УДК 550.340

### ГЛУБИННЫЕ РАЗЛОМЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ЗОНЫ

© 2011 г. С.М. Зверев

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Сопоставляются результаты исследований глубинного строения земной коры Курило-Камчатской зоны сейсмическими методами ГСЗ и ОГТ со сведениями о ее сейсмичности по сайтам NEIC. Прослежена приуроченность очагов сильнейших землетрясений к островному склону глубоководного желоба и глубинам до 100 км. Более слабые землетрясения отмечаются под океаническим склоном желоба; под островным склоном желоба их очаги погружаются вдоль подошвы коры до глубины 30 км; с приближением к Южным Курильским островам их глубина возрастает до 100 км.

Независимые данные ГСЗ и ОГТ свидетельствуют о наличии в коре вблизи островов сложно структурированных толщ, благоприятных для распространения сейсмических волн. С удалением от островов эти толщи сменяются другими, имеющими хаотическую структуру, пониженные скорости сейсмических волн; к ним приурочены очаги многочисленных землетрясений.

Для обсуждения предлагается модель тектонических процессов, основанная на детальном анализе структуры коры и механизмов известных землетрясений, согласно которой погружающиеся под островным склоном пластичные породы увлекают за собой край блока плотных пород; возникающие упругие деформации накапливаются и спорадически разряжаются в виде событий, смещения в которых направлены вверх и проявляются в виде взбросов.

**Ключевые слова**: Курило-Камчатская зона, сейсмические методы ГСЗ и ОГТ, *NEIC*, сейсмичность, блоки земной коры, разломы, глубоководный желоб, погружение, крип, деформация, разрядка, взбросы.

#### Введение

Курило-Камчатская зона Тихого океана — один из наиболее тектонически активных районов Земли, отличающийся высокой современной сейсмической и вулканической активностью и привлекающий в связи с этим внимание специалистов разных направлений наук о Земле. Изучение зоны чрезвычайно важно для понимания процессов тектонического развития и выработки концепции эволюции планеты.

Широкомасштабное изучение Курило-Камчатской зоны началось в середине прошлого столетия. В 1949–1955 гг. Институт океанологии АН СССР в рейсах научно-исследовательского судна "Витязь" выполнил на акваториях дальневосточных морей и прилегающих частей Тихого океана систематические эхолотные промеры, сбор осадков и коренных пород морского дна. При этом наиболее детальные исследования были проведены в Курило-Камчатской зоне [Удинцев, 2009].

Позже в рамках Международного геофизического года (1957–1958 гг.) Институтом физики Земли была организована Тихоокеанская комплексная геолого-геофизическая экспедиция, проведшая многопрофильные наземные и морские наблюдения в рассматриваемой зоне. Наиболее сложными среди них были выполненные с помощью Военно-морского флота СССР морские исследования методом ГСЗ, при которых сейсмические волны от взрывов глубинных бомб регистрировались надводными кораблями и подводными лодками. Полученные материалы отличались хорошим качеством, обеспечившим надежные результаты их интерпретации, что позволило в 1960-е годы продолжить исследования методом ГСЗ в регионе.

Схема сейсмических профилей, выполненных в разные годы в Курило-Камчатской зоне методами ГСЗ, ОГТ и НСП, приведена на рис. 1, на котором сохранены обозначения, принятые на момент производства работ.

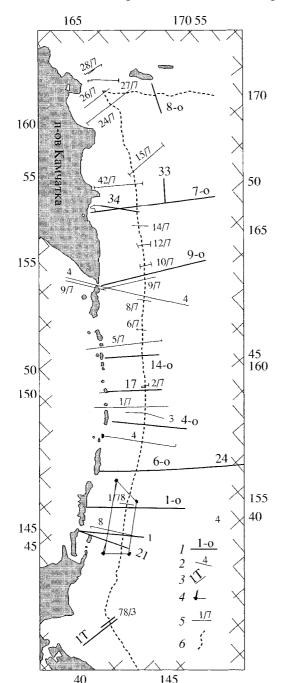


Рис. 1. Схема сейсмических профилей, выполненных в Курило-Камчатской зоне в разные годы I — профили ГСЗ (1957–1967 гг., ИФЗ); 2 — профили ОГТ (1970-е гг., ИМГиГ); 3 — профили ОГТ на севере Японского желоба (1970-е гг.); 4 — полигон ОГТ у Южных Курильских островов (середина 1970-х гг.); 5 — профили НСП (1970-е гг.); 6 — ось глубоководного желоба [Тектоника..., 1980; Зверев, Полянский, 2008]

Наиболее полно полученные материалы, их интерпретация и первое обсуждение результатов приведены в изданных в разные годы монографиях [Строение..., 1964; Глубинное..., 1971; Зверев, Капустян, 1980]. Основное внимание в этих публикациях уделено выделению крупнейших горизонтальных неоднородностей в глубинной структуре земной коры на всей площади переходной зоны океан–континент, для которой характерно присутствие коры разных типов. Появившиеся позже работы содержали несколько иные варианты интерпретации фактических данных ГСЗ, их обобщение и сравнение с результатами других методов. Как правило, авторы этих работ не меняли основных выводов, представленных в названных выше монографиях, лишь уточняя

некоторые отдельные детали строения земной коры. Надо отметить, что при этом наибольшее внимание уделялось анализу сейсмических записей, полученных на профилях ГСЗ вкрест простирания дуги (профили 1-o, 6-o, 4-o, 14-o, 9-o, 7-o, см. рис. 1).

В конце шестидесятых разные участки дуги и желоба пересекли многочисленные профили НСП [Береснев и др., 1980; Тектоника..., 1980]; в середине семидесятых были выполнены исследования ОГТ у Южных Курил, где планировалось глубоководное бурение по международной программе, не осуществленное, к сожалению, по политическим причинам [Бондаренко и др., 1977; Строение..., 1981]; в 1983–1984 гг. проведены детальные наблюдения методом ГСЗ с взрывами у Средних Курильских островов [Сергеев и др., 1988]; в 1989 г. отработаны три профиля ОГТ, пересекшие дугу [Международный..., 2003]. Перечисленное позволяет утверждать, что сегодня Курило-Камчатская зона – один из наиболее изученных районов островных дуг, обеспеченный подробной информацией о строении осадков и земной коры, которая получена различными сейсмическими методами.

После распада СССР и наземные, и морские исследования в Курило-Камчатской зоне были резко сокращены. Специалисты, занимающиеся этим регионом, сосредоточили свое внимание в основном на анализе и обсуждении результатов наблюдений землетрясений в зоне, используя данные мировой и локальных сетей. Появлялись работы, авторы которых рассматривали разные вопросы геологии, геофизики и геохимии Курилской дуги для решения региональных и глобальных проблем (см., например, [Ермаков, 2002]). Однако надо констатировать, что публикации последнего десятилетия, в которых обсуждаются разные аспекты сейсмичности и тектоники активной окраины Тихого океана, преимущественно основаны на японских данных. Материалы, полученные в свое время российскими исследователями Курило-Камчатской зоны, и результаты их интерпретации используются недостаточно. Частично это можно объяснить тем, что первоисточники давно стали редкостью, научные архивы не упорядочены, а большинство опытных специалистов, принимавших участие в исследованиях, уже не работают.

Однако нельзя забывать, что полученные в прошлые годы записи ГСЗ, годографы и разрезы, содержащиеся в старых публикациях, добротны и достоверны. Их качество обеспечено тем, что раньше использовались мощные взрывные источники колебаний, применялся контроль чувствительности аппаратуры; разрезы строились классическими способами на основе оригинальных записей с анализом встречных и нагоняющих систем наблюдений. Сегодня архивные записи и годографы можно (и нужно!) снова интерпретировать – это позволит уточнить детали разрезов, решить ряд специальных вопросов.

Несколько лет назад мы обратились к своим старым материалам для Курило-Камчатской зоны [Зверев, Полянский, 2008; Зверев, 2008]. С использованием записей, полученных на семи профилях ГСЗ, пересекающих островной склон Курило-Камчатского глубоководного желоба, был составлен обобщенный годограф для всей дуги. После этого с привлечением результатов ГСЗ, ОГТ и НСП была подобрана приближенная двумерная скоростная модель земной коры.

Наш опыт интерпретации материалов ГСЗ показал, что важные детали разрезов, связанные с горизонтальными неоднородностями среды, могут быть детально изучены при тщательном анализе зарегистрированного волнового поля даже при очень сложном строении земной коры, например, таком, какое мы наблюдаем в зоне схождения плит в Восточном Средиземноморье [Зверев, 2010].

В данной работе приводятся примеры интерпретации данных ГСЗ и ОГТ для Курило-Камчатской зоны и сопоставление положения выделенных сейсмическими методами зон разломов с сейсмичностью Курильской дуги по данным *NEIC*. По воз-

можности автор старался не повторять материалы, опубликованные в недавних статьях [Зверев, 2008, 2009; Зверев, Полянский, 2008].

## Возможность выделения разломов земной коры по полученным в прежние годы материалам ГСЗ

Полученные нами результаты детальных исследований методом ГСЗ в Восточном Средиземноморье и выполненные расчеты позволили сформулировать критерии выделения зон разломов и определения их сейсмических параметров [Зверев, Полянский, 2008; Зверев, 2010]. Разломные зоны обычно отличаются сложной или хаотической структурой осадков и резкой сменой характеристик сейсмических волн на их краях. Можно надеяться, что использование различных комбинаций фактических данных, отражающих названные особенности разломных зон, позволит надежно фиксировать их положение. Обратим внимание на следующие важные моменты.

- 1. Максимальная достоверность выделения разломных зон по данным ГСЗ возможна при наличии построенного разреза и сейсмических записей, перекрывающих эти зоны при нагоняющих и встречных наблюдениях. При этом наиболее надежные результаты могут быть получены при использовании монтажей сейсмических записей с минимальными искажениями и калибровкой амплитуд. Точность фиксации краев разлома на профиле будет зависеть от величины сноса сейсмических лучей, для определения которой необходимы данные о граничных и средних скоростях, а также от ошибок определения координат и глубин моря. Использование записей неполных систем наблюдения (или одиночных записей) снижает достоверность выделения зон разломов.
- 2. Менее надежны результаты, получаемые при использовании опубликованных годографов, ибо при сколько-нибудь сложной среде выбор на сейсмических записях представительных точек вступления волн, относимых далее к основным годографам, определяется опытом и идеологией интерпретатора. Степень доверия к выделяемым зонам разлома в значительной степени зависит от детальности наблюдений наиболее надежным представляется выделение разломов, если на годографах первых вступлений есть частые точки, подтверждаемые нагоняющими годографами; менее надежно выделение по одиночным годографам (даже с частыми точками).
- 3. Если в публикации, используемой для новой интерпретации, имеются годографы и авторские разрезы, то для приближенной локации краев разломной зоны можно использовать сведения о поведении скоростей сейсмических волн. При этом следует анализировать значения кажущейся скорости, определяемой по одиночным годографам (в однотипной геологической структуре); пределы значений граничной скорости для непротяженных границ; закономерности изменения средних скоростей в авторском разрезе.
- 4. Экспериментальные данные и выполненные расчеты показывают, что кроме заметного изменения времен вступления первых волн, их кажущихся скоростей и амплитуд, критерием для выделения зоны разлома по сейсмическим записям может быть появление в последующих вступлениях на сейсмограммах у краев разлома интенсивных волн, которые примыкают к первым вступлениям и имеют аномальные кажущиеся скорости.

#### Результаты исследований методом ГСЗ, выполненных в Курило-Камчатской зоне

Результаты первой интерпретации данных ГСЗ на профилях, пересекающих южную часть Курило-Камчатской зоны, опубликованы Ю.В. Тулиной и В.И. Мироновой [1964], а для профилей, пройденных в северной части, – Л.С. Вейцман [1964].

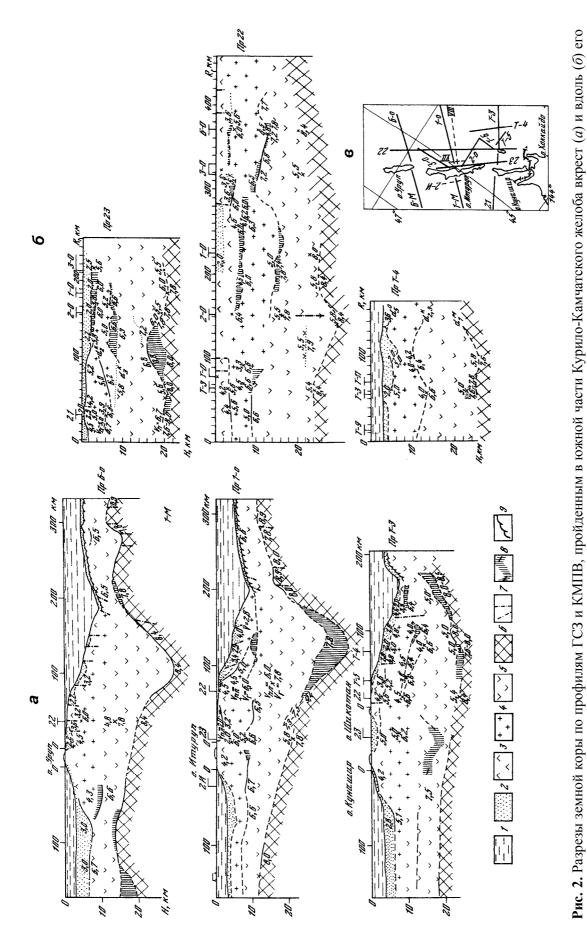
Сейсмограммы, полученные на профилях ГСЗ, ориентированных вкрест простирания Курило-Камчатского желоба, подробно исследовались Ю.В. Тулиной [Тулина, 1976; Тулина и др., 1980]; построенные монтажи сейсмограмм частично рассматривались в нашей недавней публикации [Зверев, Полянский, 2008]. На записях целого ряда профилей (7-о, 9-о, 17, 6-о, 4-о, 1-о, 21, см. рис. 1) авторами отмечались места характерных изменений сейсмических записей, где происходило резкое уменьшение (вплоть до полного исчезновения) амплитуд волн; уменьшение кажущихся скоростей первых волн; разрывы и смещения их годографов. Положение этих мест оказалось закономерно связанным с их удалением от оси глубоководного желоба, что дало авторам право на обоснованное предположение — указанные особенности записей связаны с наличием глубинного разлома. На построенных разрезах места разломов отображались изменением количества слоев, скоростей и глубин залегания границ в коре. Одновременно было установлено, что под островным склоном желоба ниже разлома структура коры сложна и изменчива, а средние скорости понижены.

Рассмотрим подробнее материалы ГСЗ, освещающие проявление глубинных разломов на расположенных в разных структурных зонах профилях ГСЗ. Кроме упоминаемых ранее данных первых экспериментов будем использовать результаты, не вошедшие в [Строение..., 1964]; речь идет о данных из работ [Суворов, 1975; Тектоника..., 1980; Сергеев и др., 1988].

Мы не занимались новой обработкой фактических материалов и не выполняли такие необходимые сегодня процедуры интерпретации, как итеративный подбор двумерных моделей методом математического моделирования. Мы не обсуждаем достоверность деталей построенных разрезов и их интерполяции на участках, не освещенных наблюдениями. Однако наличие систем встречных и нагоняющих наблюдений, прозрачные способы интерпретации волнового поля, построений и представлений разрезов, а также выполненные в отдельных местах оценки возможной неоднозначности построений — все это позволяет надеяться на определенную достоверность основных характеристик ранее полученных разрезов. Возможные неточности в установлении природы волн и построении разрезов в совокупности с неизбежными ошибками определения координат и глубин моря в таком сложном районе частично компенсируются детальностью наблюдений и плотностью профилей; по нашему мнению, эти неточности не влияют на главные результаты регионального масштаба.

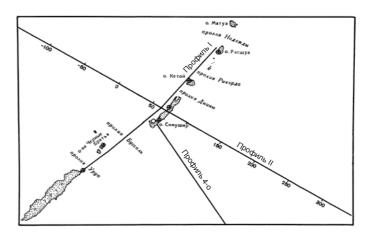
В 60–70-е годы прошлого столетия в южной части Курильской дуги были выполнены исследования методом КМПВ–ГСЗ, материалы которых обрабатывались совместно с материалами ранее проведенных работ [Суворов, 1975; Тектоника..., 1980]. В результате были построены разрезы, часть из которых приведена на рис. 2. Насыщенность разрезов фактическими данными определяется наличием пересекающихся профилей. На разрезах, ориентированных вкрест простирания дуги (рис. 2, а), протяженных непрерывных границ в коре не выделено. Толщи со скоростями ~5 км/с и ~6.5 км/с намечены условно. Местоположение разломов устанавливается предположительно по смене характера осадков и увеличению глубины залегания поверхности Мохоровичича (под хребтом Витязь и островным склоном глубина достигает 25—30 км).

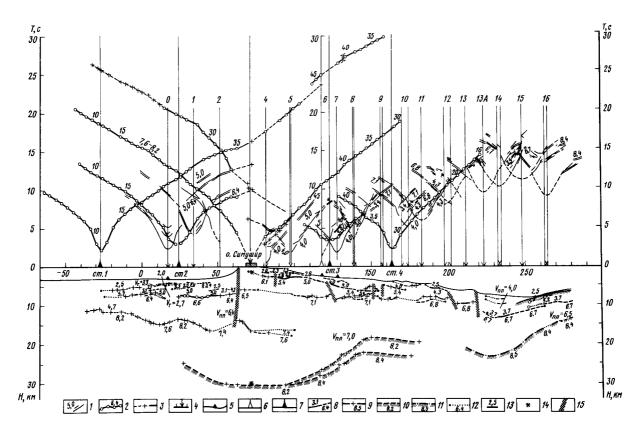
В 1983—1984 гг. в средней части Курильской дуги были пройдены профили ГСЗ, исследования на которых отличались высокой детальностью. К сожалению, нам не удалось найти подробный отчет об эксперименте и оригинальные записи, в связи с чем пришлось ограничиться только опубликованными в короткой статье [Сергеев и др., 1988] данными. Схема расположения двух рассмотренных нами профилей представлена на рис. 3; система годографов и сейсмические разрезы по ним — на рис. 4.



(-5-слои: водный (1), осадочный (2), вулканогенно-метаморфический (3), гранитный (4), метабазальтовый (5); 6- верхняя мантия; 7 – разломы; 8 – пределы возможного положения сейсмических границ; 9 – разломы во втором океаническом слое простирания, и схема их расположения (в) [Суворов, 1975; Тектоника..., 1980]

Рис. 3. Схема расположения профилей ГСЗ, отработанных в 1983—1984 гг. в средней части Курильской дуги (по [Сергеев и др., 1988] с изменениями)





**Рис. 4.** Система годографов и сейсмический разрез вдоль профиля II [Сергеев и др., 1988] I-3 — годографы сейсмических волн, построенные по данным КМПВ (I), ГСЗ (2) (цифры — значения кажущихся скоростей, полученные после приведения годографов к дну моря), и способом параллельного переноса нагоняемого годографа (3); 4—7 — местоположение станций: буйковых (4) и донных (5) при исследованиях КМПВ, буйковой (6) и донных (7) при исследованиях ГСЗ; 8, 9 — преломляющие границы, построенные по данным КМПВ (8), ГСЗ (9); (цифры над границей — значение эффективной скорости, под границей — значение граничной скорости); 10, 11 — поверхность Мохоровичича, построенная по результатам исследований ГСЗ: 10 — 1983—1984 гг., 11— 1957—1959 гг. (пр. 4-о); 12 — участки интерполяции преломляющих границ (залитый кружок — положение на разрезе участка преломляющей границы, соответствующего начальной точке головной волны); 13 — элементы отражающих границ и средние скорости до них; 14 — глубины залегания сейсмических границ по данным ГСЗ (профиль I) и МОВЗ в месте пересечения с профилем II; 15 — зоны тектонических нарушений

Начнем рассмотрение сейсмических материалов с профиля II, пересекающего Курильскую дугу. Полученные на профиле длинные годографы (рис. 4) впервые непрерывно осветили переход от Курильской впадины Охотского моря через острова дуги и далее поперек прилегающего склона глубоководного желоба, его осевой части и океанического склона. Установлено, что погружение поверхности Мохоровичича до 30 км имеет место не под подводными хребтами Витязя и Шатского (как на северной и южной частях дуги), а непосредственно под о. Симушир. Обращает на себя внимание то, что длинные годографы от донной ст. 1 и сейсмологической станции на о. Симушир, а также короткий годограф от донной ст. 3 заканчиваются примерно в одном и том же месте, расположенном в верхней части островного склона вблизи ст. 4. Здесь, повидимому, располагается край зоны разлома. Совпадение мест окончания существенно различных по длине годографов свидетельствует о большой глубине и субвертикальном положении разломной зоны.

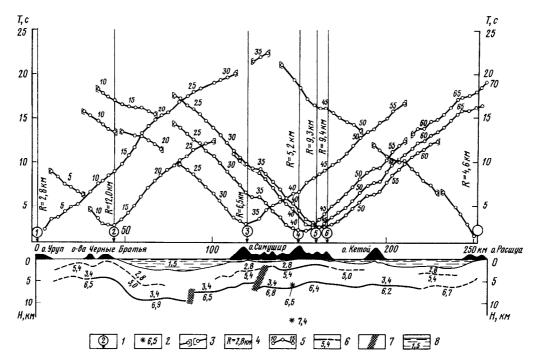
В целом поведение разрезов ГСЗ вкрест простирания дуги и их соотношение с предполагаемыми зонами разломов может быть охарактеризовано следующим образом. При перемещении в направлении со стороны океана поверхность фундамента океанической коры (3-го слоя со скоростью ~6.5—6.7 км/с) распространяется через осевую часть желоба под островной склон с сохранением скорости и небольшим вариациями глубины. Средние скорости в толще выше этой границы под склоном оказываются весьма низкими (иногда 2.8 км/с) и сохраняются до зоны разломов, находящейся на удалении от 20—30 до 40—50 км от оси желоба. На этом же участке склона резко возрастает глубина до поверхности Мохоровичича — от 12—15 км на ложе океана и прилегающем склоне до 20—25 км и более под островным склоном вблизи зоны разлома. В верхней части разреза кора имеет свойства океанической, на глубинах более 25 км — континентальной. Над зоной разлома по склону желоба в верхах коры структуры становятся более разнообразными, увеличивается доля фрагментов границ со скоростями более 5 км/с, меняются свойства границ, продолжающих океаническую кору.

Обратимся к мало обсуждаемым в литературе результатам  $\Gamma$ C3 на профилях, проходящих по простиранию Курильской дуги. Вернемся к рис. 2,  $\delta$ , на котором представлены разрезы, расположенные в южной части дуги и проходящих вдоль побережья о. Итуруп (профиль 23), вдоль подводного хребта Витязь (профиль 22), и поперек склона ниже зоны глубинного разлома (профиль T-4). Эти разрезы демонстрируют изменчивое строение с меняющимися толщами осадков и зонами инверсии скоростей в верхах коры (на профилях 22 и 23, расположенных выше зоны глубинного разлома) и более спокойный разрез на склоне ниже края разлома. Намеченные фрагменты сейсмических границ имеют протяженность 50–80 км. Надо отметить, что описанная картина подтверждается в точках пересечения с другими профилями.

Выразительные результаты получены на профиле I (положение профиля см. на рис. 3), также проходящем вдоль дуги от о. Уруп до о. Расшуа и расположенном в полосе активного современного вулканизма.

Морские взрывы на линии, проходящей вдоль побережья островов, успешно регистрировались установленными на них наземными станциями. Длина годографов не превышала 100-110 км; глубина границ -5-8 км (рис. 5). Для первой границы фундамента, залегающего на глубине 3-5 км, граничные скорости составили 5.0-5.4 км/с; протяженность построенных участков -30-70 км. Для следующей границы, построенной вдоль всего профиля на глубинах 5-8 км, скорости равны 6.4-6.8 км/с. С приближением к островам наблюдается подъем границ на 2-3 км, отмечаются небольшие разломы под проливом Буссоль и под южной частью о. Симушир.

Здесь уместно упомянуть результаты, полученные в 1958 г. на профилях ГСЗ, ориентированных по простиранию дуги и глубинного желоба [Строение..., 1964].



**Рис. 5.** Система годографов и сейсмический разрез вдоль профиля I [*Сергеев и др.*, 1988] I — местоположение и номера пунктов приема; 2 — положение границы на профиле II; 3 — участок смены волн; 4 — расстояние от пункта приема до линии профиля; 5 — номера взрывов, вынесенные на годограф; 6 — участок границы, построенный по одиночному годографу; 7 — зоны тектонических нарушений; 8 — водный слой

На одном из этих профилей станции были расставлены по линии, направленной примерно вдоль дуги, а взрывы проводились на профиле, ориентированном поперек нее. Годографы и разрез коры заметно меняются при переходе взрывов от желоба к островному склону и его прибрежной части. Если для волн от средней и нижней частей коры изменение времен прихода волн при движении вдоль склона происходит постепенно, то для волн от подошвы коры, возбуждаемых взрывами, расположенными на верхней части склона, времена прихода значительно больше, чем от взрывов вблизи оси желоба. Разрыв годографов, составляющий ~5 с, происходит примерно на середине островного склона и, по нашему мнению, приурочен к расположенному здесь глубинному разлому.

Другой профиль ориентирован вдоль глубоководного желоба и расположен в нижней части островного склона немного западнее оси желоба. Годографы длиной до 150 км характеризуют строение коры до глубин примерно 30 км. При глубине океана 5.2–6.0 км разрез коры отличается от типично океанического – толщина коры увеличивается до 20 км (вместо 8 км в океане), под осадками выделяются слои со скоростями 5.5 км/с, залегающие выше кровли океанической коры, для которой скорость составляет 6.8 км/с.

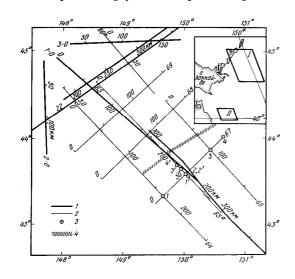
В целом на профилях, ориентированных вдоль дуги, в коре редко наблюдаются устойчивые протяженные границы. Однако размеры их отдельных фрагментов заметно больше размеров, характерных для границ на поперечных профилях. Намечается некоторая корреляция выделенных фрагментов границ с положением островов и проливов. Ощутимые вариации структуры коры на профилях, проходящих вдоль Курильской дуги, иллюстрируют ее отдельные сегменты, но надо заметить, что эти вариации значительно менее выражены, чем вариации структуры по линиям профилей вкрест простирания дуги.

Разрезы ГСЗ по линиям вдоль и поперек Курилской дуги демонстрируют очень сложное строение коры, ее раздробленность и изменчивость. Оценки скоростей на

выделенных фрагментах границ в верхах коры близки для обоих направлений: в верхней части – около 5.2–5.5 км/с; глубже – 6.5–6.8 км/с. Размеры намеченных фрагментов границ на профилях, проходящих вдоль дуги, заметно больше, чем на поперечных. Помимо выделенных крупных глубинных разломов, по имеющимся признакам могут быть установлены многочисленные небольшие нарушения.

#### Данные ОГТ

Исследования ОГТ в южной части Курильской дуги проводились в начале 70-х годов прошлого века в связи с подготовкой к планируемому глубоководному бурению [Бондаренко и др., 1977, 1981]. Для наших целей мы воспользуемся компактным представлением схемы полигона ОГТ (рис. 6) и полученных разрезов (рис. 7), заимствованным из работы [Тулина и др., 1981].



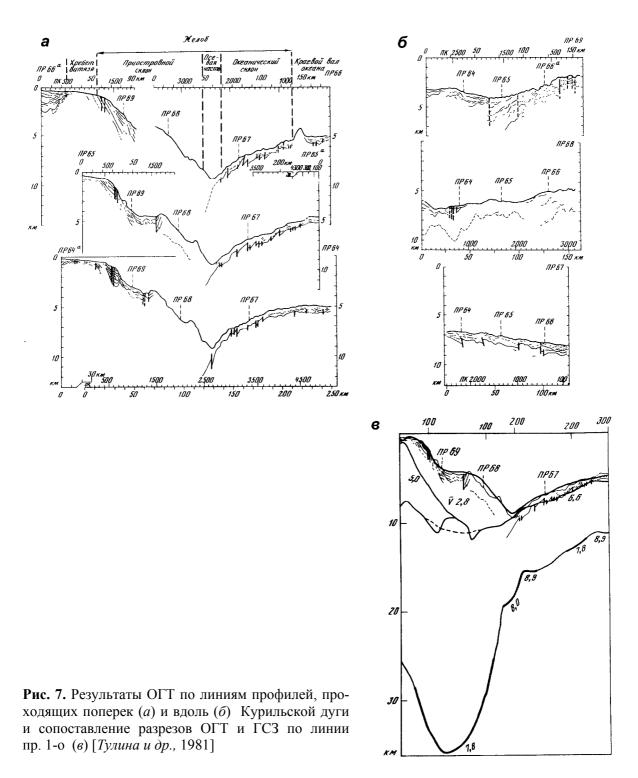
**Рис. 6.** Схема полигона ОГТ в южной части Курильской дуги [*Тулина и др.*, 1981]

I — профили ГСЗ,  $\bar{Z}$  — ОГТ,  $\bar{J}$  — точки сопоставления результатов ГСЗ и ОГТ,  $\bar{J}$  — ось Курило-Камчатского желоба

На полигоне, расположенном вблизи о. Итуруп, наблюдения ОГТ были проведены по трем профилям вдоль дуги и трем поперек нее. На разрезах, пересекающих дугу (рис. 7, *a*), четко выделяются три участка с разным строением осадков и верхов коры. Океанический склон до оси глубоководного желоба характеризуется толщиной осадков менее 1 км, неровной поверхностью акустического фундамента, изрезанной субвертикальными разломами небольшой амплитуды. На осевой части глубоководного желоба нет участков с выровненной поверхностью морского дна. На островном склоне желоба от его оси до средней и верхней части — не наблюдается упорядоченной слоистости и при используемой методике ОГТ не выделяются устойчивые сейсмические границы. В верхней части островного склона в слое толщиной 1—3 км прослеживается упорядоченная слоистость разреза с крутым падением слоев в сторону склона.

Профили по простиранию дуги (рис. 7,  $\delta$ ) хорошо подтверждают данные поперечных. В верхней части склона по сложному характеру слоистости намечены блоки размерами 40–50 км. В средней и нижней частях почти всюду слоистость отсутствует. На океаническом склоне под сложными слоями осадков через каждые 20–30 км выделены крутые разломы.

Один из поздних профилей ОГТ, выполненный в 1989 г. по более совершенной методике [Международный..., 2003], пересек дугу в южной части полигона. На нем полностью подтвердилось положение акустически прозрачной толщи, под которой дополнительно была выделена отражающая граница, продолжающая под островным склоном поверхность океанического фундамента. Подобная граница отмечена и на профилях в прилегающей части Японского желоба [Фон Хюне, Суехиро, 2003]. Мы полагаем, что

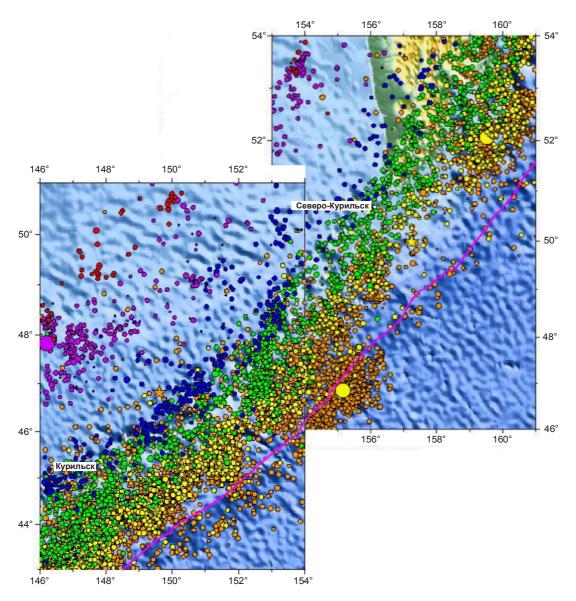


наблюдаемый в верхней части склона раздел между акустически прозрачными и слоистыми участками в верхах разреза представляет собой край зоны глубинного разлома. Его положение намечено нами на разрезах, приведенных на рис. 7, и будет обсуждаться ниже.

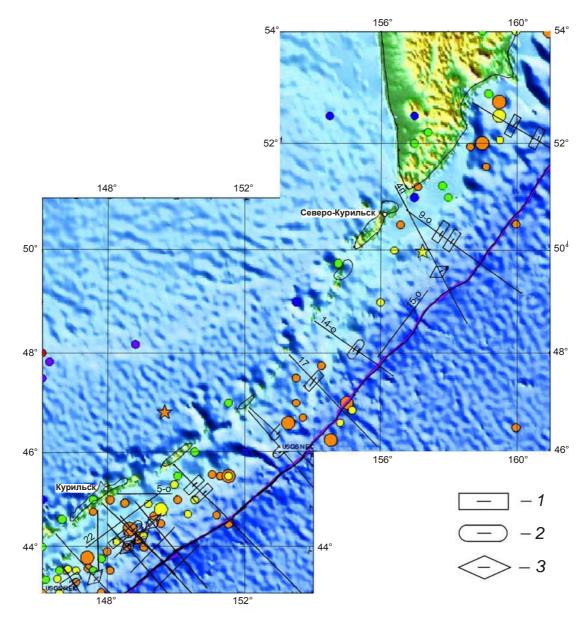
Как уже отмечалось, мы имели возможность совместить разрезы ГСЗ и ОГТ по совпадающей линии профиля 1-о (рис. 7, в). Подошва акустически прозрачного слоя под островным склоном продолжает поверхность третьего слоя океанической коры. В верхах разреза (2.8 км/с) на этом участке отмечаются весьма низкие скорости. Под островным краем зоны разлома поверхность Мохоровичича залегает на максимальных глубинах (35 км), скорости в мантии пониженные (7.8 км/с).

## Сопоставление результатов сейсмических наблюдений с сейсмичностью исследуемого региона

Для сопоставления были использованы данные *NEIC*, представленные в Интернете (http://earthquake.usgs.gov/regional/neic): карты инструментальной сейсмичности разных регионов для землетрясений в широком диапазоне магнитуд за период от 1990 г. до времени события (мы анализировали данные для землетрясений 22 и 27 апреля 2010 г.) (рис. 8) и аналогичные карты для сильнейших землетрясений с  $M \ge 7$  за период от 1900 г. (рис. 9). На картах размеры кружка пропорциональны магнитуде события, разным цветом обозначены разные глубины очагов. Шаг дискретизации глубин установлен *NEIC* и, вероятно, выражает пределы значений и возможную точность определений.



**Рис. 8.** Карта инструментальной региональной сейсмичности для Курильских островов по данным *NEIC* за период наблюдений с 1990 г. до времени события (анализировались землетрясения 22 и 27 апреля 2010 г.). Кружки – эпицентры землетрясений, диаметр кружков пропорционален магнитудам (http://earthquake.usgs.gov/regional/neic)



**Рис. 9.** То же, что на рис. 8, для сильнейших землетрясений (M≥7) за период наблюдений с 1900 г. На профилях ГСЗ и ОГТ отмечено положение зон разломов, выделенных по записям ГСЗ (I), по годографам ГСЗ (I) и по разрезам ОГТ (I3)

На первой из приведенных карт можно видеть, что большинство зарегистрированных событий — это слабые землетрясения с преобладающей магнитудой 4—5. Мы имеем основания полагать, что в действительности в регионе происходит значительно большее число слабых и слабейших землетрясений, чем показано на карте. Наш опыт использования для регистрации сейсмических волн при исследованиях методом ГСЗ высокочувствительных донных станций или аппаратуры, размещаемой на находящихся в дрейфе в режиме тишины подводных лодках и на автономных дрейфующих буях, показал, что очень слабые землетрясения в районе глубоководных желобов происходят практически непрерывно. Это же можно сказать и о других тектонически активных структурах морей и океанов. Так, при наблюдениях с донными сейсмическими станциями в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта дальность прослеживания слабых землетрясений оказалась менее 50 км [Зверев, 1996; Болдырев, 1998].

На карте можно видеть, что плотность и распределение эпицентров наглядно отображают поперечную зональность дуги, ее разделение на сегменты, приуроченные к южным, средним и северным островам дуги и ее продолжению у Камчатки. Сегменты различаются взаимным расположением групп эпицентров землетрясений с определенными глубинами очагов и положением крупных структур рельефа поверхности и дна моря. Четкие границы между сегментами проходят вдоль северо-восточного побережья о. Хоккайдо, продолжения пролива Буссоль, по траверсу о. Матуа — пролив Крузенштерна и у южного окончания п-ова Камчатка.

Вместе с тем, для большей части дуги отмечаются общие закономерности. При перемещении от океана к континенту вкрест простирания дуги первые очаги землетрясений обнаруживаются на краевом вале ложа океана, не доходя до склона и оси Курильского желоба; глубина очагов составляет 0–35 км, т.е. они приурочены к подошве коры. Общая тенденция распределения очагов в пределах дуги – их погружение при перемещении в северо-западном направлении от океана в сторону дуги (субдукция), которое на разных сегментах дуги происходит по-разному.

Плотность эпицентров вдоль дуги меняется, оставаясь самой высокой для Южных и Средних Курил на участке от глубоководного желоба вплоть до островов дуги, под которыми глубины очагов оцениваются в 150–300 км. Обратим внимание на то, что следующая область сравнительно плотного расположения эпицентров с глубинами очагов 300–500 км в этой части дуги смещена на северо-запад и отделена от островов полосой шириной более чем 200 км, в которой отмечены лишь отдельные, разобщенные эпицентры. Часто обсуждаемое в публикациях распространение на эту полосу единой зоны субдукции фактически объясняется объединением данных, полученных на различных участках исследуемой площади, которые смещены друг относительно друга вдоль дуги, т.е. при осреднении и сглаживании реально наблюдаемой картины.

На второй карте (рис. 9) представлены данные по сильнейшим ( $M \ge 7$ ) землетрясениям региона, произошедшим с 1900 г. по настоящее время. Эпицентры этих землетрясений распределены вдоль дуги неравномерно, чаще всего они приурочены к океаническому краю протяженного подводного поднятия, расположенного вдоль островов примерно на середине склона между осью глубоководного желоба и берегом (хр. Витязя и Шатского). На эту карту нами нанесены линии профилей ГСЗ и ОГТ с отмеченными краями зон разломов, обсуждаемых выше. Можно видеть общую согласованность данных ГСЗ и ОГТ. Часто на профилях выделяются не один, а два разлома. Обращает на себя внимание очевидная приуроченность положения эпицентров большинства сильнейших землетрясений к приостровному краю зоны разломов, выделяемой по сейсмическим данным.

#### Обсуждение результатов

Обращение к архивным материалам ГСЗ по Дальневосточной переходной зоне от континента к океану было инициировано результатами, полученными нами при исследованиях ГСЗ в Восточном Средиземноморье в 1989–1990 гг. Оба региона представляют собой области конвергенции крупнейших плит Земли: на Дальнем Востоке – Тихоокеанской и Азиатской; в Средиземном море – Африканской, Аравийской и Анатолийской. Выразительные дуговые структуры – Курило-Камчатская и Кипрская – характеризуются высокой современной тектонической активностью, проявляющейся в сложном рельефе и глубинном строении, многочисленных землетрясениях и вулканизме. Было интересно проследить черты сходства или различия в проявлениях геологических событий, происходящих в этих регионах, с учетом их разных масштабов.

И основные цели, стоявшие при проведении исследований методом ГСЗ в двух названных регионах, и обеспеченность их фактическими материалами существенно различны. На Дальнем Востоке изучались основные типы строения земной коры в зоне перехода от азиатского континента к Тихому океану, на Средиземном море — взаимоотношение структур коры в сложной зоне конвергенции. Соответственно этим задачам менялась детальность наблюдений. На Тихом океане регистрирующие станции на профилях располагались с шагом 50–100 км, расстояние между взрывами составляло 10 км. На Средиземном море донные станции ставились через 20–30 км, импульсы пневмоисточников выполнялись через 0.3 км. Благоприятным обстоятельством для сравнения результатов была преемственность и полная аналогичность методики возбуждения и регистрации сейсмических колебаний. Спектр источника согласовывался со спектром приходящих сейсмических волн, Калибровка сейсмоприемников и защита от помех обеспечивала надежную высокочувствительную неискаженную регистрацию сейсмических волн. По всем этим причинам сейсмические записи экспериментов по ГСЗ, выполненных в разное время, были полностью совместимы.

Многократное перекрытия профилей встречными и нагоняющими наблюдениями позволило по поведению годографов надежно выделить места резкого горизонтального изменения свойств сейсмического волнового поля (края зон разломов). Неоднозначность решений при построении разреза с использованием всех возможных комбинаций встречных и нагоняющих годографов уменьшалась при подборе двумерного разреза благодаря привлечению дополнительных независимых данных.

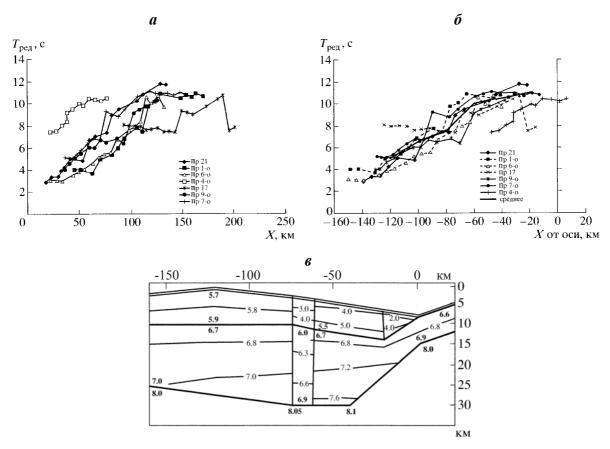
В Восточном Средиземноморье на морских профилях ГСЗ были построены глубинные разрезы и выделено 15 зон разломов [Зверев, 2010]. Все разломы приурочены к краям крупных структур рельефа морского дна - подводных хребтов и поднятий, уступов, локальных и протяженных желобов, - что подтверждает тектоническую природу рельефа. Почти повсеместно внутренняя структура разломов характеризуется усложненным хаотическим строением верхней части разреза и пониженными скоростями до больших глубин в коре. Ширина зон разломов сильно меняется (от 4 до 16 км), прослеженные разломы имеют почти вертикальное падение. Детали внутреннего строения разломов и их взаимоотношение с прилегающими блоками разнообразны; каждый разлом имеет свои индивидуальные особенности. Часто разломы асимметричны – иногда глубина фундамента на разных краях разломов разнится более чем на 10 км. Вблизи крупнейших разломов отмечается усложнение деталей структуры коры на краях блоков, прилегающих к ним; влияние разломов на соседние блоки прослеживается на удалениях до 20–30 км. Этот факт, а также субвертикальное продолжение разломов на глубину позволяют говорить о сложности процессов в зоне разлома с большой долей сдвиговых компонент смещений [Морозов, 2002].

Сведения о сейсмичности региона обеспечиваются данными *NEIC* и Средиземноморского центра. На разрезах ГСЗ очаги землетрясений приурочены к толще фундамента со скоростями около 6 км/с, а также к низам коры. Толщи осадков со скоростями до 4.5–5.0 км/с не содержат очагов землетрясений (пластичны?), несмотря на заметные резкие деформации и разломы на поверхности дна и в осадках. Локальные и протяженные прогибы дна до глубин, превышающих значения на соседних участках, всегда выражают разломы и сопровождаются характерными чертами сейсмичности. Очаги приурочены к краям прогибов, а внутри структуры они отсутствуют. Отсутствие очагов до больших глубин установлено также в зоне разлома к югу от о. Кипр между блоками существенно различного строения коры — в этой зоне асейсмична часть разреза, характеризующаяся большим горизонтальным градиентом скоростей. Мы полагаем, что на этом участке присутствуют породы в пластичном состоянии, деформирующиеся без излучения сейсмических волн. Таковы общие результаты, полученные нами в Восточном Средиземноморье, на фоне которых будут рассмотрены материалы по Курило-Камчатской зоне.

20

С использованием архивных записей, полученных на представительных профилях ГСЗ в Курило-Камчатской зоне, были составлены годографы для семи профилей, пересекающих островной склон желоба [Зверев, Полянский, 2008]. Сводка этих годографов, приведенных по расстоянию к единому нулю, представлена на рис. 10, a. Наблюдаемый разброс времен, достигающий 3-4 с, характеризует отличие данных для индивидуальных профилей от единой одномерной модели коры, которое определяется различием структуры, а также ошибками эксперимента. При расположении годографов в функции расстояния от оси желоба (рис. 10,  $\delta$ ) разброс времен уменьшился до 1.5-2.0 с. Эта величина определяет отклонение от единой модели в предположении, что изменение структуры, в первую очередь, контролируется расстоянием от оси глубоководного желоба.

Из представленной сводки выпадает годограф по профилю 4-о, расположенному в средней части Курильской дуги. Для остальных годографов ясно выделяется участок с заметным понижением кажущихся скоростей на удалениях от 50–60 до 70–80 км от оси глубоководного желоба. Использование осредненного годографа для начального приближения модели вместе с ранее полученными данными о скоростях и глубинах границ и результатами ОГТ и НСП позволило построить осредненную модель земной коры этой зоны (рис. 10, в) [Зверев, Полянский, 2008].



**Рис. 10.** Результаты подбора приближенной двумерной модели земной коры осевой части Курило-Камчатского желоба и его островного склона [Зверев, Полянский, 2008]

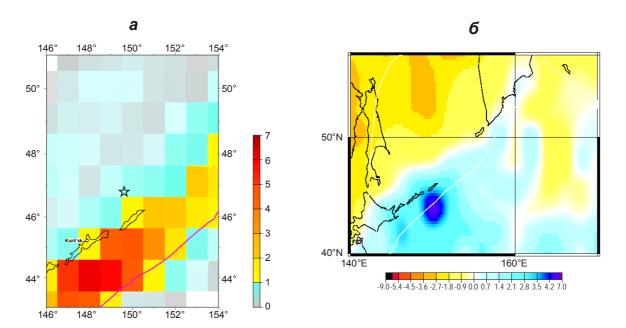
a — сводки годографов, приведенных по расстоянию к общему нулю,  $\delta$  — те же годографы в функции расстояния от оси желоба. Годографы для разных профилей и осредненный годограф для шести профилей ГСЗ, пересекающих желоб в разных местах (кроме района Средних Курил), обозначены разными символами;  $\epsilon$  — скоростная модель, построенная с максимальным использованием фактических данных ГСЗ, КМПВ и МОВ. Утолщенные линии — границы скачка скоростей, тонкие — изолинии скоростей в слоях

По поведению годографов и амплитуд сейсмических волн надежно определено положение глубинного разлома, выходящего на поверхность дна в верхней или средней части островного склона желоба. Приостровная часть разреза осадков и коры вплоть до края разлома характеризуется сложной, но упорядоченной слоистостью. Здесь отмечаются фрагменты сейсмических границ со скоростями 5.5-6.5 км/с, меняющиеся вдоль профиля. В целом же сохраняются условия, благоприятные для распространения на большие расстояния сейсмических волн от взрывов и пневматических источников. В зоне разлома разрез принципиально меняется. Понижение сейсмических скоростей, связанное с деформацией и разрушением толщ горных пород, приводит к затуханию волн от источников, расположенных до зоны разлома. Это объясняется образованием зон тени и фокусировки лучей, а также увеличением поглощения энергии. На участке от разлома до оси желоба в разрезе возрастает доля пород с пониженными скоростями (средние скорости понижаются до 2.8 км/с), хотя иногда сохраняются фрагменты границ со скоростями около 5 км/с. Структура осадков и верхов коры по данным ОГТ здесь весьма сложна, в целом хаотична и квазиоднородна (акустически прозрачна). Лежащая в основании этой толщи на глубинах 8-10 км устойчивая по глубине (~10 км) и скорости (~6.6 км/с) граница продолжает поверхность третьего слоя океанической коры. В приосевой части желоба в верхах разреза выделяется призма очень низкоскоростных пород (<2 км/с) и отмечается резкое увеличение глубины границы М, что трактуется в литературе как переход к континентальной коре. На океаническом склоне желоба толщина слоев и скорости в осадках и коре близки к типично океаническим, однако их глубина увеличена соответственно погружению морского дна. Поверхность фундамента разбита субвертикальными сбросами. На склоне отмечаются многочисленные слабые и слабейшие землетрясения. Все это фиксирует край океанической плиты, и, в принципе, где-то вблизи этого места начинается заметное проявление глубинных процессов, воздействующих на плиту и усиливающихся на океаническом склоне, в осевой части глубоководного желоба и на прилегающей части островного склона. Противоположный край этой гигантской структуры фиксирует границу с жестким островным блоком, на которой происходят сильнейшие землетрясения.

Рассмотрим совокупность имеющихся независимых данных для отличающейся самой высокой сейсмической активностью южной части Курильской дуги, которая наиболее подробно исследована различными методами. Выделенный по данным ГСЗ и ОГТ разлом отчетливо выражается в интенсивных магнитных аномалиях, простирающихся вдоль островов Итуруп и Уруп вплоть до пролива Буссоль. В гравитационном поле в редукции Фая в нижней части островного склона отмечается протяженный минимум со значениями, достигающими –300 мГл [Международный..., 2003; Тектоника..., 1980]. На батиметрических картах вблизи названных островов установлены самые большие для Курило-Камчатского желоба глубины, превышающие 9 км (максимум 9.593 км). Для остальных частей желоба глубины обычно на 2–3 км меньше [Международный..., 2003]. Эхолотные промеры свидетельствуют, что углы наклона океанического склона желоба в южной части дуги составляют 5–10° [Тектоника..., 1980].

Для количественной оценки современной сейсмической активности мы обратились к сведениям NEIC, представленным в Интернете. Использовались данные о среднем числе землетрясений с  $M \ge 5$ , происходящих в течение одного года на площади  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , что соответствует примерно 12.3 тыс. км². Схема, представленная на рис. 11, a, построена для всех очагов, независимо от их глубины. Аналогичная схема для очагов с глубиной менее 70 км от приведенной практически не отличается, что говорит о приуроченности активных сейсмогенных процессов к толще земной коры и подкоровой литосфере.

На рис. 11,  $\delta$  приведены результаты томографии по поверхностным волнам землетрясений [Barmin et al., 2001] (http://ciei.colorado.edu/~nshapiro/). На схеме, представляющей собой срез для глубины 80 км, локальный участок понижения скоростей



**Рис. 11.** Некоторые независимые данные о современной сейсмической активности района Южных Курил

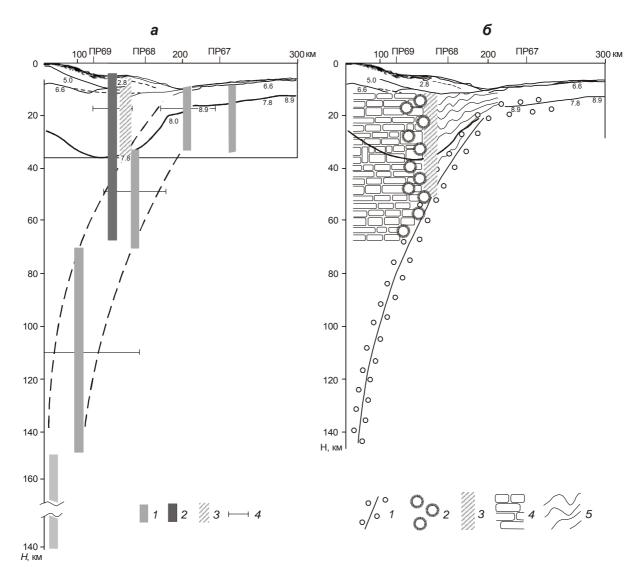
a — распределение числа землетрясений на единицу площади в исследуемом районе по данным NEIC (шкала — среднее число землетрясений в год);  $\delta$  — результаты томографии по поверхностным волнам землетрясений, показывающие отклонения скоростей поперечных волн в верхней мантии от модели АК 135 на глубинах 50–80 км

поперечных сейсмических волн относительно стандартной модели АК 135 (выделен синим цветом) приурочен к обсуждаемой части Курильской дуги. Одномерные томографические модели с разрешением  $2^{\circ}\times2^{\circ}$  демонстрируют существенное отклонение скоростей поперечных волн от принятых в модели для глубин от поверхности Мохоровичича до 100-120 км.

Таким образом, участок дуги у Южных Курил, имеющий повышенную сейсмическую активность, заметно отличается от прилегающих участков дуги большей глубиной желоба, некомпенсированными аномалиями силы тяжести, пониженными скоростями в низах коры и в подкоровой мантии.

Фактические данные для рассматриваемого района вынесены на схему, представленную на рис. 12, a. На упоминаемый ранее разрез земной коры, построенный по данным  $\Gamma$ C3 и ОГТ, нанесены скоростные параметры коры для Южных Курил, отмечен разломом, установленный по данным  $\Gamma$ C3 (наклонная штриховка). Разрез дополнен данными NEIC о положении очагов землетрясений с разными магнитудами за длительный период наблюдений в виде вертикальных полос, ограниченных по глубине снизу в соответствии с данными NEIC, а сверху глубиной моря. Полосы расположены примерно посередине области распространения соответствующих эпицентров; приблизительная ширина этой области также отмечена на разрезе. Заливка полос условно выражает магнитуды землетрясений: серая заливка соответствует M<7, черная – M  $\geq$ 7.

Можно предположить следующую картину развития событий в регионе. Изгиб океанической коры начинается у краевого вала, не доходя до оси глубоководного желоба, и сопровождается землетрясениями небольших магнитуд. На океаническом склоне и вблизи оси Курильского желоба глубины очагов слабых землетрясений располагаются в пределах низов коры и подкоровой литосферы (до 35 км). После пересечения оси желоба глубины очагов быстро растут в сторону подъема островного склона желоба – до 35–70 км у зоны разлома (субдукция?). Одновременно увеличивается глубина



**Рис. 12.** Положение очагов землетрясений в разрезе по линии профиля, проходящего от ложа океана до Южных Курильских островов

a — глубинный разрез, построенный по сейсмическим данным (цифры — скорости, км/с), l, 2 — области распространения очагов слабых (l) и сильных (l) землетрясений, l0 — разлом в коре, l4 — примерное ограничение распространения очагов по глубине; l6 — тот же разрез в схематизированном виде, демонстрирующий возможное взаимное положение очагов землетрясений: l7 — очаги слабых (l8) и сильных (l9) землетрясений, l8 — разлом в коре, l9 — консолидированный блок, l9 — деформированный блок

залегания поверхности Мохоровичича. На этом же участке склона в толще земной коры заметная сейсмическая активность не наблюдается, но сохраняется приуроченность очагов слабых землетрясений к самым низам коры и верхам подкоровой литосферы. Тенденция увеличения глубин слабых землетрясений с приближением к островам дуги продолжается за разломом; на верхней части склона глубины очагов достигают 70—150 км; последняя компактная группа очагов располагается под вулканическими островами дуги на глубинах 150—300 км.

Совсем другая картина наблюдается для сильных землетрясений. Подавляющее большинство эпицентров землетрясений с  $M \ge 7$  отмечено в середине островного склона дуги и приурочено к островному краю глубинного разлома. Полоса эпицентров сравнительно компактна (ширина 60–80 км), очаги располагаются на глубинах менее 50–70 км. Примерно здесь же происходит наибольшее количество землетрясений с M > 5.

Можно отметить хорошую согласованность результатов нашего изучения сейсмичности по данным *NEIC* с результатами, полученными ранее другими авторами. Так, в работах [*Klaeschen*, 1994; *Тараканов*, 2001] приведены разрезы, практически идентичные построенному нами по данным *NEIC*. Здесь уместно напомнить, что еще в 1972 г. при анализе результатов ГСЗ вблизи Камчатки нами отмечалось хорошее соответствие положения разломов, установленных по данным глубинного сейсмического зондирования, и очагов землетрясений, наблюдаемых в узкой полосе вдоль профиля ГСЗ [*Тулина*, Зверев, Красильщикова, 1972].

Рассмотренные фактические данные позволяют предположить, что природа слабых и сильных землетрясений принципиально различна. Слабые (и слабейшие) землетрясения возникают на краю океанической плиты при ее приближении к островной дуге (за счет конвекции?). Под воздействием глубинных факторов осевая часть Курильского желоба быстро погружается, достигая глубины почти 10 км. Слабая сейсмическая активность, приуроченная к низам земной коры, фиксируется сейсмологическими станциями, начиная с краевого вала и океанического склона желоба. Тектоническая активность выражается также в осложнениях структуры (небольших разломах) второго и третьего слоев океанической коры.

Сходные процессы продолжаются до оси желоба и прилегающей части его островного склона. На этом участке средние скорости в коре низки, очагов землетрясений мало. Здесь же начинается погружение поверхности Мохоровичича в сторону островного склона до глубин более 30 км, фиксируемых вблизи зоны разлома. Толща коры между осью желоба и разломом практически асейсмична. В сочетании с очевидным быстрым погружением морского дна, хаотической структурой и низкими скоростями сейсмических волн в разрезе это может свидетельствовать о нарушенности пород толщи земной коры и ее пластических деформациях при погружении. Очаги слабых землетрясений на этом участке погружаются в толщу коры, примерно следуя поведению поверхности Мохоровичича. За зоной разлома очаги смещаются ниже поверхности Мохоровичича и отмечаются уже без видимой связи со строением земной коры вплоть до островов дуги, где их глубина достигает 150–300 км.

Закономерности проявления сильных землетрясений совсем иные. Их очаги располагаются на небольшой глубине в толще коры и подкоровой литосферы. Эпицентры приурочены преимущественно к островному краю глубинного разлома, где происходит большое число сильных землетрясений, включая сильнейшие, и выделяется основное количество сейсмической энергии. Островной край разлома фиксирует окончание консолидированного приостровного блока земной коры, свойства которого благоприятны для распространения сейсмических волн от контролируемых источников. Вероятно, именно здесь накапливаются упругие напряжения, возникающие при погружении подкоровой толщи верхней мантии, маркируемой слабыми землетрясениями.

Соотношение положения очагов слабых и сильных землетрясений приведено на схематизированном разрезе, представленном на рис. 12,  $\delta$ .

Можно предположить, что сильнейшие землетрясения с очагами на глубинах менее 50–70 км, приуроченными к островному краю глубинного разлома, возникают по следующим причинам. Погружающиеся на островном склоне желоба и в зоне разлома деформированные пластичные породы под действием сил трения и сцепления увлекают за собой край жесткого блока коры, что приводит к изгибу его слоев, деформациям пород и накоплению упругих напряжений; деформации при этом направлены вниз. При достижении предельных напряжений происходит срыв, разрушение пород, а также разрядка накопленных напряжений и возвращение упругих слоев в положение равновесия.

Эти процессы направлены вверх, и механизм землетрясений может соответствовать взбросу. Возможно, при крупнейших событиях достижение равновесия будет происходить не за один акт, а в виде колебательного процесса, включающего несколько циклов.

Приведем несколько фактов, подтверждающих наши предположения. Так, в целом ряде работах Л.М. Балакиной рассматриваются результаты тщательного анализа многочисленных фактических данных о сейсмичности и механизмах очагов землетрясений островных дуг. В одной из работ Л.М. Балакина делает вывод, что для островного склона желоба "... преобладающие разрывы, генерирующие землетрясения в литосфере, – крутые взбросы, простирающиеся вдоль дуги и достигающие глубин в несколько десятков километров" [Балакина, 2002, с. 136].

Второй факт вытекает из анализа временной последовательности проявления землетрясений на небольших локальных участках сейсмоактивной зоны, выполненного В.Н. Вадковским (устное сообщение, ИФЗ, 2000 г.). Анализируя каталоги, этот автор установил, что на островном склоне Японского желоба очаги небольших по силе землетрясений на отдельных участках склона закономерно и последовательно смещаются вниз по вертикали; фокальная зона при этом состоит из отдельных (направленных вниз) локальных групп очагов слабых событий.

В заключение отметим, что помимо уточнения местоположения разломов в Курило-Камчатской зоне и анализа их связи с сейсмичностью региона, важным результатом выполненных исследований является обнаружение двух важных особенностей глубинного строения зоны. Первая из них – наличие в земной коре протяженной зоны пониженной скорости, расположенной по простиранию дуги под островным склоном желоба и его осевой частью. Ширина этой зоны меняется от 60 до 80-100 км, и она определяет траектории лучей и свойства сейсмических волн от взрывов ГСЗ. Вторая особенность состоит в том, что островной край отмеченной зоны пониженной скорости значительно отличается от разлома в его классическом представлении как контакта двух жестких блоков. Здесь наблюдается сочетание края консолидированного жесткого блока коры приостровной части дуги с зоной разлома шириной 10-20 км, сложенной сильно разрушенными породами, скорость в которых мала. К зоне разлома примыкают хаотически устроенные сложнодеформированные толщи, наблюдаемые под склоном вплоть до оси глубоководного желоба и проникающие по глубине до поверхности Мохоровичича. Эти толщи представлены пластичными породами коры, быстро опускающимися вместе с погружением глубоководного желоба. Взаимодействие этой толщи с консолидированным блоком приводит к возникновению сильнейших землетрясений.

Мы предполагаем, что протяженная область пониженных скоростей в коре, расположенная вдоль желоба, определяет траектории сейсмических волн не только от контролируемых источников, но и от природных – землетрясений. Учет ее влияния был бы полезен для оценки точности определения координат и глубин очагов землетрясений.

Намеченные закономерности строения крупных глубинных разломов — контакт жесткого блока с зоной сильно разрушенных пород и далее с протяженной областью деформированных толщ — желательно было бы рассмотреть в аспекте корректности применения к подобным моделям среды количественных оценок параметров сейсмичности, существующих в настоящее время.

#### Заключение

Данные, полученные в Курило-Камчатской зоне сейсмическими методами с контролируемыми источниками (ГСЗ, ОГТ), позволили на построенных ранее разрезах

земной коры наметить положение крупнейших глубинных разломов. В верхней (или средней части) островного склона расположен имеющий ширину 10–20 км главный разлом, представленный разрушенными породами с пониженными скоростями сейсмических волн. Этот разлом отделяет консолидированный островной блок земной коры, в котором хорошо распространяются сейсмические волны при ГСЗ, от деформированного блока склона и глубоководного желоба, которые отличаются сложным, иногда хаотическим строением земной коры, высоким поглощением энергии сейсмических волн и их пониженными скоростями.

На основании данных NEIC о сейсмичности Курило-Камчатской зоны можно говорить о наличии в ней землетрясений двух типов, к первому из которых относятся сравнительно слабые события с очагами, расположенными в низах коры под желобом и островным склоном. Под островами очаги погружаются на глубину до 150 км (субдукция). Второй тип — это сильнейшие землетрясения с очагами, расположенными на островном склоне желоба на глубинах менее 50–70 км и приуроченными к толще земной коры и подкоровой мантии. Положение очагов этих землетрясений в точности совпадает с установленными по данным  $\Gamma$ СЗ и ОГТ краем глубинного разлома и ограничением консолидированного блока коры.

В районе Южных Курил к островному краю разлома приурочено наибольшее количество сильнейших землетрясений с  $M \ge 7$ , произошедших с 1900 г.; этот район отличает и наибольшее число всех событий на единицу площади. Здесь же имеют место самые большие в Курильском желобе глубины океана ( $\sim 10$  км), некомпенсированный минимум гравитационных аномалий и протяженный максимум магнитных аномалий. При томографических построениях установлено понижение скоростей поперечных поверхностных волн от землетрясений с очагами на глубинах 80-120 км. Все это свидетельствует о глубоком заложении и сложном характере глубинных источников происходящих в районе тектонических процессов.

Проявления субдукции для дуги ограничены участком от оси глубоководного желоба до островов. В его пределах очаги землетрясений лежат в полосе, наклоненной примерно на 40– $50^{\circ}$  – на протяжении 100–140 км глубина очагов возрастает от 30 до 140–300 км. Очаги на глубинах более 300 км наблюдаются в тыловом бассейне и располагаются отдельно от очагов менее глубоких событий. Их эпицентры образуют изолированные протяженные группы, имеющие разное простирание в разных сегментах дуги.

Возможность возникновения цунами связана с наиболее сильными землетрясениями, очаги которых расположены в верхней части островного склона в коре и верхах мантии и приурочены к краю разлома. Точное положение края разлома может быть надежно определено по уже имеющимся данным ГСЗ, ОГТ, и частично НСП. Под осью Курильского желоба и прилегающей частью островного склона сильные землетрясения маловероятны, но здесь возможны цунамигенные оползни, которые могут возникнуть на крутых участках склона. Для средней части Курильской дуги картина может быть несколько иной, что связано с ее более сложной глубинной структурой.

Рассмотренные материалы наглядно демонстрируют недостатки распространенных в настоящее время способов представления результатов анализа фактических данных в терминах тектоники плит. Их отнесение к океанической или континентальной коре, субдукции, обдукции и т.п. выполняется на основе выделения каких-то отдельных локальных признаков разрезов, таких как толщина земной коры, наклоны границ, скорости сейсмических волн. При включении в обсуждение информации о внутреннем строении и точном расположении краев зон разломов становится наглядной существенная изменчивость картины по простиранию дуги, а также приуроченность зоны

высокой сейсмичности к активно погружающемуся на глубины более 9 км участку оси глубоководного желоба на юге дуги.

Отметим общие аспекты результатов, полученных для двух дуг, бывших объектами наших исследований, - Кипрской и Курильской. Детальные исследования ГСЗ и ОГТ в бассейне Леванта в Восточном Средиземноморье и их интегрированный анализ позволили выяснить ряд деталей строения зоны конвергенции структур глобального масштаба [Зверев, 2009, 2010], часть из которых обсуждалась выше. При этом в проявлении современных геологических процессов в бассейне Леванта и Курило-Камчатской зоне было найдено много общего. Так, блоки и разломы имеют близкие размеры, сходно их внутреннее строение и параметры, разломы приурочены к краям значительных поднятий и прогибов поверхности суши или дна моря и к зонам градиентов геофизических полей, отмечается связь разломов с сейсмичностью [Зверев, 2008, 2009]. Однако масштаб проявления отмеченных особенностей принципиально различен – на Кипрской дуге речь идет об участке длиной 60-70 км, на Курило-Камчатской подобные участки во много раз больше. Можно полагать, что рассматриваемый участок Кипрской дуги является пространственно уменьшенным и сжатым аналогом Курило-Камчатской. Отмечаемое сходство ряда особенностей в строении двух дуг может рассматриваться как свидетельство того, что природная реализация глубинных тектонических процессов оказывается одинаковой при их разных масштабах.

Хотелось бы отметить, что анализировались данные, полученные практически одновременно в геологическом масштабе времени. Исследования методами ГСЗ и ОГТ на Курильской дуге проведены во второй половине XX века; сведения о землетрясениях по каталогам NEIC относятся к периодам с 1900 по 2010 гг. (землетрясения с №7) и с 1990 по 2010 гг. (М<5-6). В это время максимальная сейсмическая активность в Курило-Камчатской зоне отмечалась у Южных Курильских островов вблизи югозападного окончания Курильской дуги и границы с Японской дугой. У о. Кипр ГСЗ и ОГТ также выполнялось в конце прошлого века, сейсмичность изучалась с перекрытием того же временного интервала. Постоянно действующая сейсмоактивная зона располагается у южного берега о. Кипр вблизи места пересечения ярко выраженной субширотной зоны разлома и субмеридианального сдвига, ограничивающего с запада структуры Кипрской дуги. Таким образом, в период наблюдений наиболее сейсмически активными оказались участки у краев крупнейших разломов в обоих регионах. Однако изменчивость сейсмической активности во времени очевидна, в связи с чем можно ожидать непредсказуемых проявлений сейсмичности.

Представленные результаты получены при максимальном использовании фактических материалов, благодаря чему они наименее искажены и точно привязаны к конкретным точкам и линиям наблюдений. Определены основные черты изменчивой структуры и параметров геологической среды в сложном районе. Полученные результаты позволяют сделать новый шаг в уточнении представлений о реальной структуре и механизмах процессов, происходящих на глубине, и перейти к созданию хорошо обоснованной интегрированной модели геологической среды. При этом для сопоставления новых результатов с многочисленными опубликованными представлениями нужно ясно понимать, на основании каких фактических материалов и в рамках каких предположений о модели среды сделаны соответствующие заключения.

Отдельные вопросы требуют дальнейшего специального исследования. Назовем некоторые из них. Это, например, оценка влияния установленных закономерностей строения Курило-Камчатской зоны на точность существующих сегодня способов определения положения очагов и определения параметров землетрясений. Неясна возможная природа не очень сильных землетрясений с очагами, расположенными между корой

28

и верхами мантии в круто погружающейся под острова зоне субдукции. Нужно попытаться понять природу сейсмической границы фундамента (V=6.7 км/с), пересекающей под островным склоном желоба область предполагаемых деформаций коры. Не до конца понятна природа границы со скоростью 6.7 км/с и границы Мохоровичича в океане, где наблюдения ГСЗ и ОГТ дают разные результаты.

Мы понимаем, что наши результаты затрагивают вопросы, давно изучаемые и обсуждаемые высококвалифицированными сейсмологами и геологами, владеющими большой и разнообразной информацией о землетрясениях и других явлениях. Наши результаты не дают ясного ответа на главный вопрос о природе и механизме тектонических процессов и вызывают многочисленные новые вопросы. В то же время, надежные результаты, получаемые сейсмологией с контролируемыми источниками, и их хорошая согласованность с независимыми фактическими данными других методов позволяют надеяться на достоверность сделанных выводов. Полученные результаты могут быть инструментом уточнения моделей структуры Земли и процессов, происходящих в ее недрах, и приближения этих моделей к сложной, изменчивой в пространстве и времени реальной структуре коры и верхней мантии.

#### Литература

- *Балакина Л.М.* Субдукция и механизм очагов землетрясений // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ИФЗ РАН, 2002. С.120–141.
- *Береснев А.Ф., Удинцев Г.Б., Морозов Ю.Н. и др.* Строение осадочного чехла и акустического фундамента по данным НСП // Строение дна Охотского моря. М.: Наука, 1981. С.19–45.
- *Болдырев С.А.* Сейсмогеодинамика Срединно-Атлантического хребта. М.: Нац. геофиз. комитет РФ, 1998. 126 с.
- *Бондаренко Б.А., Гаркаленко И.А., Журавлев А.В. и др.* Новые данные о строении земной коры Курило-Камчатского желоба // Докл. АН СССР. 1977. Т. 234, № 1. С.135-137.
- Бондаренко Б.А., Гаркаленко И.А., Пустильников М.Р. и др. Геологическое строение отдельных регионов Охотского моря по данным МОВ-ОГТ // Строение дна Охотского моря. М.: Наука, 1981. С.46–59.
- Вейцман Л.С. Северо-восточная часть Курило-Камчатской зоны Тихого океана // Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану. М.: Наука, 1964. C.229-263.
- Глубинное сейсмическое зондирование земной коры Сахалино–Хоккайдо–Приморской зоны / Ред. С.М. Зверев, Ю.В. Тулина. М.: Наука, 1971. 286 с.
- *Ермаков В.А.* Особенности развития активной континентальной окраины (на примере Курило-Камчатского региона) // Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы. М.: ИФЗ РАН, 2002. С.158–188.
- Зверев С.М. Мониторинг донных сейсмических шумов в Южной Атлантике // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С.62–85.
- Зверев С.М. Морские исследования методом ГСЗ: от подкоровой литосферы до разломов коры // Очерки геофизических исследований: К 75-летию ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С.142–148.
- Зверев С.М. Внутреннее строение зон активных разломов по данным ГСЗ на примерах Кипрской и Курило-Камчатской дуг // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 2. С.234–238.
- Зверев С.М. Активные разломы в зоне конвергенции: внутреннее строение, сейсмичность // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. М.: ИФЗ РАН, 2009. Т. 2. С.27–33.
- Зверев С.М. Блоки и разломы земной коры бассейна Леванта: результаты ГСЗ в рейсах НИС РАН "Академик Борис Петров" и "Академик Николай Страхов". М.: Светоч Плюс, 2010. 224 с.
- Зверев С.М., Капустян Н.К. Сейсмические исследования литосферы Тихого океана. М.: Наука, 1980. 207 с.

- Зверев С.М., Полянский М.Е. Вариации структуры вдоль Курило-Камчатского желоба и возможная связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2008. № 1. С.3–18.
- Международный геолого-геофизический атлас Тихого океана / Гл. ред. Г.Б. Удинцев. М.; СПб.: МОК, 2003. С.160.
- *Морозов Ю.А.* Структурообразующая роль транспрессии и транстенсии // Геотектоника. 2002. № 6. С.3–28.
- Сергеев К.Ф., Аносов Г.И., Аргентов В.В., Петров А.В. Новые данные о глубинном строении земной коры центральной части Курило-Камчатской островной системы // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302, № 4. С.937–941.
- Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану / Ред. Е.И. Гальперин, И.П. Косминская. М.: Наука, 1964. 308 с.
- Строение дна Охотского моря / Ред. В.В. Белоусов, Г.Б. Удинцев. М.: Наука, 1981. 175 с.
- *Суворов А.А.* Глубинное строение земной коры Южно-Охотского сектора по сейсмическим данным. Новосибирск: Наука, 1975. 103 с.
- Тектоника Курило-Камчатского глубоководного желоба / Ред. П.М. Сычев. М.: Наука, 1980. 180 с.
- *Тараканов Р.3.* Обобщенная скоростная модель зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. Хабаровск, 2001. С.72—74
- *Тулина Ю.В.* Особенности волновых полей и глубинного строения земной коры разных типов и участков их сочленения на примере дальневосточной переходной зоны / Тулина Ю.В., Ярошевская Г.А. Внутренняя структура земной коры. М.: Наука, 1976. С.5–73.
- *Тулина Ю.В., Миронова В.И.* Южный и центральный участки Прикурильской зоны Тихого океана // Строение земной коры в области перехода от Азиатского континента к Тихому океану. М.: Наука, 1964. С.190–228.
- *Тулина Ю.В., Зверев С.М., Красильщикова Г.А.* Земная кора и верхи мантии в области фокальной зоны у восточной Камчатки // Сейсмические свойства границы М. М.: Наука, 1972. С.66–79.
- *Тулина Ю.В., Косминская И.П., Пустильников М.Р., Кара В.И.* Новые представления о глубинном строении Курило-Камчатской системы дуга желоб на основе сопоставления данных ГСЗ и МОВ // Строение дна Охотского моря. М.: Наука, 1981. С.60–77.
- Удинцев Г.Б. Магеллановы облака (Очерки истории исследований дна океана). СПб., 2009. 492 с.
- Фон Хюне Р., Суехиро К. Северная часть Японского желоба // Международный геологогеофизический атлас Тихого океана / Гл. ред. Г.Б. Удинцев. М.; СПб.: МОК, 2003. С.158.
- Barmin M.P., Ritzwoller M.H., Levshin A.L. A fast and reliable method for surface wave tomography // Pageoph. 2001. V. 158. P.195–205.
- Klaeschen D., Belykh I., Gnibidenko H., Patrikeyev S., von Huene R. Structure of the Kuril Trench from seismic reflection records // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N B12. P.24, 173–24, 188.

#### Сведения об авторе

**ЗВЕРЕВ Сергей Митрофанович** (1927–2011) – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

# DEEP FAULTS AND SEISMICITY OF KURILE-KAMCHATKA ZONE

S.M. Zverev

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** The results of Earth crust depth structure studies in Kurile-Kamchatka zone performed by DSS and CDP seismic methods with the data on seismicity from NEIC sites are compared. The data comparison shows the confinement of the strongest earthquakes foci to the island-arc slope of the oceanic trench and to the depth down to 100 km. Smaller earthquakes are registered under oceanic slope of the trench; under the island-arc slope of the trench earthquakes foci descend along the base of the crust as deep as 30 km; approaching South Kurile Islands their depth reaches 100 km.

Independent DSS and CDP data indicate at the depth close to the Islands the presence of complex structured layers, favorable for seismic-wave propagation. Moving away from the Islands these layers give place to other ones, characterized by chaotic structure and lower seismic-wave velocity; numerous earthquakes foci are situated within these layers.

For discussion there is proposed a model of tectonic processes, based on detailed analysis of the crust structure and mechanisms of known earthquakes, according to which the plastic rocks submerging under the island-arc slope entrain an edge of the stronger rock block. This leads to accumulation of elastic deformations which sporadically discharge as shift events with upward displacements forming thrusts.

**Keywords**: Kurile-Kamchatka zone, DSS and CDP seismic methods, NEIC, seismicity, blocks of Earth crust, faults, oceanic trench, subduction, creep, deformation, discharge, thrusts.