИФЗ РАН (Москва). Во ВСЕГЕИ для профиля 2-ДВ-М была выполнена совместная обработка всего поля продольных, поперечных и обменных волн и определено соотношение их скоростей [8, 9]. Это позволило более обоснованно определить состав и природу отдельных слоев земной коры впадины. В ИФЗ особое внимание уделялось построению детальных разрезов земной коры и верхов мантии с выделением локальных структур и глубинных нарушений. Ниже приводятся результаты этой обработки.

Экспериментальный материал Севморгео по глубинному сейсмическому зондированию в Охотском море представляет особый интерес, так как были получены наиболее полные записи волновых полей, сформировавшихся в земной коре и верхах мантии до глубины 70 км. На двух профилях 1-ОМ и 2-ДВ-М общей протяженностью более 4000 км (рис. 1) были отработаны системы наблюдений большой детальности: донные станции выставлялись с интервалом 10–20 км; для возбуждения сейсмических колебаний использовались мощные пневматические пушки с объёмом камеры 80–120 л.; воздействия производилось с интервалом 2 мин, что соответствовало расстоянию между источниками в 250 м. Запись осуществлялась до удалений 200–250 км автономными донными станциями с 3-х компонентным сейсмоприемником и цифровой регистрацией.

В полученных записях на обоих профилях выделяются все опорные продольные (P) волны, которые характеризуют главные особенности структуры земной коры (рис. 2). В первых вступлениях на удалении от источника до 70–80 км прослеживаются преломленные волны в земной коре ( $P_{sed}$  и  $P_g$ ), затем преломленные волны в верхах мантии ( $P_n$ ). Во вторых вступлениях доминирующими являются отраженные волны от границы М ( $P_mP$ ). Эти волны дают возможность определить скоростной разрез земной коры, глубину до основных ее границ и подошвы коры, границы М. Кроме этого, на профиле 1-ОМ четко прослежены волны  $M1$  и  $P_f$  от границ в самых верхах мантии. Волны от границы  $M1$  регистрируются в первых вступлениях после волны  $P_n$  до удалений от источника 200 км (рис. 2). Они имеют близкую к волне  $P_n$  кажущуюся скорость около 8,0 км/с, но гораздо большую интенсивность. Волны  $P_f$  регистрируются в северной части профиля на удалении от источника более 200 км. Это интенсивные волны с аномально большой кажущейся скоростью, и форма их годографов соответствует отраженным волнам от наклонной границы.

Основной метод анализа наблюдаемой волновой картины и построения сейсмических разрезов по обоим профилям — метод математического моделирования. Он заключается в многократном решении прямой задачи для некоторых стартовых скоростных моделей, в сопоставлении расчетных волновых полей с наблюдаемыми и в выборе на этой основе наиболее обоснованной модели. Это длительный процесс со многими обратными связями, в резуль-



**Рис. 1. Схема расположения профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) в Охотском регионе. Профили 1-ОМ и 2-ДВ-М отработаны ФГУ НПП «Севморгео» [18], профиль 2-ДВ — ФГУП «СНИИГГиМС» по программе опорных сейсмических профилей Роснедра [21]. Профиль ИФЗ-19 выполнен ИФЗ РАН в середине прошлого столетия [20]**

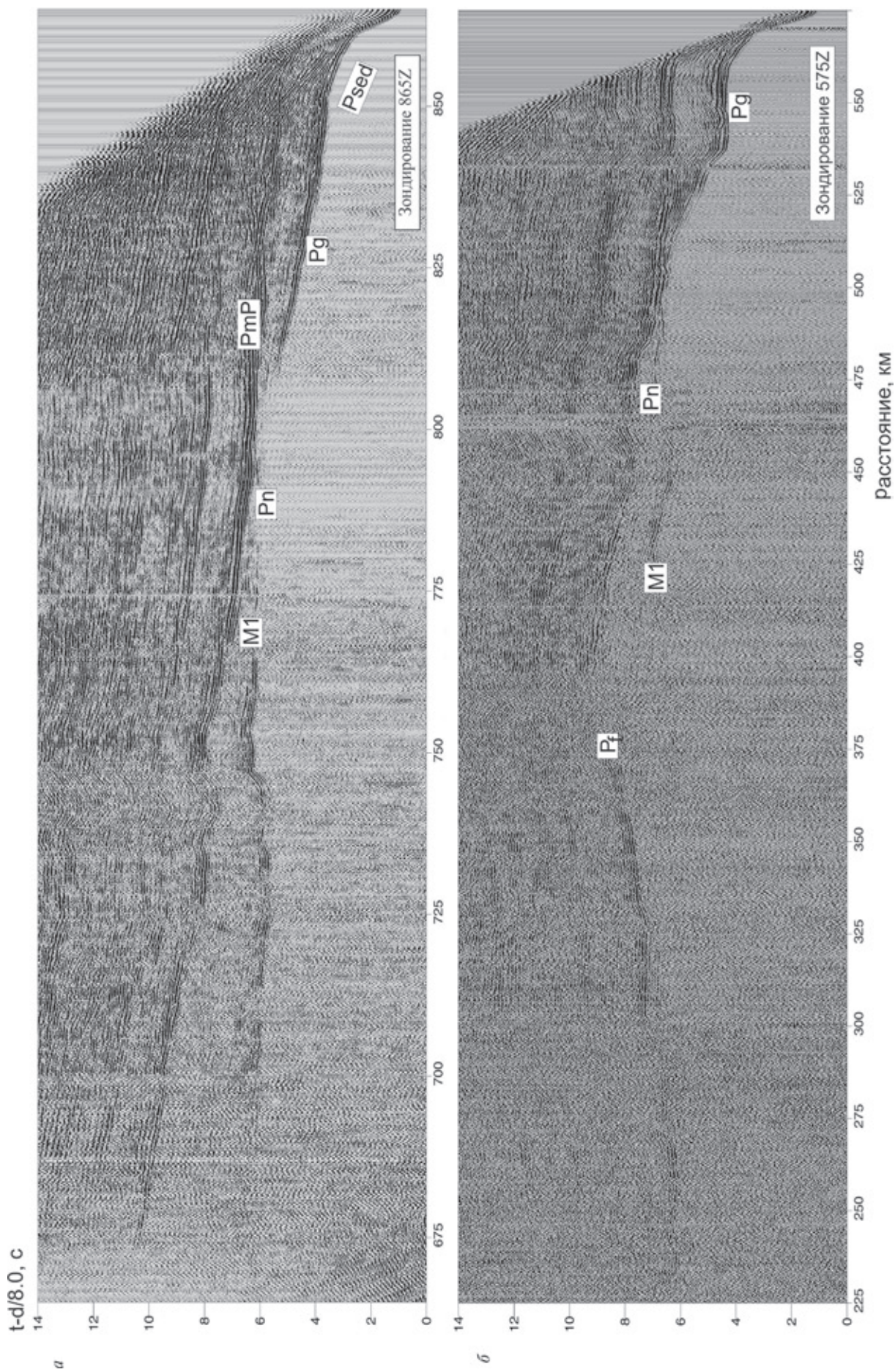
На схеме звездочками отмечены эпицентры крупных землетрясений: Нефтегорского (май 1995 г.) и Шикотанского (октябрь 1994 г.), а двойной пунктирной линией — предполагаемый глубинный разлом

тате которого не только строится скоростной разрез, но и определяется природа регистрируемых волн и степень возможной неоднозначности выполненных построений.

Эффективность такой методики можно показать на примере интерпретации отмеченных выше не совсем обычных мантийных волн  $M1$  и  $P_f$  (рис. 2). На рис. 3 приведены результаты лучевого моделирования при построении по этим волнам сейсмических границ. По волне  $P_f$  сконструирована наклонная отражающая граница, простирающаяся до глубины 70 км, достоверность которой доказана в результате моделирования для серии нагоняющих и встречных годографов этой волны. На рис. 2 (внизу) приведен монтаж сейсмограмм из источника на ПК 575, являющегося нагоняющим относительно источника 565, для которого на рис. 3 приведены результаты лучевого моделирования. Годографы волн  $P_f$  из обоих источников подобны, как и соответствующая им отражающая площадка.

Волны  $P_f$  оказались весьма информативными и для надежного определения скорости в верхней мантии до глубины, практически недоступной для малопроникающих преломленных волн от границы М. Как видно из результатов лучевого моделирования (рис. 3), волны  $P_f$  проникают на глубину 70 км и охватывают большие расстояния от источника. Зарегистрированы они на нескольких станциях, удаленных друг от друга от 10 до 100 км.





**Рис. 2. Монтажи сейсмограмм, полученные на профиле 1-ОМ для донных станций, расположенных на ПК 865 (а) и 575 (б)**  
 Основные волны: P<sub>sed</sub> – преломленные в осадках, P<sub>g</sub> – преломленные в консолидированной коре, P<sub>mP</sub> – отраженные от границы М, М1 и P<sub>f</sub> – волны от границ в самых верхих мантии



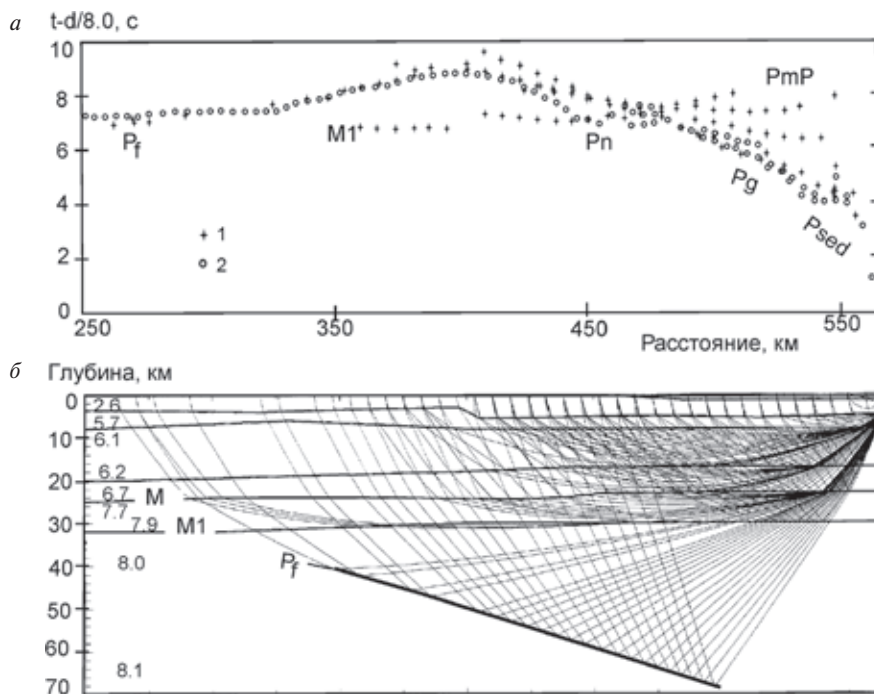


Рис. 3. Расчетные лучи и годографы (а) для скоростной модели земной коры и верхов мантии (б) по профилю 1-ОМ

Лучи: 1 – расчетные и 2 – наблюдаемые. Усл. обозн. см. на рис. 2

Построенные по ним отражающие площадки идеально совпадают между собой по глубине и наклону, что свидетельствует о стабильности скоростного разреза до глубины максимального проникания лучей с небольшим нарастанием скорости от 8,0 до 8,1 км/с.

Полученные по волне  $P_f$  данные о небольшом вертикальном градиенте скорости в верхах мантии хорошо согласуются с прямолинейной формой годографов первых вступлений до больших удалений от источника (рис. 2, а), но они не могут объяснить большую их интенсивность (волну  $M1$ ). Эта волна практически непрерывно прослежена в центральной части профиля между ПК 700 и 1200. Как уже отмечалось, она имеет сходные кинематические характеристики с преломленной волной  $P_n$  от границы  $M$ , стабильные кажущиеся скорости порядка 8,0 км/с и практически прямолинейный годограф. Математическое моделирование показало, что для объяснения большой интенсивности волн, имеющих сходные кинематические характеристики с волной  $P_n$ , необходимо предположить наличие под границей  $M$  еще одной отражающей границы –  $M1$ . Из-за резкого излома сейсмических лучей на подошве коры закритические отражения от этой границы регистрируются на больших удалениях от источника и имеют практически прямолинейные годографы с характерной для границы  $M$  кажущейся скоростью в пределах 7,9–8,1 км/с (рис. 3). Большая интенсивность закритических отражений по сравнению с преломленными волнами доказана многочисленными расчетами динамики этих волн для самых разных сейсмических моделей. Это было показано и в результате моделирования динамики волн  $M1$  на примере профиля 2-ДВ-М, где эти волны зарегистрированы на отдельных участках профиля [8, 9]. На профиле 1-ОМ граница  $M1$  прослеживается непрерывно на большом участке (рис. 4),

что объясняется небольшим подъемом границы в северо-западном направлении и соответствующим увеличением интенсивности отраженных от нее волн при наблюдениях в этом направлении от источника и подтверждается экспериментальными записями.

Обе не совсем обычные границы ( $M_f$  и  $M1$ ), построенные по профилю 1-ОМ, представляют большой интерес и с точки зрения тектоники Охотского моря. Наклонная отражающая площадка  $M_f$  соответствует, скорее всего, глубинному нарушению литосферы, ограничивающему Охотоморскую впадину с запада. В районе этого нарушения резко уменьшается мощность земной коры. Однако так и не удалось определить по профилю 1-ОМ проходит ли оно внутри коры.

Наличие глубинного нарушения в районе Сахалина предполагалось и по первым профилям ГСЗ в этом регионе. На профиле ИФЗ-19, пересекающем Сахалин и Курильскую впадину (рис. 1, 4), в южной части Сахалина в верхах мантии, тоже была выявлена наклонная отражающая граница, погружающаяся в сторону моря [25]. Возможно, эти наклонные границы по обоим профилям относятся к одному и тому же глубинному разлому, вытянутому вдоль восточной части Сахалина и погружающемуся под Охотоморскую впадину.

Большой интерес для изучения тектоники Охотского моря представляют и данные по границе  $M1$ . По-видимому, она отражает определенный этап в истории формирования земной коры впадины моря и ее природу. Но интерпретация этих данных возможна лишь совместно с анализом данных по структуре земной коры. В этом плане наиболее информативные из них получены по профилю 2-ДВ-М (рис. 5), когда зафиксировали более четкие записи коровых волн и детальнее их обработали [8, 9, 29]. На профиле 1-ОМ эти

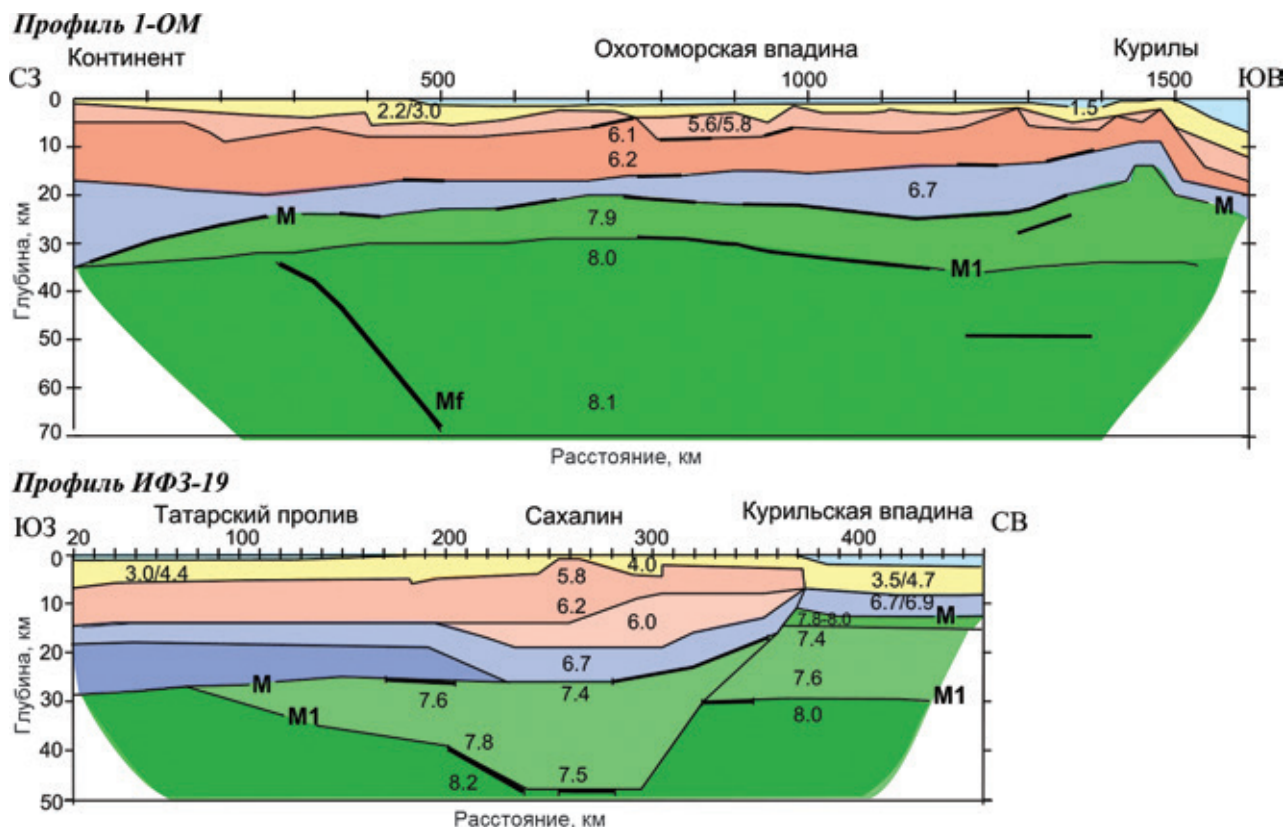


Рис. 4. Скоростные разрезы земной коры по профилям 1-ОМ и ИФЗ-19

Тонкими линиями показаны основные сейсмические границы, утолщенными – отражающие площадки, цифрами – значения скоростей продольных волн

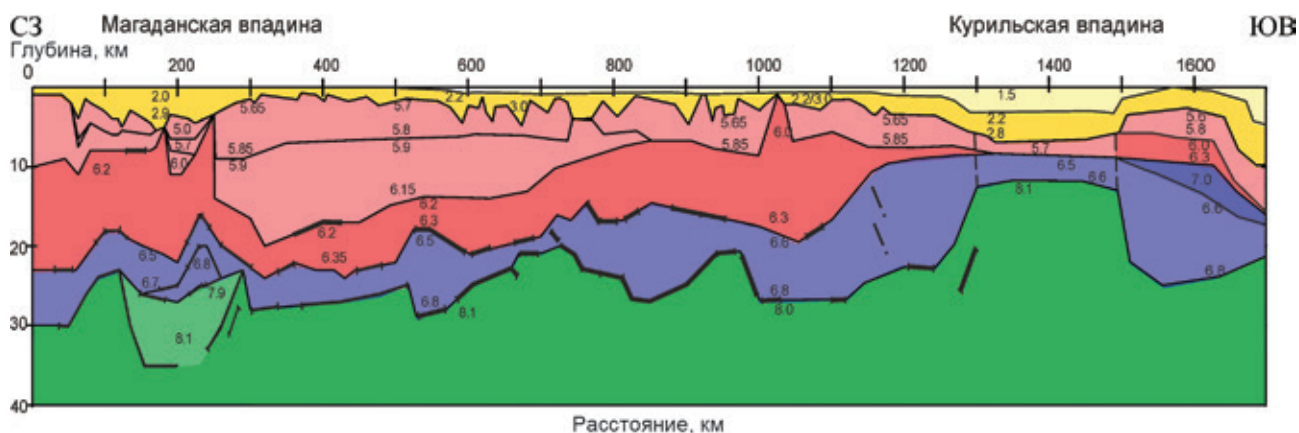


Рис. 5. Скоростной разрез земной коры по профилю 2-ДВ-М

Усл. обозн. см. на рис. 4

волны, регистрирующиеся в последующих вступлениях на удалениях от источника до 100 км, существенно искажены интенсивными кратными волнами (рис. 2), и поэтому разрез земной коры по профилю получился менее детальным, чем по 2-ДВ-М. Но в целом проведенная в последнее время обработка материалов по обоим профилям 1-ОМ и 2-ДВ-М (рис. 4, 5) позволила определить основные структурные особенности земной коры и верхов мантии Охотского моря и решить многие спорные проблемы формирования этой впадины.

**Структура земной коры Охотского моря.** Основная задача глубинных сейсмических исследований в Охотском море – установление типа земной коры

и истории ее формирования. Тип коры определяется главным образом ее мощностью и составом слагающих ее пород. Эти характеристики в настоящее время достаточно полно выясняются по сейсмическим моделям, так как по данным глубокого бурения, изучения ксенолитов и лабораторным исследованиям физических свойств пород, слоям земной коры с разными скоростями продольных волн с большой степенью надежности даны конкретные петрофизические названия [12, 27]. Так, глубокое бурение достаточно обоснованно показало, что верхние два слоя кристаллической континентальной коры со скоростями 6,0–6,4 и 6,5–6,7 км/с сложены в основном кислыми породами и различаются лишь большей степенью метаморфизма пород с повышенной

скоростями. Поэтому верхний слой чаще всего называют гранито-гнейсовым, а более глубокий гранулитогнейсовым, или диоритовым. В нижней части континентальной коры часто прослеживается слой со скоростями 6,8–7,2 км/с, для него используется название гранулитобазитовый, или просто базитовый, что подчеркивает основной состав и высокую степень метаморфизма слагающего его вещества.

Базовой моделью континентальной коры с небольшим (не более 5 км) слоем осадочного чехла является трехслойная модель мощностью 35–45 км с примерно одинаковой толщиной этих основных слоев. Такая кора характерна для большей части континентов. В океанах чаще всего наблюдается тонкая кора (5–10 км) со скоростями  $V_p = 6,7–7,2$  км/с. Но и на континентах, и в океанах прослеживается множество переходных типов коры разной мощности и с разным числом отдельных слоев. Для анализа закономерности распространения этих типов по площади и связи их с разными типами тектонических структур в работе [2] предложена следующая их классификация (рис. 6). Помимо основных типов – континентального и океанического – выделяются два подтипа переходной коры – субконтинентальный, для которого характерно сокращение толщины верхнего гранито-гнейсового слоя, и субокеанический с почти полным отсутствием верхней коры. По такому же принципу выделены и типы коры глубоких впадин.

Следует отметить условность названий для выделенных типов коры, так как описанное закрепление петрофизических названий за слоями коры с разными сейсмическими скоростями не является достаточно строгим. Сейсмические скорости зависят не только от состава пород, но и температурного режима и механических свойств вещества. Поэтому кора одинакового состава в областях с повышенным тепловым потоком может отличаться несколько пониженными скоростями, а в коллизионных

зонах – повышенными скоростными параметрами. В этой связи часто используются нейтральные названия основных слоев континентальной коры: верхняя, средняя и нижняя кора. Следует также подчеркнуть и условность деления коры на слои. Фактически кора может быть многослойной или достаточно однородной, и выделение в ней трех основных слоев с разным диапазоном скоростей проводится приблизительно по осредненной скоростной колонке.

Такое осреднение скоростных моделей коры Охотского моря позволяет выделить в этом регионе несколько типов коры. Например, по профилю 2-ДВ-М, пересекающему все основные структуры Охотского моря, средняя мощность коры около 25 км. На большей части профиля, где мощность осадков изменяется незначительно в пределах 2–4 км, в консолидированной коре выделяются три основных слоя со скоростями 5,7–6,1, 6,2–6,3 и 6,5–6,8 км/с. По предложенной типизации коры, это двуслойная континентальная кора (тип 3 на рис. 6) со скоростями 5,7–6,3 и 6,5–6,8 км/с в основных слоях. Но скорости в ее верхнем слое несколько понижены относительно средних для континентальной коры. Это связано, возможно, с повышенным температурным режимом данного региона относительно платформенных областей континентов. В целом верхний слой коры, несомненно, сложен кислыми породами, а нижний, возможно, пропитан основными выплавками.

Деление коры Охотского моря на два основных слоя позволяет не только определить ее тип, но и использовать эти данные для описания истории ее формирования. Например, мощность верхней коры вдоль профиля 2-ДВ-М существенно меняется от континентальной суши и о-ва Сахалин в сторону Курил. Возможно, что в этом направлении несколько меняется и средний состав коры. В северной части профиля толщина верхних слоев гранито-гнейсового состава составляет 20–23 км,

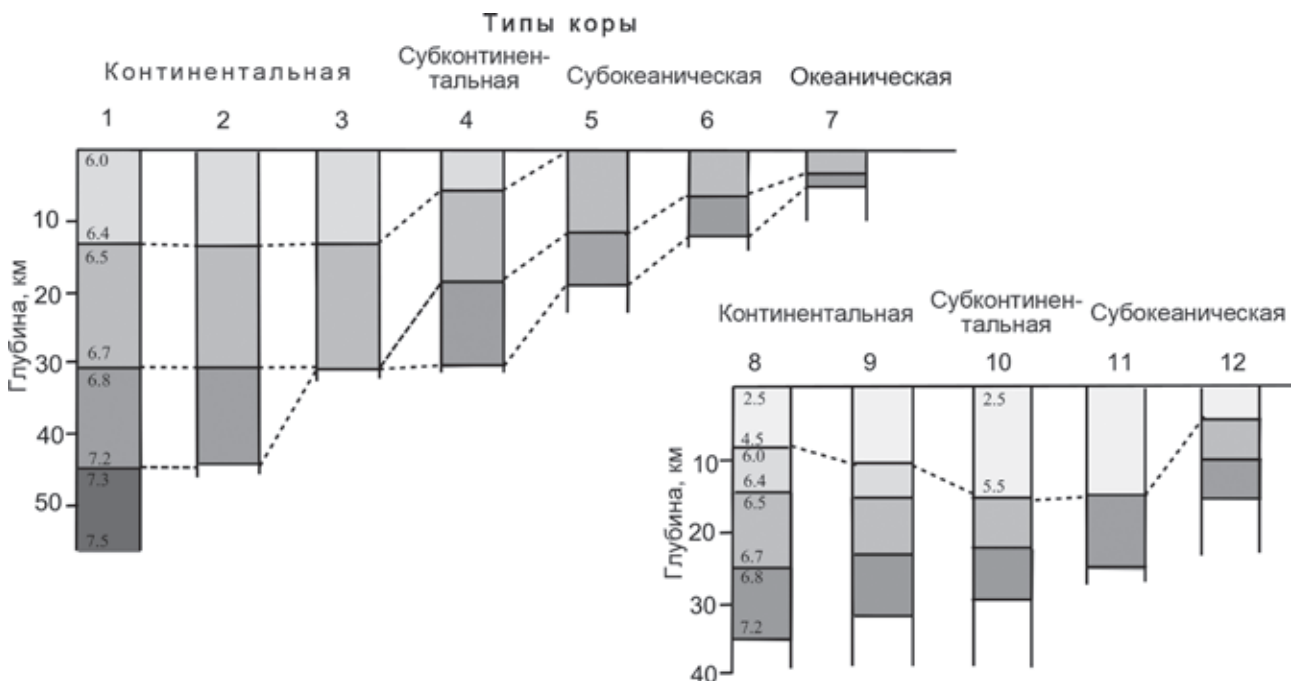


Рис. 6. Скоростные модели основных типов земной коры по классификации, предложенной в работе [2]



а нижнего (базитового) всего 5–7 км. В южной части профиля мощность верхних слоев сокращается и вблизи глубоководной Курильской впадины она не превышает 10 км. При этом толщина нижней коры в южной половине профиля увеличивается до 10–15 км. Эта смена происходит не постепенно, а в основном в центральной части моря, возможно, в зоне Центрально-Охотского разлома, выделенного в работе [4].

Резко меняется структура коры в узкой Курильской впадине: ее мощность сокращается до 10–12 км, а средние сейсмические скорости возрастают до 6,5–6,6 км/с. На этом основании кора впадины ранее относилась к субокеаническому типу [25]. Но детальная обработка сложного интерференционного поля продольных и поперечных волн по профилю 2-ДВ-М [8, 9, 29] позволила выявить наличие в консолидированной коре этой впадины слоя мощностью около 2 км со скоростями сейсмических волн 5,7 км/с, характерными для кислых пород. Поэтому кора впадины может быть отнесена и к субконтинентальному типу.

В пределах Курильских островов мощность коры снова возрастает до 28 км. Это кора континентального типа, но с внедрением в нее крупного блока основных пород со скоростью 7,0 км/с.

Профиль 2-ДВ-М пересекает не только Курильскую впадину, но и относительно глубокую Магаданскую на севере Охотского моря (рис. 1, 5). Эта впадина расположена в зоне перехода от континента к морю, и можно было бы ожидать существенные изменения типа коры под ней. Детальная система наблюдений позволила надежно определить континентальный тип коры, но осложненный деструкцией – узкими грабенами и серией глубинных нарушений по границе М.

В целом такое же, как и на профиле 2-ДВ-М, строение земной коры Охотского моря наблюдается и по профилю 1-ОМ (рис. 1, 3, а): континентальная кора характерна почти для всего профиля и меняется только в южной его части в пределах Курильских островов. Здесь тоже сокращается мощность верхней коры и в утолщенном базитовом слое выделяется блок с повышенной скоростью (7,6 км/с), соответствующий, возможно, интрузии мантийного вещества.

Следует отметить, что все перестройки в структуре коры происходят или в пограничных зонах Охотоморской впадины, или по системе глубинных нарушений. При этом меняется мощность коры и формируются локальные прогибы. На границе с континентом образовалась Магаданская впадина, окруженная глубинными разломами, а вдоль Курильских островов – Курильская впадина. В центральной части Охотоморской впадины кора отличается достаточной стабильностью, но и здесь на всех разрезах выделяется большое число нарушений, которые резче всего проявляются в подошве коры. Их можно проследить по изменению формы основных границ и системе крутонаклоненных отражающих площадок, секущих границу М. Наиболее четкое нарушение выделяется в центре Охотского моря. Оно выражено в структуре фундамента и в сложной форме подошвы земной коры на профиле 2-ДВ-М (ПК 700, рис. 5). Уже отмечалось, что это нарушение делит впадину на блоки с разной структурой земной коры. Это деление хорошо выражено и в магнитном поле: в южной части наблюдается серия интенсивных

положительных аномалий, в северной – поле спокойное [4].

Сопоставление скоростной модели коры Охотского моря с моделями прилегающих регионов (рис. 7) показывает ее близость к модели Сахалина и довольно значительные расхождения с моделями Камчатки и континента. Кора Сахалина имеет примерно такую же толщину и тоже очень низкие скорости в мощном верхнем слое. Правда, не совсем ясна структура низов коры и границы М под Сахалином (профиль ИФЗ-19, рис. 3). Здесь наблюдаются прослой с высокими скоростями (до 7,5 км/с), которые можно отнести и к коре, и к мантии. Земная кора Камчатки отличается от Охотоморской повышенной мощностью (более 30 км), но главное, большими скоростями в ее нижней половине – до 6,9–7,2 км/с. Однако приведенные на рис. 3, 7 модели Сахалина и Камчатки основаны на первых работах ГСЗ еще 1970-х годов, и скорости в низах коры определялись тогда недостаточно надежно.

Различия в строении коры Охотского моря от прилегающего континента более определенные. На профиле 2-ДВ, являющемся продолжением профиля 2-ДВ-М в континентальной части (рис. 1), мощность земной коры в среднем более 40 км [19, 21], и в пределах узкой стокилометровой прибрежной зоны она резко уменьшается до 30 км. Кроме того, в коре Охотского моря отсутствует нижний слой континентальной коры со скоростями более 6,8 км/с. На окраинах континентов часто наблюдается такая двухслойная кора (тип 3 на рис. 6). Она характерна, например, для Западной Европы и шельфовых зон [10, 11], поэтому тонкая низкоскоростная кора Охотского моря не является исключением. Это континентальная кора, типичная для окраинных зон крупных континентов.

### Структура верхней мантии Охотского моря.

Данные о структуре верхней мантии Охотского моря по профилям ГСЗ в целом незначительны, но важны с точки зрения геодинамики этого региона. Это наличие глубинного нарушения вдоль Сахалина и стабильные скорости в верхах мантии 8,0–8,1 км/с до глубины 70 км. Относительная стабильность этих скоростей в верхах мантии в центральной части Охотского моря существенно отличает ее от Прикурильской зоны, где, по данным сейсмологических исследований, скорости продольных и поперечных волн крайне изменчивы по площади и с глубиной. Различаются эти регионы и средними величинами скоростей в верхах мантии: в Охотском море они более высокие – 8,0–8,1 км/с, сопоставимые с континентальными регионами, а в Курило-Камчатской зоне – 7,7–7,8 км/с (рис. 7).

На рис. 8 приведено сопоставление обобщенных скоростных моделей верхней мантии Охотоморско-Камчатского региона [5] с референтной IASP 91 [30] и обобщенными моделями для Северной Евразии [17]. Эти модели характеризуют принципиально разные по геодинамике регионы: модель IASP 91, построенная по сейсмологическим данным, отражает в основном структуру верхней мантии тектонически активных регионов. Модель Северной Евразии, построенная по российским сверхдлинным профилям, отработанным в платформенных областях с низким тепловым потоком, отличается от референтной модели более высокими скоростями до глубины 200–250 км.

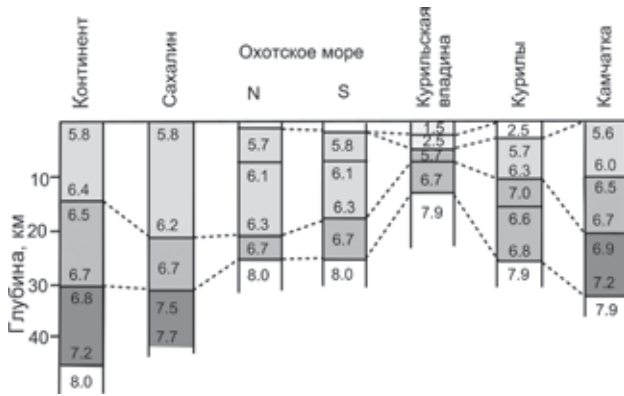


Рис. 7. Сопоставление скоростных моделей земной коры основных структур Охотоморского региона

Поскольку Охотоморский регион характеризуется высокой тектонической активностью, предполагалось, что сейсмические скорости в верхней мантии этого региона будут близкими к модели IASP 91 и пониженными относительно центральных частей Евразийского континента. Но эта естественная закономерность наблюдается лишь в верхних 10–20 км мантии (рис. 8, а), глубже Охотоморская модель практически совпадает с моделью Северной Евразии.

Сходство структурных особенностей верхней мантии Охотоморского региона с Азиатским континентом подтверждается и данными по гипоцентрам Курило-Камчатских землетрясений. Обобщение этих материалов, проведенное по густой сети российских и японских сейсмологических станций, позволило выявить ряд закономерностей в структу-

ре этой сейсмофокальной зоны [5, 28]. На глубине около 100 км часто наблюдается изменение угла наклона фокальной зоны или разрушение ее формы. На глубине 200 км отмечается интервал значительного уменьшения количества гипоцентров, а на глубине 300–400 км они практически полностью отсутствуют.

Приведенное сопоставление скоростных моделей верхней мантии Охотоморского региона с моделями других регионов (рис. 8) и выявленная четкая корреляция особенностей Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны со строением верхней мантии Евразии позволяют предполагать, что не только земная кора Охотского моря, но и вся его литосфера близка к литосфере соседнего Евразийского континента. Поэтому Охотоморская впадина является частью этого континента, а не Тихоокеанской плиты. Высокая тектоническая активность Евразии привела к некоторой трансформации и перестройке земной коры, но она сохранила свой континентальный тип.

**Проблемы геодинамики Охотоморского региона.** Геодинамика этого региона представляет большой интерес для изучения общих законов формирования такой важной структуры планетарного плана, как зона перехода между крупнейшими элементами тектоносферы Земли, Евразийским континентом и Тихим океаном. Характерная особенность этой зоны – разграничивающая их глобальная система субдукции. Большая глубина Курило-Камчатской части этой разломной сейсмоактивной зоны доказана многими геофизическими и геологическими исследованиями. Например, группа гипоцентров наиболее глубоких землетрясений (до 600 км) выявлена под Охотоморской впадиной (рис. 8, б).

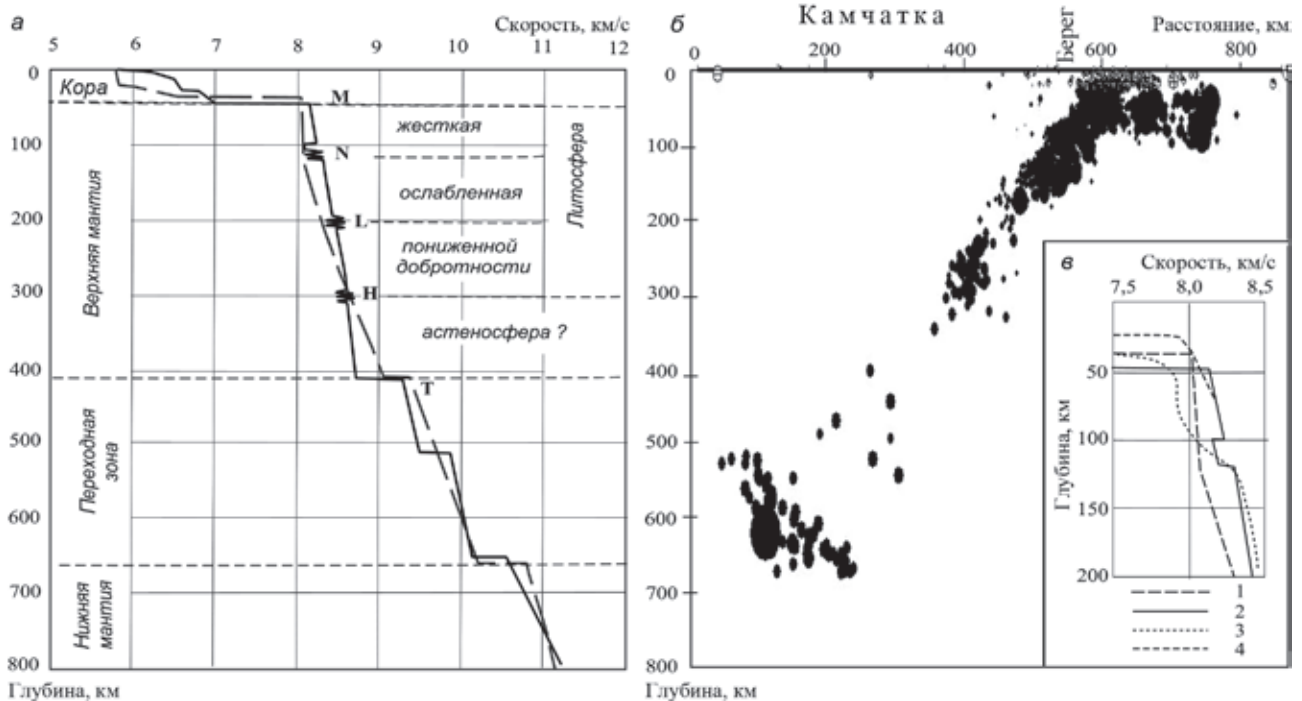


Рис. 8. Сопоставление обобщенных скоростных моделей

а – скоростная модель верхней мантии Северной Евразии (сплошная линия) [17] в сопоставлении с референтной моделью IASP 91 (пунктир) [30]; б – гипоцентры Охотоморских и Камчатских землетрясений; в – сопоставление скоростных моделей верхней мантии Охотского моря и Камчатки с моделями рис. 8, а. Модели: 1 – IASP 91, 2 – Северная Евразия, 3 – Камчатка, 4 – Охотское море



В структурном плане эта зона выражена высокоскоростными сейсмическими аномалиями (рис. 9, б), часто простирающимися глубоко в нижнюю мантию [26]. В Курило-Камчатском регионе форма такой высокоскоростной аномалии детально изучена по сейсмологическим данным [13].

С севера Охотоморская впадина отделена от континента тоже тектонически активной зоной, выявленной по геологическим данным. Эта зона описана в работе [31] как часть так называемого огненного кольца (рис. 9, а), окружающего Тихий океан и характеризующегося в постюрское время высоким уровнем вулканизма и значительным преобразованием континентальной коры за счет интрузий глубинного вещества. По данным сейсмостратиграфии, эта зона, как и Курило-Камчатская, прослеживается глубоко в мантию по аномалиям повышенных скоростей (рис. 9, б).

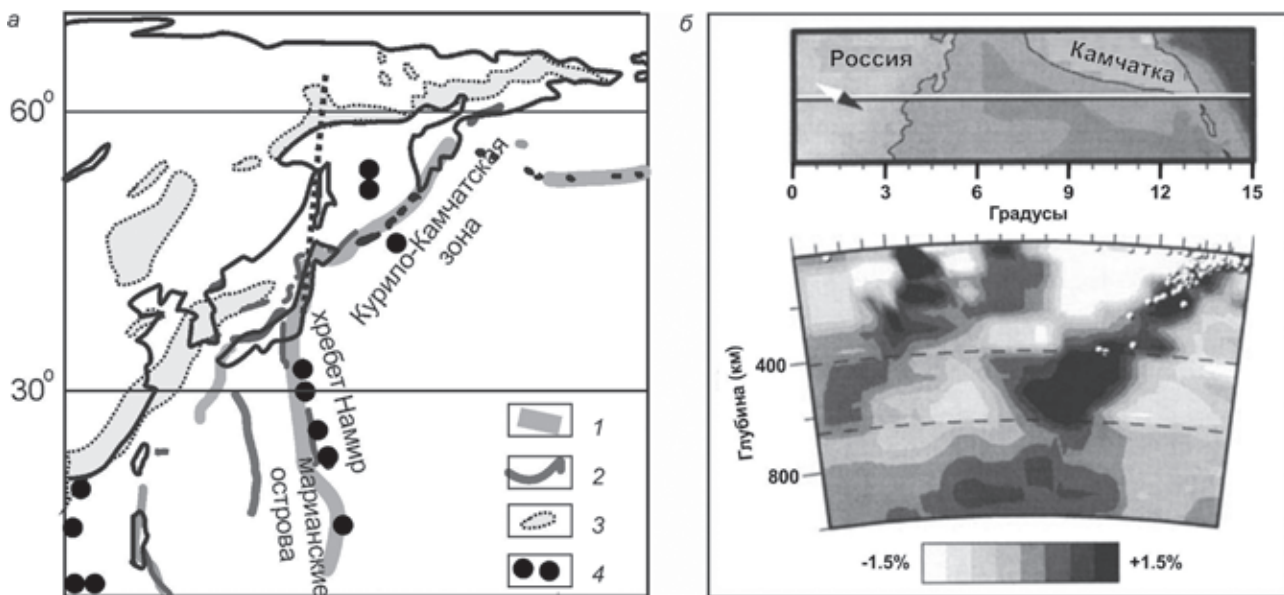
Западная граница Охотоморской впадины также представлена глубинным разломом, протягивающимся вдоль Сахалина (рис. 3, 9, а). Сейсмологические исследования подтверждают эту зону нарушений и доказывают ее большую глубинность, до 600 км. Это следует из построений И. Ю. Кулакова и др. [13], по которым отмечается крутой изгиб кровли Курило-Камчатской аномалии повышенных скоростей в сторону Сахалина. Наличие глубинного нарушения вдоль Сахалина подтверждается и современной сейсмической активностью этого региона. Именно вдоль этого нарушения, южнее и севернее Сахалина, в последнее время произошли два крупных землетрясения (рис. 1).

Возможно, Сахалинское нарушение является частью глобальной зоны нарушений, продолжающейся на сотни километров: в сторону Тихого океана – вдоль северо-восточной окраины Японских островов до Марианских островов (рис. 9, а). В азиатской части это нарушение прослеживается

в виде серии крупных разломов меридионального простираения с достаточно высокой сейсмической активностью [19, 21]. Глобальный характер этой Марианско-Сахалинской зоны разломов подтверждается и данными о водородной дегазации Земли. В работе [23] эта зона выделяется как область повышенной водородной дегазации, которая простирается от западной части Тихого океана и далее вдоль Сахалина до Арктики.

Таким образом, с трех сторон Охотское море ограничено глубинными нарушениями глобального характера, и можно говорить о существовании отдельной Охотоморской микроплиты. Не ясна только восточная ее граница: проходит ли она по границе с Камчаткой или включает в себя этот полуостров. По структуре основных тектонических зон этого региона второе предположение выглядит более правдоподобным. Важной геодинамической задачей является определение природы формирования такой плиты с континентальным типом земной коры и всей литосферы и с Охотоморской впадиной в ее центре.

По геологическим данным, тектоническое обособление этой микроплиты началось, вероятно, в юрское время, когда образовались два крупных нарушения огненного кольца, отрезавших эту микроплиту от Азиатского континента вдоль Монголо-Охотского шва, и закончилось в кайнозое ее отделением от Тихого океана вдоль Курило-Камчатского желоба (рис. 9, б). Существенных перемещений относительно соседних микроплит с того времени, очевидно, не происходило, так как глобальная Марианско-Сахалинская тектоническая зона сохранила свою форму и меридиональное простираение. Значительных перестроек литосферы Охотоморской микроплиты также не происходило: она соответствует средней мощности литосферы



**Рис. 9. Геодинамика Охотоморского региона**

а – зоны тектонической активизации разного возраста Охотоморского региона (часть схемы Тихого океана [31]): 1 – четвертичный вулканический фронт, 2 – палеоген – миоцен, 3 – юра – ранний мел, 4 – древние континентальные породы. Пунктиром на схеме показан Сахалинский глубинный разлом; б – томографические модели верхней мантии Охотоморского региона [26]. Темным цветом отмечены области повышенных сейсмических скоростей, белыми точками – гипоцентры землетрясений

Азиатского континента (примерно 300 км), сохраняет средние сейсмические скорости в основных ее слоях и общий характер реологической расчлененности. Изменения коснулись лишь самых верхов мантии и структуры земной коры и привели к сокращению мощности коры и образованию Охотоморского бассейна. Только в узкой Прикурильской зоне произошла более существенная перестройка литосферы (рифтогенез) с образованием коры, близкой субокеаническому типу.

При образовании глубоких впадин типа Курильской обычно рассматриваются три основных процесса, которые можно считать наиболее достоверными — рифтогенез, базификация и эклогитизация коры [1, 16, 24]. С рифтогенезом обычно связывают образование субокеанических впадин, когда происходит существенное растяжение коры, формирование глубинных разломов и заполнение их мантийным материалом. Такие впадины имеют обычно линейную форму. Подобную природу можно предположить для Курильской впадины, вытянутой вдоль глубинного нарушения (рис. 1, 3, 5). Кора представлена здесь слоями со скоростями 5,7 и 6,5–6,8 км/с и соотношениями скоростей продольных и поперечных волн, типичными для континентальной коры [10], т. е. это кора континентального рифтогенного типа.

Хорошо обоснован процесс формирования глубоких впадин континентального типа путем базификации земной коры. Этот термин означает не только внедрение в кору основного материала, но и трансформацию коры в результате различных процессов метаморфизма и вулканизма, геохимических преобразований при увеличении температуры и давления, что приводит к увеличению плотности и сейсмической скорости пород. Такие процессы детально изучены [24], и их реальность показана на примере многих впадин.

Вместе с тем подобные преобразования, по всей видимости, не имели большого значения при формировании впадины Охотского моря. Несмотря на большое число нарушений по границе М, в консолидированной части коры не выявлено высокоскоростных магматических внедрений и нет глубокого погружения бассейна в целом. Более того, как отмечалось выше, сейсмические скорости в коре впадины Охотского моря понижены относительно таковых в континентальной коре. Процессом базификации коры можно только объяснить увеличение ее сейсмических скоростей в сторону Курильских островов и земную кору самих островов, насыщенных мантийными внедрениями (рис. 5).

Одним из возможных путей формирования Охотоморской впадины представляется процесс эклогитизации пород нижнего слоя коры, который мог привести к увеличению плотности этого слоя и повышению сейсмической скорости в нем до 8,0 км/с, т. е. до уровня мантийных пород. В результате такого процесса сокращается мощность коры, она погружается, а граница М поднимается. Этим же процессом может быть объяснено и возникновение в подошве коры Охотоморской впадины двух границ М и М1 с более высокими скоростями по сравнению с Курило-Камчатской зоной.

При формировании Охотоморской впадины можно отметить несколько тектонических процессов с постепенной их сменой от континента в сторону Курильской дуги. В центральной части

впадины основным мог быть процесс эклогитизации коры, в южной части происходило уплотнение коры за счет ее базификации, а в Прикурильской зоне преобладал рифтогенез. Такое распределение разных по интенсивности процессов предполагает и изменчивость соответствующих источников энергии. Главным источником в данном случае являлась, очевидно, Тихоокеанская сейсмофокальная зона с глубокими землетрясениями. Она характеризуется высоким тепловым потоком, активным вулканизмом и высокотемпературной дегазацией. По всей видимости, вся эта зона в целом является каналом интенсивной адвекции под влиянием глубинных флюидов. Их наличие в мантии увеличивает энергонасыщенность вещества и способствует метасоматозу, в результате которого существенно изменяются физические свойства вещества [14, 15]. Интенсивность тепловой адвекции в фокальной зоне увеличивается с уменьшением глубины, и этим можно объяснить увеличение активности тектонических преобразований в Охотском море при постепенном уменьшении глубины до этой зоны при приближении к глубоководному желобу. Глубина до нее в центре Охотского моря достигает 600 км. Поступавшее с такой глубины тепло охватывало большую площадь и способствовало равномерной эклогитизации земной коры. Ближе к Курильским островам глубина до фокальной зоны уменьшается и выделяющаяся из нее энергия и глубинное вещество более интенсивно преобразуют (базифицируют) земную кору.

Охотоморская плита — неотъемлемая часть Евразийского континента. Важно отметить, что описанные процессы преобразования коры Охотоморской впадины не изменили ее континентальной природы и создали предпосылки для формирования осадочного платформенного чехла. Это имеет большое значение для формирования нефтяных месторождений, поскольку общепризнано, что регионы высокой нефтеносности чаще всего связаны именно с корой континентального типа, перекрытой достаточно мощной осадочной толщей. Кроме этого, средняя часть коры Охотского моря характеризуется пониженными скоростями, что можно связывать с ее возможной повышенной флюидонасыщенностью. Благоприятным фактором является также наличие в верхах мантии крупных нарушений, т. е. каналов поступления в земную кору глубинных флюидов [6]. По данным измерения водородной дегазации Земли, Сахалинская зона разломов — одна из глобальных зон повышенной дегазации, к которым приурочены крупнейшие нефтегазовые регионы [22], в связи с чем Охотоморский бассейн относится к наиболее перспективным нефтегазоносным регионам мира.

**Заключение.** Проведенная обработка и обобщение глубинных сейсмических исследований в Охотоморском регионе позволяют достаточно детально описать структуру земной коры и геодинамику этого сегмента обширной зоны перехода от континента к океану и на этой основе создать предпосылки для решения ряда важных с практической и научной точек зрения задач. Основные результаты обобщения сводятся к следующему:

1. Земная кора Охотоморского региона относится к континентальному типу со средней мощностью около 25–30 км. На две трети она сложена кислыми породами со скоростями сейсмических



волн 5,7–6,3 км/с. Только в Курильской впадине мощность коры сокращается до 14 км и насыщена породами основного состава.

2. Мантийная часть литосферы Охотоморской микроплиты повторяет главные особенности строения верхней мантии Северной Евразии, выявленные на российских геотрансектах, пройденных с помощью ядерных взрывов, что позволяет рассматривать эту микроплиту как часть Азиатского континента.

3. Охотоморская впадина со всех сторон окружена глубинными нарушениями глобального характера. Помимо Курильской сейсмоактивной зоны, ограничивающей впадину с юга-востока, и Магаданской зоны юрско-меловой тектонической активизации, отделившей ее с севера, крупная зона нарушений выявлена вдоль восточной окраины Сахалина. Она прослеживается в меридиональном направлении далеко в Тихом океане и Восточной Азии. Эти нарушения дают основание рассматривать Охотоморско-Камчатский регион как отдельную микроплиту.

4. Проведенное сопоставление скоростных моделей верхней мантии Охотоморского региона с особенностями гипоцентрии Тихоокеанского кольца позволяет сделать еще один важный геодинамический вывод: форма зон гипоцентрии глубоких землетрясений и их распределение по глубине определяется реологической расслоенностью литосферы и наличием в них волноводов и тонкорасслоенных сейсмических границ.

---

1. *Артюшков Е.В.* Механизм образования сверхглубоких осадочных бассейнов. Растяжение литосферы или экологизация? // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 12. – С. 1675–1686.

2. *Белоусов В.В., Павленкова Н.И.* Типы земной коры Европы и Северной Атлантики // Геотектоника. 1989. № 3. – С. 3–14.

3. *Богданов Н.А., Добрецов Н.Л.* Охотское океаническое вулканическое плато // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 2. – С. 101–104.

4. *Вержбицкий Е.В., Кононов М.В.* Геодинамическая эволюция литосферы Охотоморского региона по геофизическим данным // Физика Земли. 2006. № 6. – С. 47–59.

5. *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.

6. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ: Материалы Международной конференции памяти академика П.Н. Кропоткина, 20–24 мая 2002 г., Москва / отв. ред. А.Н. Дмитриевский, Б.М. Валяев. – М.: ГЕОС, 2002. – 471 с.

7. *Злобин Т.К.* Строение земной коры Охотского моря и нефтегазоносность ее в северо-восточной (Прикамчатской) части (по сейсмическим данным). – Южно-Сахалинск: Изд-во СаГУ, 2002. – 97 с.

8. *Кашубин С.Н.* Особенности волновых полей продольных и поперечных волн при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях / С.Н. Кашубин, Т.С. Сакулина, Н.И. Павленкова, Ю.П. Лукашин // Технологии сейсморазведки. 2011. № 4. – С. 88–102.

9. *Кашубин С.Н.* Современные методы проведения и интерпретации глубинных сейсмических зондирований в окраинных морях России / С.Н. Кашубин,

Т.С. Сакулина, Ю.П. Лукашин, Н.И. Павленкова // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в XXI веке. – М., 2013. – С. 175–194.

10. *Кашубин С.Н.* Типы земной коры Циркумполярной Арктики / С.Н. Кашубин, Н.И. Павленкова, О.В. Петров, Е.Д. Мильштейн, С.П. Шокальский, Ю.М. Эринчек // Регион. геология и металлогения. 2013. № 55. – С. 5–20.

11. *Кашубин С.Н.* Типы земной коры Центральной и Северо-Восточной Азии, дальневосточной и арктической областей перехода континент–океан / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Е.Д. Мильштейн, Е.А. Андросов, И.Ю. Винокуров, С.П. Шокальский // Регион. геология и металлогения. 2018. № 73. – С. 6–18.

12. *Кременецкий А.А.* Комплексные геохимические и петрологические исследования глубоких и сверхглубоких скважин / А.А. Кременецкий, Л.Н. Овчинников, В.Д. Нартеков, И.В. Липидус // Глубинные исследования земной коры в СССР / под ред. Е.А. Козловского. – Л.: МинГео СССР, 1987. – С. 43–58.

13. *Кулаков И.Ю.* Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии / И.Ю. Кулаков, Н.Л. Добрецов, Н.А. Бушенкова, А.В. Яковлев // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. – С. 830–851.

14. *Лебедев Е.Б., Павленкова Н.И., Луканин О.А.* Экспериментальное изучение влияния воды на скорости упругих волн в дуните и серпентините (к вопросу о природе зоны низких скоростей в верхней мантии Земли) // Докл. РАН. 2017. Т. 472. № 1. – С. 1–4.

15. *Летников Ф.А.* Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 12. – С. 1296–1307.

16. *Павленкова Н.И., Кашубин С.Н., Павленкова Г.А.* Земная кора глубоких платформенных впадин Северной Евразии и природа их формирования // Физика Земли. 2016. №5. – С. 150–164.

17. *Павленкова Н.И., Павленкова Г.А.* Строение земной коры и верхней мантии Северной Евразии по данным сейсмического профилирования с ядерными взрывами. – М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2014. – 192 с. – (Серия аналитических обзоров «Очерки по региональной геологии России»; Вып. 10).

18. *Сакулина Т.С.* Геологическая модель Охотоморского региона по данным опорных профилей 1-ОМ и 2-ДВ-М / Т.С. Сакулина, А.П. Каленич, А.И. Атаков, И.М. Тихонова, Н.А. Крупнова, Т.М. Пыжьянова // Разведка и охрана недр. 2011. № 10. – С. 11–17.

19. *Соловьев В.М.* Особенности сейсмического строения области сочленения Евразийской и Охотоморской плит на Востоке России (в створе опорного профиля 3-ДВ) / В.М. Соловьев, В.С. Селезнев, А.С. Сальников, С.В. Шибяев, В.Ю. Тимофеев, А.В. Лисейкин, А.Е. Шенмайер // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 11. – С. 2044–2058.

20. Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану / Е.И. Гальперин, И.П. Косминская (отв. ред.). – М.: Наука, 1964. – 308 с.

21. Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным / под ред. А.С. Сальникова. – Новосибирск: Наука, 2007. – 173 с.

22. *Сывороткин В.Л., Павленкова Н.И.* Мировая рифтовая система и нефтегазоносные пояса планеты // Глубинная нефть: электронный журнал. 2013. Т. 1. № 10. – С. 1576–1585.

23. *Сывороткин В.М.* Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. – М.: Геоинформцентр, 2002. – 250 с.

24. *Фролова Т.И., Бурикова И.А.* Магматические формации современных геотектонических обстановок. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 320 с.

25. Филоненко В.П., Павленкова Г.А. Некоторые особенности динамики земной коры Охотоморского региона // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сборник трудов Седьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. – М.: Научный мир, 2006. – С. 101–107.
26. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. B 12. – P. 30055–30078.
27. Downes H., Pchtonen P., N'anttari I., Sharkov E.V. Proterozoic zircon ages from lower crustal granulite xenoliths, Kola Peninsula, Russia: evidence of crustal growth and reworking // Int. Geol. Soc. 2002. Vol. 159. – P. 485–488.
28. Igarashi T., Matsuzawa T., Umino N., Hasegawa A. 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. Vol. 106. – P. 2177–2191.
29. Kashubin S.N. Earth's crust model of the South-Okhotsk Basin by wide-angle OBS data / S.N. Kashubin, O.V. Petrov, A.V. Rybalka, E.D. Milshtein, S.P. Shokalsky, M.L. Verba, E.O. Petrov // Tectonophysics. 2017. Vol. 710–711. – P. 37–55.
30. Kennet B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophys. J. Int. 1991. Vol. 105. – P. 429–465.
31. Yano T. Tectonic development of the Pacific Ocean and its periphery: a constraint on large-scale rotations of lithospheric blocks // NCGT Journal. 2014. Vol. 2. N 2. – P. 54–68.
1. Artyushkov E.V. The mechanism of formation of ultradeep sedimentary basins. Stretching the lithosphere or eclogitization? *Geologiya i geofizika*. 2010. Vol. 51. No 12, pp. 1675–1686. (In Russian).
2. Belousov V.V., Pavlenkova N.I. Crustal types in Europe and the North Atlantic. *Geotektonika*. 1989. No 3, pp. 3–14. (In Russian).
3. Bogdanov N.A., Dobretsov N.L. Okhotsk oceanic volcanic plateau. *Geologiya i geofizika*. 2002. Vol. 43. No 2, pp. 101–104. (In Russian).
4. Verzhbitsky E.V., Kononov M.V. Geodynamic evolution of the lithosphere of the Okhotsk Sea region according to geophysical data. *Fizika Zemli*. 2006. No 6, pp.47–59. (In Russian).
5. Gontovoy L.I., Popruzhenko S.V., Nizkous I.V. Structure of the upper mantle of the ocean-continent transition zone in the region of Kamchatka. *Vulkanologiya i seismologiya*. 2010. No 4, pp. 13–29. (In Russian).
6. Degazaciya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft' i gaz: Materialy Mezhdunarodnoj konferencii pamyati akademika P.N. Kropotkina, 20–24 maya 2002 g., Moskva [Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil and gas. Proceedings of the International Conference in memory of Academician P.N. Kropotkin, May 20–24, 2002]. Ex. eds. A.N. Dmitrievsky, B.M. Valyaev. Moscow: GEOS. 2002. 471 p.
7. Zlobin T.K. Stroenie zemnoj kory Ohotskogo morya i neftegazonosnost' ee v severo-vostochnoj (Prikamchatskoj) chasti (po sejsmicheskim dannym) [The crustal structure of the Sea of Okhotsk and its oil and gas potential in the northeastern (Prikamchatka) part (according to seismic data)]. Yuzhno-Sakhalinsk: SakhGU Press. 2002. 97 p.
8. Kashubin S.N., Sakulina T.S., Pavlenkova N.I., Lukashin Yu.P. Features of wave fields of S- and P-waves in deep seismic investigations in water areas. *Technologies of seismic prospecting*. 2011. No 4, pp. 88–102. (In Russian).
9. Kashubin S.N., Sakulina T.S., Lukashin Yu.P., Pavlenkova N.I. Modern methods of conducting and interpreting deep seismic soundings in the marginal seas of Russia. *Actuality of G.A. Gamburtsev's ideas in the XXI century*. Moscow. 2013. Pp. 175–194. (In Russian).
10. Kashubin S.N. Crustal types in the Circumpolar Arctic. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2013. No 55, pp. 5–20. (In Russian).
11. Kashubin S.N. Crustal types in Central and North-East Asia, the Far Eastern and Arctic regions of the continent-ocean transition. *Region. geologiya i metallogeniya*. 2018. No 73. pp. 6–18. (In Russian).
12. Kremenetsky A.A., Ovchinnikov L.N., Nartekoev V.D., Lapidus I.V. Comprehensive geochemical and petrological studies of deep and superdeep wells. *Deep investigations of the Earth's crust in the USSR*. Ed. E.A. Kozlovsky. Leningrad: MinGeo USSR. 1987. Pp. 43–58. (In Russian).
13. Kulakov I.Yu., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V. Slab shape in subduction zones below the Kurile-Kamchatka and Aleutian arcs from regional tomography data. *Geologiya i geofizika*. 2011. Vol. 52. No 6, pp. 830–851. (In Russian).
14. Lebedev E.B., Pavlenkova N.I., Lukanin O.A. Experimental study of water effect on the elastic wave velocity in dunite and serpentinite (towards the question of the nature of low velocity zones in the upper mantle of the Earth). *Dokl. RAN*. 2017. Vol. 472. No 1, pp. 1–4. (In Russian).
15. Letnikov F.A. Fluid regime of endogenous processes and problems of ore genesis. *Geologiya i geofizika*. 2006. Vol. 47. No 12, pp. 1296–1307. (In Russian).
16. Pavlenkova N.I., Kashubin S.N., Pavlenkova G.A. Earth crust of deep platform basins in Northern Eurasia and the nature of their formation. *Fizika Zemli*. 2016. No 5. Pp. 150–164. (In Russian).
17. Pavlenkova N.I., Pavlenkova G.A. Stroenie zemnoj kory i verhnjej mantii Severnoj Evrazii po dannym sejsmicheskogo profilirovaniya s yadernymi vzryvami [The structure of the earth's crust and upper mantle of Northern Eurasia according to seismic profiling with nuclear explosions]. Moscow: GEOKART; GEOS. 2014. 192 pp. (Seriya analiticheskikh obzorov «Ocherki po regional'noj geologii Rossii»; vyp. 10).
18. Sakulina T.S. Geological model of the Okhotsk sea region according to the reference profiles 1-OM and 2-DV-M. *Razvedka i ohrana nedr*. 2011. No 10, pp. 11–17. (In Russian).
19. Soloviev V.M. Seismic structure features of the junction region of the Eurasian and Sea of Okhotsk plates in the East of Russia (in-line of 3-DB reference line). *Geologiya i geofizika*. 2016. Vol. 57. No 11, pp. 2044–2058. (In Russian).
20. Stroenie zemnoj kory v oblasti perekhoda ot Aziatskogo kontinenta k Tihomu okeanu [Crustal structure in the transition from the Asian continent to the Pacific Ocean]. Ex. eds. E.I. Galperin, I.P. Kosminskaya. Moscow: Nauka. 1964. 308 p.
21. Struktura i stroenie zemnoj kory Magadanskogo sektora Rossii po geologo-geofizicheskim dannym [Crustal structure in the Magadan sector of Russia from geological and geophysical data]. Ed. A.S. Salnikov. Novosibirsk: Nauka. 2007. 173 p.
22. Syrovotkin V.L., Pavlenkova N.I. Global rift system and oil and gas bearing belts of the planet. *Glubinnaya neft': ehlektronnyj zhurnal*. 2013. Vol. 1. No 10, pp. 1576–1585. (In Russian).
23. Syrovotkin V.M. Glubinnaya degazaciya Zemli i global'nye katastrofy [Deep Earth degassing and global catastrophes]. Moscow: Geoinformcentr. 2002. 250 p.
24. Frolova T.I., Burikova I.A. Magmatichekieskie formacii sovremennyh geotektonicheskikh obstanovok [Magmatic formations of modern geotectonic environments]. Moscow: MSU Press. 1997. 320 p.
25. Filonenko V.P., Pavlenkova G.A. Some features of crustal dynamics in the Sea of Okhotsk region. *Geophysics of the XXI Century: 2005. Collection of Works of the Seventh*



V.V. Fedynsky *Geophysical Readings*. Moscow: Nauchnyj mir. 2006. Pp. 101–107. (In Russian).

26. Bijwaard, H., Spakman, W., Engdahl, E.R. 1998: Closing the gap between regional and global travel time tomography. *J. Geophys. Res.* Vol. 103. B12. 30055–30078.

27. Downes, H., Pchtonen P., N’Ianttari I., Sharkov E.V. 2002: Proterozoic zircon ages from lower crustal granulite xenoliths, Kola Peninsula, Russia: evidence of crustal growth and reworking. *Int. Geol. Soc. Vol. 159*. 485–488.

28. Igarashi, T., Matsuzawa, T., Umino N., Hasegawa, A. 2001: Spatial distribution of focal mechanisms for interplate and intraplate earthquakes associated with the subducting Pa-

cific plate beneath the northeastern Japan arc: A tripled-planed deep seismic zone. *J. Geophys. Res.* 106. 2177–2191.

29. Kashubin, S.N., Petrov, O.V., Rybalka, A.V., Milshtein, E.D., Shokalsky, S.P., Verba, M.L., Petrov, E.O. 2017: Earth’s crust model of the South-Okhotsk Basin by wide-angle OBS data. *Tectonophysics.* 710–711. 37–55.

30. Kennet, B.L.N., Engdahl, E.R. 1991: Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int. Vol. 105*. 429–465.

31. Yano, T. 2014: Tectonic development of the Pacific Ocean and its periphery: a constraint on large-scale rotations of lithospheric blocks. *NCGT Journal.* Vol. 2. 2. 54–68.

---

Павленкова Нинель Ивановна – доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, ИФЗ РАН<sup>1</sup>. <ninapav@mail.ru>  
Кашубин Сергей Николаевич – доктор геол.-минерал. наук, профессор, зам. ген. директора, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия. <sergey\_kashubin@vsegei.ru>

Гонтовая Лариса Ивановна – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН). Бульвар Пийпа, д. 9, Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия. <lecya@emsd.ru>

Павленкова Галина Александровна – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, ИФЗ РАН<sup>1</sup>. <gpavlenkova@yandex.ru>

Pavlenkova Ninel Ivanovna – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, IPE RAS<sup>1</sup>. <ninapav@mail.ru>  
Kashubin Sergey Nikolaevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Deputy Director General, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia. <sergey\_kashubin@vsegei.ru>

Gontovaya Larisa Ivanovna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science (IVS FEB RAS). 9 Bul’var Piypa, Petropavlovsk-Kamchatskiy, 683006, Russia. <lecya@emsd.ru>

Pavlenkova Galina Aleksandrovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, IPE RAS<sup>1</sup>. <gpavlenkova@yandex.ru>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта (ИФЗ РАН). Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1, Москва, 123242, Россия.  
Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences named after O. Yu. Schmidt (IPE RAS). 10 Ul. B. Gruzinskaya, str. 1, Moscow, 123242, Russia.