

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАСЩЕПЛЕННЫХ S-ВОЛН ОТ МЕСТНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ КАМЧАТКИ И ХОККАЙДО

М.Н. Лунева

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, margo@itig.as.khb.ru

Введение

Современные сейсмологические и геодезические исследования в динамически активных зонах субдукции свидетельствуют о неоднородном распределении физических свойств вдоль островных дуг и с увеличением глубины погружения плиты. Исследования закономерности распределения слабых и сильных землетрясений, миграции крупных землетрясений в пространстве и во времени указывают на их взаимосвязь с изменением напряжений/деформаций в области погружающейся плиты. Данные сейсмических моментов землетрясений дают важную информацию об ориентации и соотношении главных осей напряжений. В то же время фокальные механизмы определяются в основном для крупных землетрясений ($M > 4$), количество которых незначительно для изучения временных изменений напряженного состояния среды и которые отражают более крупный по масштабу процесс деформирования среды. Исследования анизотропии среды на основе эффекта расщепления поперечной волны от слабых местных землетрясений и далеких землетрясений дают дополнительную информацию о направленности деформаций геоматериала в области литосферы. В динамически активных областях, где напряженное состояние в общем случае отлично от гидростатического, анизотропия среды индуцируется напряжением, тензор которого имеет симметрию эллипсоида. Параметры расщепленных волн – азимут поляризации быстрой S-волны (φ) и время задержки между поперечными волнами, нормализованными на гипоцентральное расстояние (δt_{SS}) – чувствительны к физическому состоянию среды и его изменению (уровень, ориентация, соотношение главных осей напряжений, термодинамика, газо/водо/флюидонасыщенность). Это дает возможность изучения мелкомасштабных деформаций для лучшего понимания динамических процессов и свойств среды с глубиной. В то же время зависимость параметров расщепленных S-волн от направления распространения и пространственной неоднородности физических свойств среды требует более детального анализа данных в пространстве и во времени. Данная работа посвящена изучению сейсмической анизотропии и распределения параметров расщепленных S-волн в пространстве и во времени за многолетний период в области Камчатки и Хоккайдо.

Результаты

Анализ распределения параметров расщепленных S-волны от местных, слабых землетрясений до глубины 200 км в области станции PET IRIS (г. Петропавловск Камчатский) за период 1993-2002 гг. и в области 6 станций вдоль восточного Хоккайдо до глубины 100 км за период 1998-2003 гг. свидетельствует о неоднородном распределении анизотропных свойств среды в пространстве и изменении волновых параметров во времени.

На рис.1 представлены распределения азимутов поляризации быстрой S-волны и повышенных времен задержки между S-волнами вдоль профиля, ориентированного вкост простирания Камчатской дуги. По характеру поведения параметров расщепленных волн выделено 3 временных интервала 1993-1995, 1996-1998, 1999-2002 гг. В период 1996-1998 гг., включающий стадии подготовки и релаксации Кроноцкого землетрясения ($M=7.8$, 05.12.1997), наблюдается наибольшая степень упорядоченности в ориентации φ с глубиной. Азимуты быстрой волны ориентируются преимущественно вдоль В-ЮВ направлений для событий с глубины меньше 120 км. Для событий с больших глубин отмечается различие в ориентации азимутов быстрой волны – в области верхней

границы сейсмофокальной зоны φ ориентируются вдоль северных направлений, а в области нижней границы – вдоль восточных направлений.

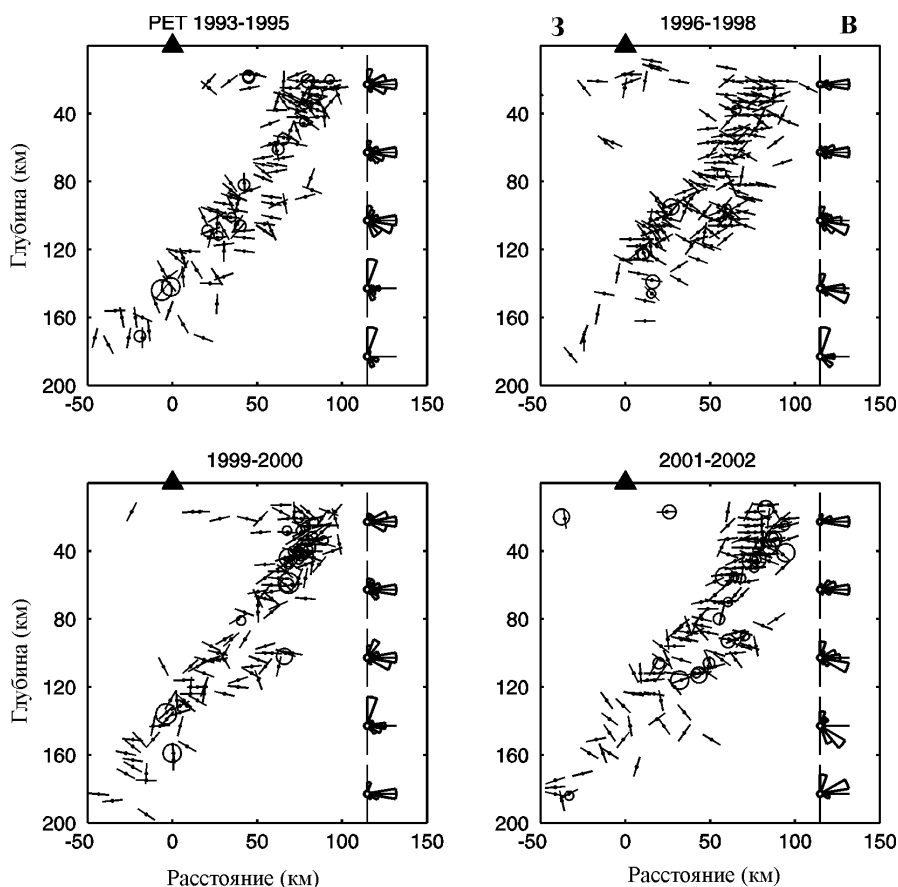


Рис. 1 Распределение азимутов быстрой S -волны и повышенных времен задержки δt_{SS} (10-21 мс/км) от событий для 4-х интервалов времени. Данные отнесены к гипоцентрам событий, спроектированы на глубинный разрез в направлении 125° от севера. Азимут поляризации отображается отрезком прямой, повернутым от вертикали на угол равный значению азимута. Кружки показывают локализацию повышенных времен задержки, размер кружков пропорционален δt_{SS} . Справа – розы-диаграммы азимутов быстрой S -волны от событий в интервалах глубин: 0-40, 41-80, 81-120, 121-160, 161-200 км.

В целом наиболее устойчивое поведение φ вдоль восточных направлений, согласующихся с движением Тихоокеанской плиты, отмечается для глубин событий до 60 км. В интервале глубин событий 60-90 км φ доминируют в восточных направлениях в период 1993-1998 гг., а с 1999 г. начинают развиваться вдоль СВ направлений, которые в 2001-2002 гг. становятся доминирующими. Азимуты быстрой волны от событий с глубины 90-120 км ориентируются преимущественно в интервале $80-130^\circ$, но выделяется и аномальная часть азимутов субортогональных направлений. Повышенные δt_{SS} локализуются преимущественно в области верхней границы фокальной зоны в 1993-1995 гг. и в области нижней границы в 2001-2002 гг. Неустойчивое поведение φ характерно для глубин больше 120 км, где φ развиваются преимущественно в двух субортогональных направлениях В-З и С-Ю. В 1993-1995 гг. преобладают φ вдоль простирания Камчатского желоба (С-ССВ). В 1999-2000 гг. азимуты быстрой волны от событий с глубины 130-150 км ориентируются вдоль С-СВ направлений, а в 2001-2002 гг. – вдоль ЮВ направлений. С 1999 г. φ от более глубоких событий (> 150 км) ориентируются преимущественно вдоль восточных направлений.

Время задержки между S -волнами отражает степень анизотропии среды, уровень напряженного состояния. Анализ изменения δt_{SS} в пространстве и во времени свидетельствует об изменении напряженного состояния среды вдоль направления погружения субдуктирующей плиты (рис. 2). В период 1993-1995 гг. повышенные δt_{SS} локализуются в трех глубинных интервалах: максимальные δt_{SS} – на глубине 130-145 км, повышенные δt_{SS} – в интервалах глубин 105-115 км и 20-60 км. В 1995 наблюдается постепенная миграция δt_{SS} с увеличением глубины событий от 20 км до 60 км. В 1996-1998 гг. количество событий с повышенными значениями δt_{SS} минимально. С 1996 г. и ко времени Кроноцкого землетрясения отмечается продвижение δt_{SS} вверх с глубины 140 км к 80 км. С 1999 г. количество повышенных δt_{SS} резко увеличивается от событий в интервалах глубин 20-60 и 90-150 км. Выделяются 2 цикла миграции δt_{SS} в периоды 1999 - начало 2000 г. и 2001-2002 гг. Миграция δt_{SS} направлена вниз от 20 км к 60 км и от 110 км к 120-160 км, а также в обратном направлении – от 100 км к 40 км. Миграция δt_{SS} в периоды 1995 г. и 1999-2002 гг. относится к одной области, расположенной на юго-востоке от РЕТ. При этом миграция δt_{SS} происходит с погружением в СВ направлении. Необходимо отметить, что периоды нарастания δt_{SS} согласуются со временем происхождения сильных землетрясений в регионе и внутри области исследований. Предполагается, что максимальные δt_{SS} , области миграции δt_{SS} локализуются преимущественно вдоль контактов между жесткими и ослабленным блоками. К устойчивым областям с доминированием азимутов быстрой волны вдоль восточных направлений отнесены центральный блок до глубины 120 км и область вдоль нижней границы сейсмофокальной зоны.

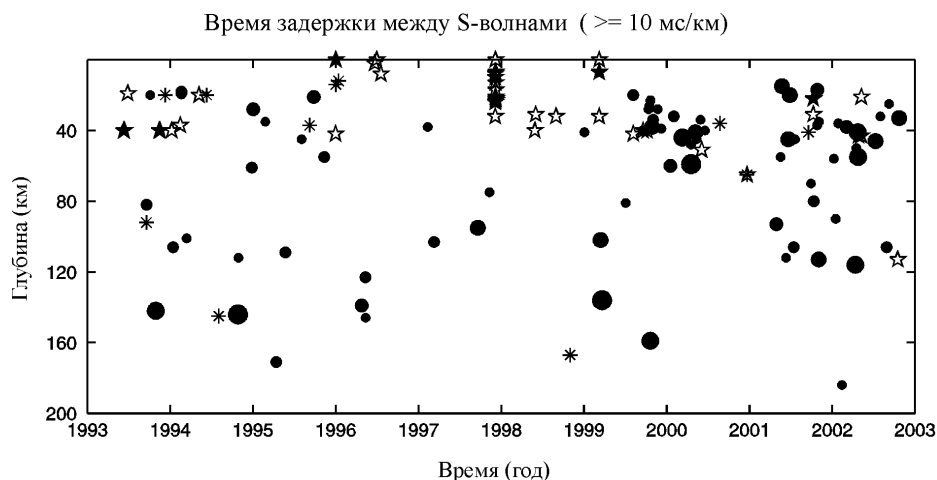


Рис. 2 Распределение повышенных нормализованных времен задержки между S -волнами (10-21 мс/км) по глубине и во времени. Времена задержки отнесены к гипоцентрам и времени происхождения событий (залитые кружки, размер пропорционален δt_{SS}). Звездочки – гипоцентры крупных землетрясений ($K \geq 13$) в радиусе 400 км от РЕТ. Залитые звездочки – землетрясения с $K \geq 14$. Астериск – землетрясения внутри области исследования ($K = 12-13$).

На рис. 3 показано распределение параметров расщепленных S -волн вдоль восточного Хоккайдо в области шести станций. На разрезах наблюдается мозаичный характер в ориентации φ вдоль Хоккайдо и по глубине, но в то же время выделяются СВ и ЮВ области. В северо-восточной области доминируют φ вдоль желоба, а в юго-восточной – поперек желоба. Граница между областями располагается в области станции URH. Наиболее сложная картина ориентации φ

отмечается для событий с глубин 45-90 км. Азимуты быстрой волны от событий с глубины больше 90 км преимущественно ориентируются вдоль направления погружения плиты.

Наиболее стабильное поведение φ во времени наблюдается на равнинах Токачи (IWN, URH) и Кусиро (АКК). Под равниной Кусиро φ ориентированы вдоль $50-70^\circ$ (СВВ) и согласуются с направлением миграции фронта Курильской дуги вдоль желоба. На равнине Токачи под IWN азимуты доминируют в С-ССВ направлениях и под URH в ЮВ направлениях, которые согласуются с нормальным и параллельным направлениями движения Тихоокеанской плиты, соответственно. Сложное распределение φ за период 1998-2003 гг. и по годам отмечается в области гор Хидака (ERM, MYR) и п-ове Немуро (NMR). Максимальные коэффициенты анизотропии достигают значений 12, 8, 5, 6, 6.5 и 7.8 (%) под станциями ERM, MYR, IWN, URH, АКК и NMR, соответственно.

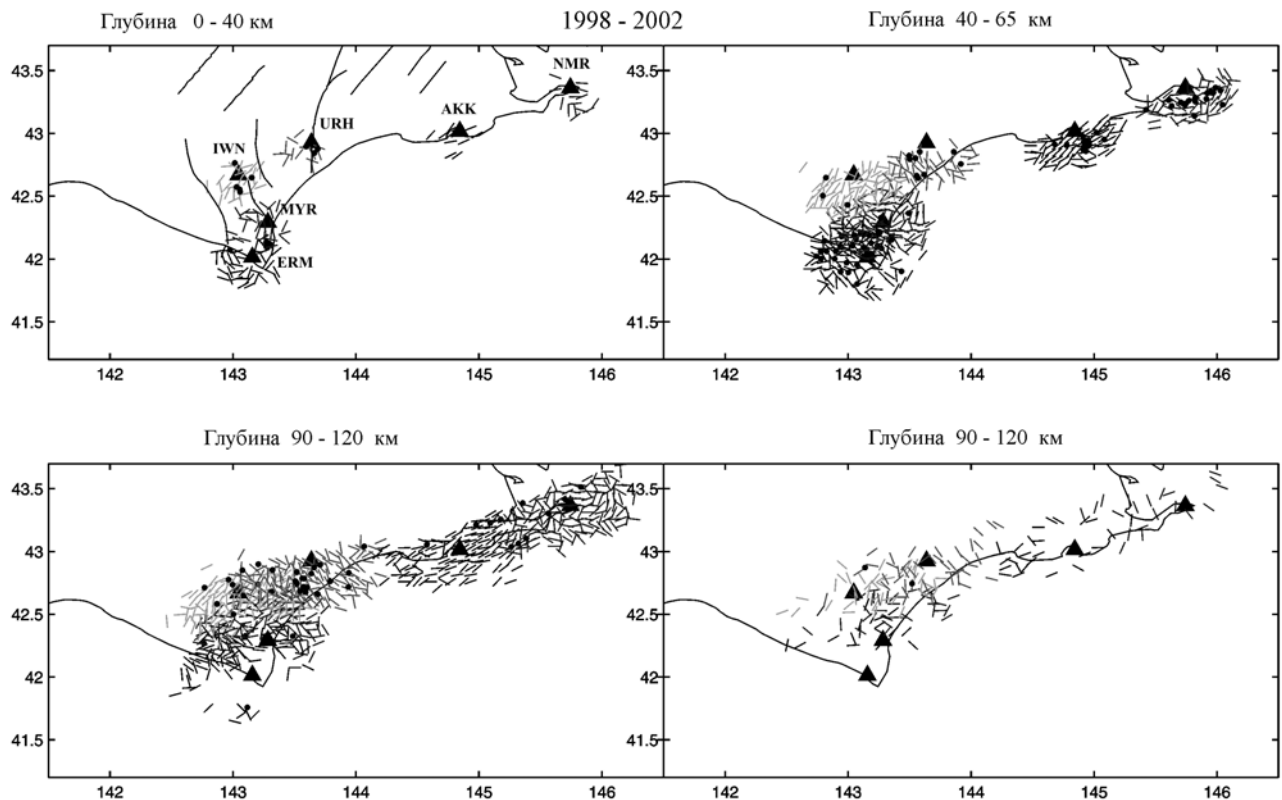


Рис. 3 Распределение азимутов быстрой S -волны от событий для 4-х глубинных интервалов за период 1998-2002 г. Азимуты быстрой S -волны усреднены по сетке с шагом 0.09° . Азимут отображается отрезком прямой, повернутым от севера на угол равный значению азимута. Кружки показывают локализацию повышенных δt_{SS} (> 10 мс/км). Времена задержки отнесены к гипоцентрам событий.

Результаты исследований параметров сейсмических волн от кластеров местных, слабых землетрясений, расположенных в области верхней границы сейсмофокальной зоны на глубине 40-60 км и 70-90 км вдоль восточного Хоккайдо за период 1998-2003 гг. свидетельствуют о чувствительности параметров расщепленных волн к изменению напряженно-деформированного состояния среды (Рис. 4). Наблюдаются значительные различия в поведении волновых параметров в зависимости от положения станции и глубины событий кластера. В то же время проявляется корреляция аномального поведения параметров расщепленных S -волн от событий кластеров в области разных станций и их взаимосвязь со временем происхождения крупных землетрясений вокруг Хоккайдо. Неустойчивое поведение параметров расщепленных S -волн и повышенные значения V_p/V_s от кластеров событий в области Хидака гор и п-ва Немуро указывают на то, что среда находится в механически ослабленном состоянии, режиме активного дилатансионного

деформирования. Напротив, области под равнинами Токачи и Куширо являются более жесткими, характеризуются более низкими значениями V_P/V_S и сравнительно устойчивым поведением параметров волн. Наблюдаемые изменения в отношении амплитуд P - и S -волн указывают на изменение типа фокального механизма, жесткости среды в области кластеров землетрясений во времени. Временные вариации параметров волн от кластеров землетрясений вдоль восточного Хоккайдо свидетельствуют об их взаимосвязи с изменением напряженно-деформированного состояния среды, флюидодинамикой в локальной области вокруг станций, а также и в более широкой зоне субдукции.

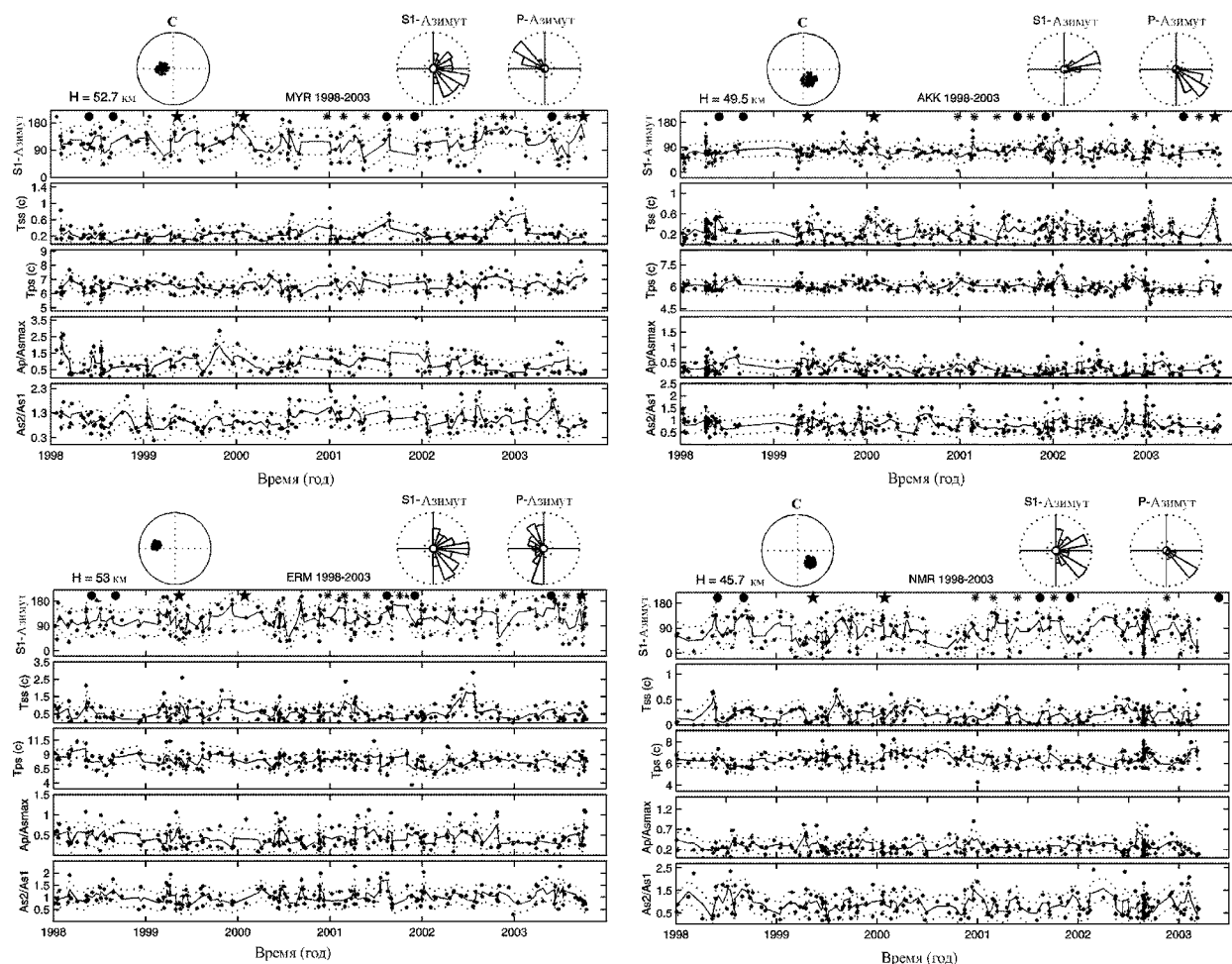


Рис. 4 Временные изменения волновых параметров от кластера событий в области станций вдоль Хоккайдо за период 1998-2003 гг. Верхний ряд: полярная проекция положения событий кластера относительно станции и средняя глубина событий, розы-диаграммы азимутов поляризации быстрой S - и P -волн. Обозначения: $S1$ -Азимут – азимут быстрой S -волны; T_{ss} – время задержки между S -волнами; T_{ps} – время задержки между P - и быстрой S -волнами; A_p / A_{S1} , A_{S2} / A_{S1} – отношения амплитуд P -и S -волн. Знак звезды, круга и астериска фиксирует время происхождения сильных землетрясений ($M \geq 6$) в области Хоккайдо, Хонсю и Курилы-Охотское море, соответственно.

Автор благодарна КФ ГС РАН и Институту сейсмологии и вулканологии, Университета Хоккайдо за предоставление сейсмических данных. Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №16 «Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы» и Президиума ДВО РАН (гранты №06-I-П16-061, №06-III-A-08-346) и РФФИ (грант № 06-05-96009).