Сейсмическая анизотропия и пространственное распределение параметров расщепленных волн от местных землетрясений вдоль восточной части острова Хоккайдо

М.Н. Лунева

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия

Представлены результаты исследования пространственно-временно́го распределения параметров расщепленных S-волн от местных слабых землетрясений в диапазоне глубин 20–120 км за период 1998–2003 гг. в области 6 станций вдоль восточной части острова Хоккайдо. Результаты свидетельствует о зональности в распределении анизотропных свойств среды с глубиной и вдоль Хоккайдо и чувствительности параметров расщепленных волн (азимут быстрой S-волны, время задержки между S-волнами) к изменению деформированного состояния среды. Неустойчивое поведение параметров S-волн в пространстве и во времени в области гор Хидака и полуострова Немуро указывают на то, что среда находится в механически ослабленном состоянии — режиме активного деформирования. Напротив, области под равнинами Токачи и Кусиро являются более жесткими — характеризуются более низкими значениями коэффициента анизотропии, отношения скоростей V_P/V_S и более устойчивым поведением параметров волн.

Seismic anisotropy and spatial distribution of splitting parameters of local earthquakes along Eastern Hokkaido

M.N. Luneva

Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, 680000, Russia

The spatio-temporal distribution of split S-wave parameters of weak local earthquakes (from 1998 to 2003) in the depth range 20–120 km has been studied near 6 stations along the eastern part of Hokkaido. The results indicate that the distribution of anisotropy properties of the medium with depth and along Hokkaido is zonal and the split wave parameters (fast S-wave azimuth, time gap between S-waves) are sensitive to the strain state changes. The unstable spatio-temporal behavior of the S-wave parameters in the Hidaka and Nemuro areas points to the mechanical weakening and active deformation that take place in the medium. Contrarily, the regions beneath the Tokachi and Kushiro planes are more rigid. They exhibit lower anisotropy coefficients, velocity ratios V_P/V_S and more stable wave parameters.

1. Введение

Различные сейсмологические методы активно применяются для изучения изменения напряженно-деформированного состояния среды в пространстве и во времени в динамически активных зонах субдукции, к которым относится и Курило-Камчатская островная дуга. Сейсмическая активность в этих областях распределена достаточно неоднородно в пространстве и во времени, включая слабые, сильные и медленные землетрясения. К настоящему времени предложен ряд моделей физических процессов, протекающих в зонах субдукции, а также моделей подготовки и происхождения сильных землетрясений. Выбор той или иной модели физического процесса зависит от экспериментальных исследований деформаций на основе геодезического, деформометрического и сейсмологического мониторинга в динамически активных областях. В рамках сейсмологии оценки напряженного состояния среды и характера деформаций могут быть получены при определении анизотропных свойств среды на основе эффекта расщепления поперечной волны от землетрясений. Основными параметрами расщепленных волн от слабых местных землетрясений являются азимут поляризации быстрой S-волны φ и время задержки δt_{SS} между расщеп-

© Лунева М.Н., 2008

ленными S-волнами, нормализованное на гипоцентральное расстояние. Различные теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о существовании взаимосвязи: деформация – упорядоченность микроэлементов среды в пространстве – анизотропия – ориентация азимута поляризации быстрой S-волны [1–11].

Данная работа представляет результаты исследования пространственно-временно́го распределения параметров расщепленных S-волн от местных слабых землетрясений в диапазоне глубин 20–120 км за период 1998–2003 гг. в области 6 станций вдоль восточной части острова Хоккайдо. Период исследования включает сильное землетрясение Токачи-оки (26.09.2003 г., $M = 8.0$), которое произошло на юго-востоке от Хоккайдо на глубине 29 км и определено по данным сейсмологической сети [12] как пологий надвиг с углами падения, простирания и скольжения — 16°, 246° и 124° соответственно. Остров Хоккайдо принадлежит южной части Курильской дуги, в области которой Тихоокеанская плита движется в северо-западном направлении 63° со скоростью ~83 мм/год. Миграция фронта Курильской дуги в юго-западном направлении со скоростью 6–11 мм/год [13] привела к коллизии с Японской дугой и образованию горной системы Хидака [14]. Повышенная сейсмичность, надвиговые смещения, параллельные желобу, и левосторонние сдвиги, наблюдаемые в зоне коллизии Хидака на юго-востоке Хоккайдо, связаны с поднятием в области передового края Курильской дуги. По данным распределения гипоцентров землетрясений вдоль острова Хоккайдо [15], угол наклона верхней границы сейсмофокальной зоны изменяется от 20° до 30° со стороны Японской дуги и далее до 40° и 50° к северу вдоль Курильской дуги (143°–144° в.д.). Значительное искривление поверхности сейсмофокальной зоны, как следствие сочленения двух дуг, может быть связано с растяжением или разрывом субдуктирующей плиты с глубиной [16].

2. Данные и методика исследований

В исследовании использовались сейсмические записи слабых местных землетрясений ($M < 3.5$), зарегистрированные станциями ERM, MYR, IWN, URH, AKK, NMR за период с 1 января 1998 г. по 15 октября 2003 г. Отсутствуют записи станции NMR с 26.03.2003 г. Для исследования после обработки данных выбрано 7347 записей событий. Станции принадлежат сейсмологической сети Института сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо. Станции ERM и MYR расположены в области гор Хидака, на противоположных сторонах хребта Хидака. Станции IWN и URH установлены на равнине Токачи, а AKK и NMR — на равнине Кусиро и полуострове Немуро соответственно. На рис. 1 показано положение станций вдоль восточной части острова Хоккайдо и эпицентров сильнейших землетрясений ($M > 6$), происходивших в каждый год в период 1998–2003 гг. в области острова Хоккайдо. Три крупных землетрясения произошли непосредственно в восточной части острова Хоккайдо — под равниной Токачи близ станции URH (13.05.1999 г., $M = 6.4$, $H = 103.5$ км), в акватории полуострова Немуро (28.01.2000 г., $M = 6.8$, $H = 55.6$ км) и землетрясение Токачи-оки (26.09.2003 г., $M = 8.0$).

Для исследования выбраны землетрясения с эпицентральным расстоянием меньше глубины гипоцентра и докритическими углами выхода Р-волны. Использовались сейсмические трехкомпонентные цифровые записи с одинаковыми динамическими характеристиками каналов и шагом дискретизации 10 мс. Для улучшения качества записи проводилась фильтрация с применением фильтра Баттерворта 6-го порядка в полосе частот 1–18 Гц. Для ряда записей при усилении низкочастотных помех нижняя частота повышалась до 2 Гц, при усилении высокочастотных помех или для улучшения качества сигналов верхняя частота опускалась до 8–15 Гц. При обработке сейсмических записей предполагалось, что прямые продольная (Р) и поперечные быстрая (S_1) и медленная (S_2) волны, распространяющиеся от источника, имеют максимальные амплитуды и их векторы поляризации взаимно ортогональны. Определение прямых волн, измерение их кинематических и динамических параметров проводилось на основе методов поляризационного и статистического анализа [17–19], позволяющих наиболее точно определять такие волновые характеристики, как вектор поляризации, амплитуда, степень линейности, степень ортогональности волн, время прихода, время задержки между волнами. Ошибка измерения направления поляризации волны

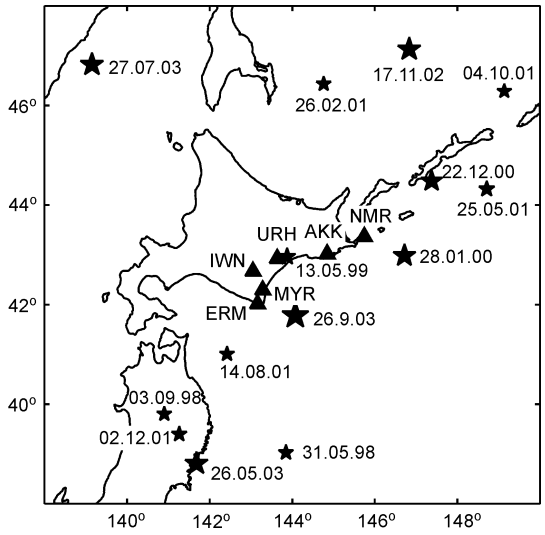

Рис. 1. Положение сейсмических станций и эпицентров сильнейших землетрясений ($M > 6$) в области о. Хоккайдо в период 1998–2003 гг.: ▲ — местоположение станций, ★ — эпицентры землетрясений. Размер звезды пропорционален магнитуде землетрясения

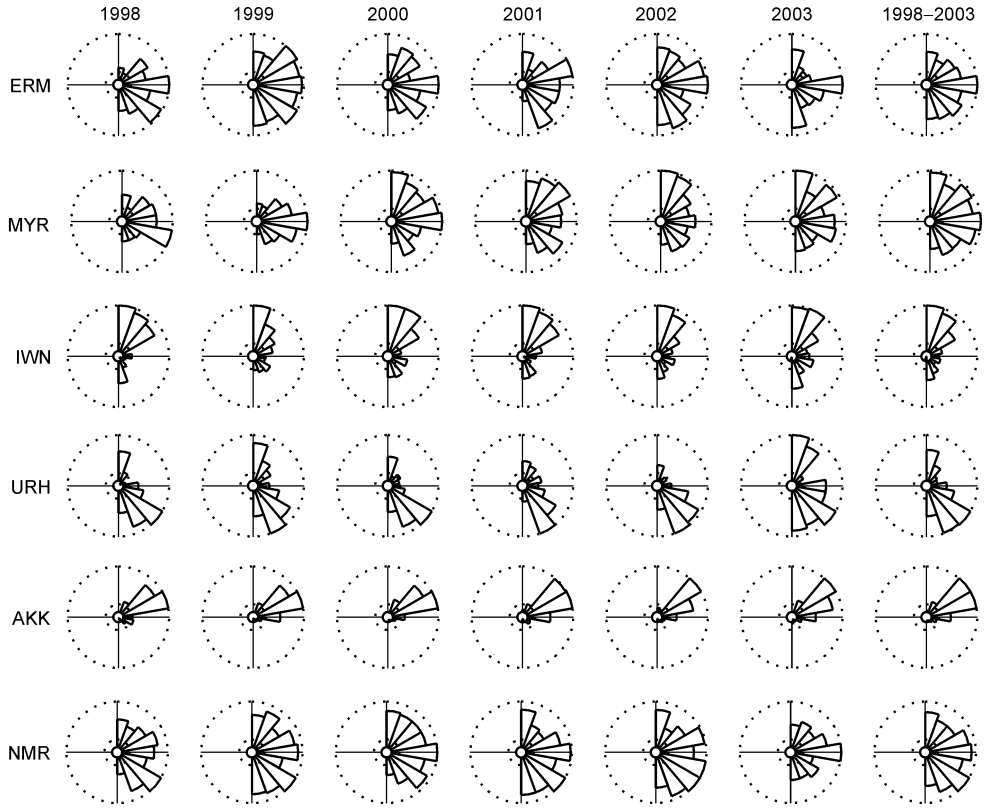

Рис. 2. Роза-диаграммы наблюденных азимутов быстрой S-волны по годам и за период 1998–2003 гг. под станциями, расположенными вдоль восточного Хоккайдо

оценивается с точностью 10°–20°. Точность измерения направления вектора поляризации волны оценивается количественно через соотношение осей эллипсоида поляризации для выбранных волновых фаз. Средняя точность времен задержки между поперечными волнами t_{SS} оценивается в пределах 0.03 с на основе вычисления функций взаимной корреляции.

3. Результаты

На рис. 2 представлено частотное распределение измеренных азимутов поляризации быстрой S-волны φ в области станций вдоль восточной части острова Хоккайдо по годам и за период 1998–2003 гг. Доминирующие значения φ изменяются от станции к станции. Наиболее плотное распределение азимутов быстрой S-волны наблюдается на равнинах Токачи и Кусиро. Под равниной Кусиро (станция AKK) азимуты быстрой S-волны направлены вдоль 50°–70° (северо-восток–восток) параллельно желобу. На равнине Токачи азимуты доминируют в направлениях север–северо-восток под станцией IWN и в направлениях юго-восток под URH, которые согласуются с нормальным и параллельным направлениями движения Тихоокеанской плиты. Около 30 % азимутов быстрой волны под IWN и URH имеют субортогональные направления по отношению к доминирующим направлениям φ. Сложное распределение азимутов быстрой волны с доминированием направлений восток–юго-восток отмечается в области гор Хидака и полуострова Немуро, с которыми связаны наиболее сильные землетрясения надвигового типа, зафиксированные в инструментальный период — Токачи-оки (1952 г., M = 8.2), Токачи-оки (1968 г., M = 6.9), Токачи-оки (2003 г., M = 8.0), Немуро-оки (1894 г., M = 8.3), Немуро-оки (1973 г., M = 7.4). В то же время в этих областях обнаружена зависимость ориентации φ от глубины событий и времени. Измеренные значения времени задержки между расщепленными S-волнами t_{SS} изменяются до 3 с под восточной частью острова Хоккайдо, хотя в среднем t_{SS} не превышают 0.5 с (рис. 3). Максимальные значения t_{SS} наблюдаются в области гор Хидака. Максимальные коэффициенты анизотропии достигают значений 12, 8, 5, 6, 6.5 и 7.8 % под станциями вдоль восточного Хоккайдо ERM, MYR, IWN, URH, AKK и NMR соответственно. Интервалы глубин с максимальными значениями t_{SS} согласуются с положением верхней границы сейсмофокальной зоны под каждой станцией. Согласно [15] верхняя граница сейсмофокальной границы оценивается под ERM, MYR, IWN, URH и AKK на глубинах 40, 45, 62, 84 и 58 км соответственно.

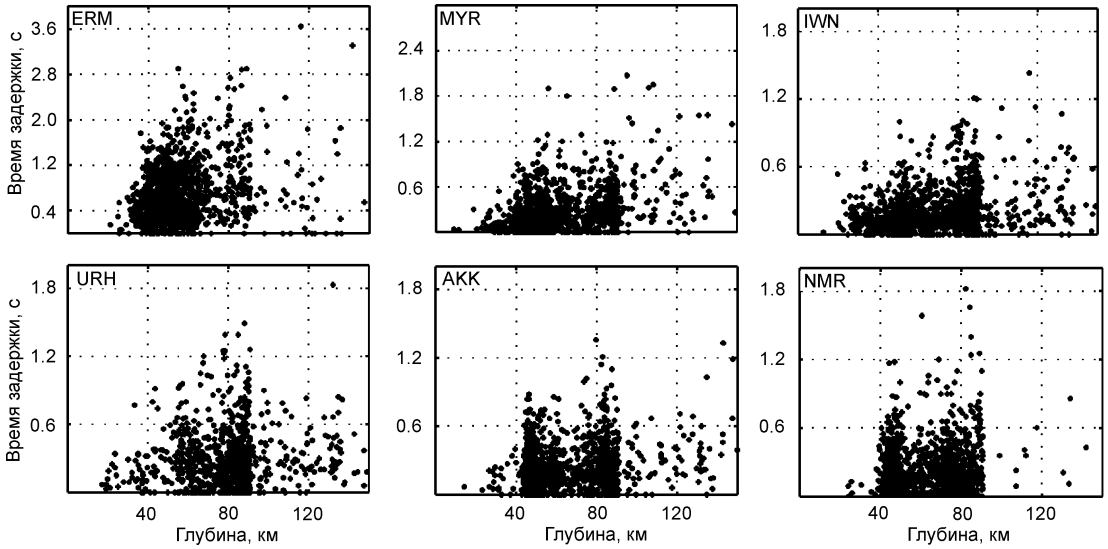

Рис. 3. Распределение времен задержки между S-волнами в зависимости от глубины событий за период 1998–2003 гг. под станциями, расположенными вдоль восточной части острова Хоккайдо

Проведен анализ пространственного распределения параметров расщепленных волн φ, δt_{SS} в вертикальных и горизонтальных срезах для различных интервалов времени. Наблюденные азимуты поляризации быстрой S-волны отнесены к гипоцентрам соответствующих землетрясений, которые проектировались на разрез (плоскость). Поскольку данные распределены неравномерно в пространстве, проводилось осреднение φ в ячейках прямоугольной сетки с шагом 0.1° на основе частотного распределения φ в каждой ячейке. Доминирующие значения φ выбирались при обнаружении четкого максимума в распределении, при выделении нескольких равномощных пиков, значение φ определялось статистически как

$$\overline{\varphi} = \sum_{i=1}^{k} \varphi_i n_i \Big/ \sum_{i=1}^{k} n_i ,$$

где k — количество пиков в распределении; φ_i — среднее значение азимутов быстрой волны в i-ом интервале; n_i — количество азимутов в i-ом интервале распределения. На рис. 4, *а* показано распределение азимутов быстрой волны и повышенных времен задержки δt_{SS} за период 1998–2002 гг. вдоль Хоккайдо для четырех глубинных интервалов событий в горизонтальной плоскости. Осреднение данных и проектирование на разрез осуществлялось отдельно для каждой станции. Во избежание значительного перекрытия данных между соседними станциями, данные пропорционально смещены на 0.4 расстояния от центров ячеек в сторону соответствующей станции. На разрезах повышенные времена задержки отнесены к эпицентрам (гипоцентрам) соответствующих землетрясений. Для анализа использовались времена задержки между S-волнами δt_{SS}, нормализованные на гипоцентральное расстояние, со значениями выше 8 мс/км, которые приближаются к критическому уровню напряженного состояния среды. В области ERM, MYR выбирались данные со значениями δt_{SS} больше 20 и 10 мс/км соответственно. На разрезах наблюдается мозаичный характер в ориентации φ вдоль о. Хоккайдо и по глубине, но в то же время выделяются северо-восточные и юго-восточные области. В северо-восточной области доминируют направления φ вдоль желоба, а в юго-восточной — поперек желоба. Граница между областями располагается в области станции URH. В работе [15] в области URH выделена узкая зона сквозной по глубине сейсмичности вкрест простирания дуги. По данным тензоров сейсмических моментов землетрясений в восточной части о. Хоккайдо оси сжатия σ_3 и растяжения σ_1 ориентируются близгоризонтально и наклонно с простиранием поперек желоба, промежуточная ось σ_2 ориентирована вдоль желоба. Наиболее сложная картина ориентации φ отмечается для событий с глубин 45–90 км. Азимуты быстрой волны организуют сеть ортогональных направлений. Под NMR азимуты быстрой волны доминируют в двух направлениях $\approx \sigma_3, \sigma_2$, под AKK — вдоль σ_2 и восточного направления. В области гор Хидака (ERM, MYR) выделяется сеть из двух пар ортогональных направлений — юго-восток–северо-восток и восток–север, обусловленная продвижением Тихоокеанской плиты и коллизией с Японской дугой. Доминирующие направления φ от событий с глубины >90 км ориентируются вдоль направлений погружения плиты.

Анализ пространственного распределения параметров расщепленных волн показывает также изменение в ориентации φ во времени, наблюдается смена доминирующих направлений. На рис. 4, *б* и *в* показаны распределения параметров за 2003 г. до времени происхождения землетрясения Токачи-оки и в постсейсмический

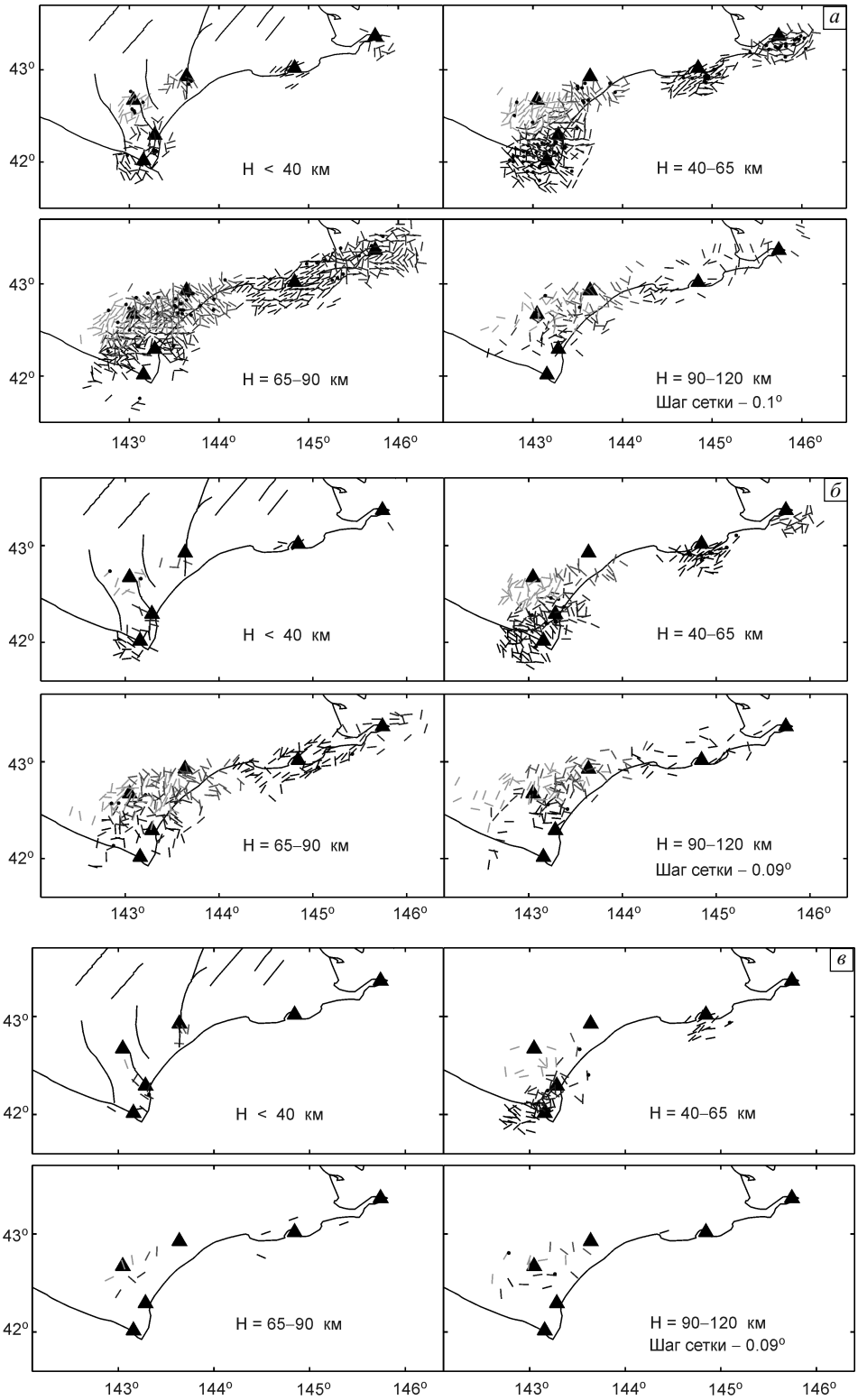

Рис. 4. Распределение азимутов быстрой S-волны от событий 4-х глубинных интервалов за период 1998–2002 гг. (*а*), с 1 января по 25 сентября 2003 г. (*б*), в постсейсмический период землетрясения Токачи-оки с 26 сентября по 15 октября 2003 г. (*в*) вдоль восточной части о. Хоккайдо. Азимуты быстрой S-волны в области каждой станции отнесены к гипоцентрам землетрясений и спроектированы на горизонтальную плоскость. Азимут отображается отрезком прямой, повернутым от севера (вертикали) на угол, равный значению азимута. Залитые кружки показывают локализацию повышенных времен задержки δt_{SS}. На разрезе для глубины $H < 40$ км схематично отображены разломные зоны. Треугольники отображают положение станций

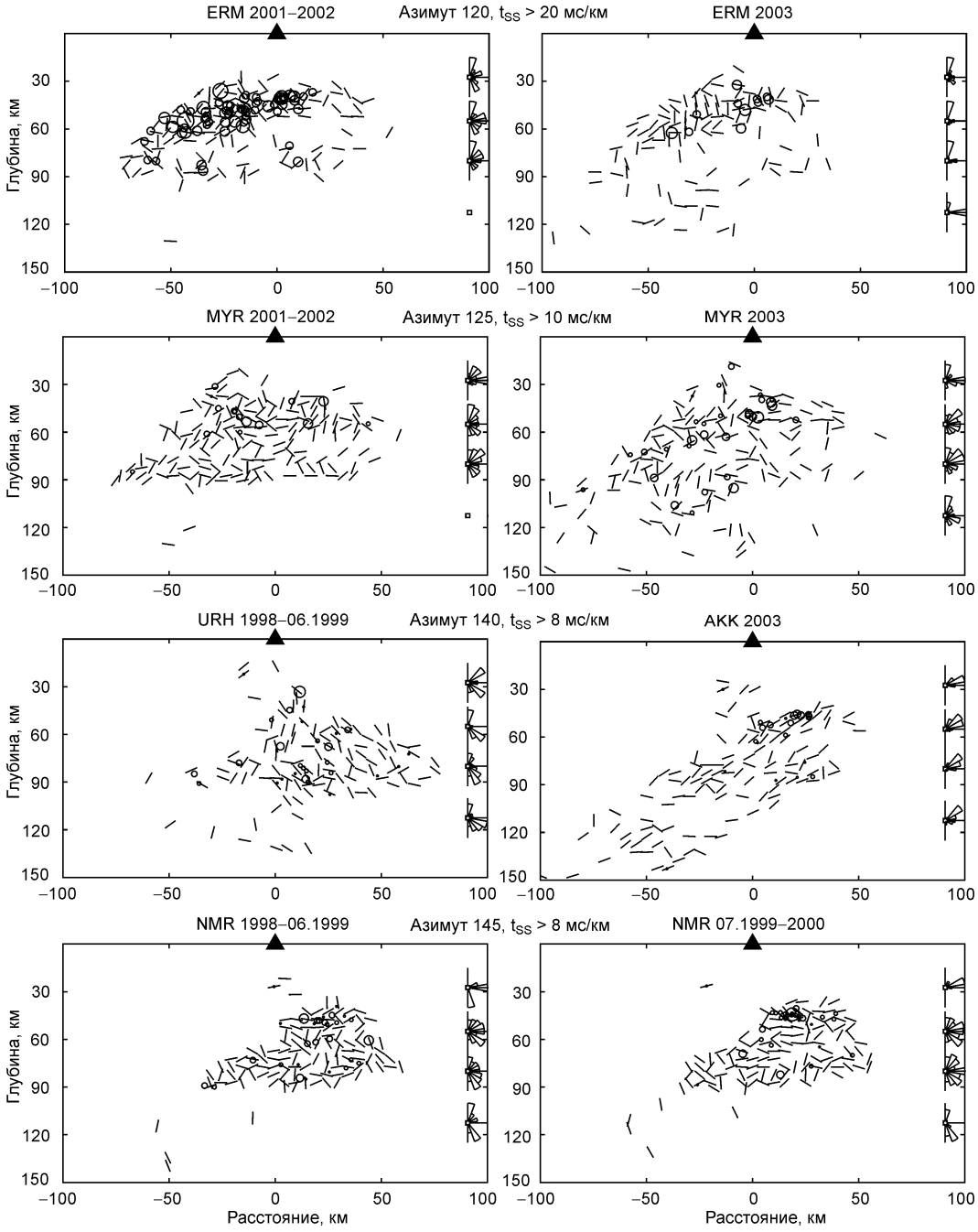

Рис. 5. Распределение азимутов быстрой S-волны и повышенных времен задержки за разные интервалы времени в области станций вдоль глубинного разреза, ориентированного поперек простирания желоба. Азимут ориентации разреза определен в направлении от севера. Условные обозначения те же, что на рис. 4. Размер кружка пропорционален величине δt_{SS}. Справа на рисунках — роза-диаграммы измеренных азимутов от событий соответствующих глубинных интервалов

период за 20 дней. Линия разрыва землетрясения Токачи-оки локализуется в области станции MYR, на границе между высокоанизотропной средой (горы Хидака) и низкоанизотропной средой (равнина Токачи). Здесь отмечается процесс упорядочения в системе ориентации φ вдоль о. Хоккайдо (рис. 4, *б* и *в*). Доминирующие азимуты быстрой S-волны в области ERM, MYR и URH хорошо согласуются с направлениями сжатия, а в области IWN и AKK и NMR — с направлением промежуточной оси σ_2. Повышенные значения δt_{SS} локализуются преимущественно у верхней границы сейсмофокальной зоны. Отмечается миграция повышенных δt_{SS} с глубиной и во времени, отвечающая прерывистому скольжению плиты вдоль падения. На рис. 5 показаны глубинные разрезы вкрест простирания дуги под каждой станцией для отдельных интервалов времени. В области

ERM отчетливо наблюдаются концентрация повышенных δt_{SS} у верхней границы сейсмофокальной зоны в 2001–2002 гг. и смена в ориентации φ от событий с глубины 40–60 км с восточных направлений в 2001–2002 гг. на северные в 2003 г. В области MYR, AKK также наблюдаются процесс упорядочения в ориентации φ, увеличение количества повышенных δt_{SS} и их концентрация у верхней границы в 2003 г. В области URH и NMR даны распределения параметров в период происхождения крупных землетрясений вблизи станций (рис. 1).

По характеру распределения параметров расщепленных волн в пространстве симметрия среды определена как трансверсально-изотропная с близгоризонтальной осью симметрии вдоль желоба. В рамках моделей нагруженных трещиноватых, пористых сред азимут быстрой волны ориентируется перпендикулярно направлению минимального сжатия. Зональность проявления анизотропных свойств может быть обусловлена неоднородным распределением напряженного состояния и флюидонасыщенности пород. Анализ коэффициентов Лоде-Надаи ($|\mu_\sigma| \le 0.2$) показывает, что вдоль о. Хоккайдо характерны сдвиговые деформации и неоднородное распределение зон относительного растяжения ($\mu_\sigma < 0$) и сжатия ($\mu_\sigma > 0$). Отмечена корреляция областей относительного сжатия с ориентацией φ нормально к желобу и областей относительного растяжения с ориентацией φ вдоль желоба.

4. Выводы

Результаты исследований показывают зональность распределения анизотропных свойств среды вдоль восточной части острова Хоккайдо и с глубиной, что свидетельствует о различии в характере деформирования среды. Области под равнинами Токачи и Кусиро характеризуются достаточно устойчивым поведением параметров волн во времени, невысокими коэффициентами анизотропии. Предполагается, что под равнинами происходит упрочнение механических свойств среды, развитие и аккумуляция сдвиговых деформаций (прерывистого скольжения) в плоскости по падению плиты по типу надвигов (Токачи) и сбросов (Кусиро). Равнины с юга и севера окружены подвижными зонами гор Хидака и полуострова Немуро в стадии активного деформирования. Наибольшая неустойчивость в поведении азимутов быстрой волны отмечается для глубин событий 45–70 км, в области верхней границы сейсмофокальной зоны. Максимальные значения времени задержки S-волн, области миграции повышенных времен задержки локализуются преимущественно в области верхней границы сейсмофокальной зоны и вдоль контактов между жесткими и ослабленными блоками. Разрыв сильного землетрясения Токачи-оки локализовался на границе гор Хидака и равнины Токачи, в области контакта сред с различными реологическими свойствами.

Автор выражает благодарность сотрудникам Института сейсмологии и вулканологии Университета Хоккайдо (Япония) за предоставленные сейсмические данные, а также М. Касахара и Т. Маеда за поддержку и помощь в работе с сейсмическими данными. Работа поддержана программой Президиума РАН (№ 16), Президиума ДВО РАН (гранты №№ 06-I-П16-061, 06-III-А-08-346) и РФФИ (грант № 06-05-96009).

Литература

1. *Zhang S., Karato S.* Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear // Nature. – 1995. – V. 375. – P. 133–152.
2. *Liu E., Hudson J.A., Pointer T.* Equivalent medium representation of fractured rock // J. Geophys. Res. B. – 2000. – V. 105. – No. 2. – P. 2981–3000.
3. *Hall C.E., Fisher K.M., Parmentier E.M.* The influence of plate motion on three-dimensional back arc mantle flow and shear wave splitting // J. Geophys. Res. B. – 2000. – V. 105. – No. 12. – P. 28009–28033.
4. *Fouch M.J., Fisher K.M., Parmentier E.M. et al.* Shear wave splitting, continental keels, and patterns of mantle flow // J. Geophys. Res. B. – 2000. – V. 105. – No. 3. – P. 6255–6275.
5. *Peiton V., Levin V., Park J.* Mantle flow at a slab edge: Seismic anisotropy in the Kamchatka region // Geophys. Res. Lett. – 2001. – V. 28. – P. 379–382.
6. *Katayama I., Jung H., Karato S.* New type of olivine fabric from deformation experiments at modest water content and low stress // Geology. – 2004. – V. 32. – No. 12. – P. 1045–1048.
7. *Kneller E., Keken P.E., Karato S. et al.* B-type, olivine fabric in the mantle wedge: Insight from high-resolution non-Newtonian subduction zone models // Earth Planet. Sci. Lett. – 2005. – V. 237. – P. 781–797.
8. *Crampin S.* A review of shear wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic Earth // Wave Motion. – 2005. – V. 41. – P. 59–77.
9. *Lassak T.M., Fouch M.J., Hall C.E. et al.* Seismic characterization of mantle flow in subduction systems: Can we resolve a hydrated mantle wedge? // Earth Planet. Sci. – 2006. – V. 243. – P. 632–649.
10. *Lee K.L., Jiang Z., Karato S.* A scanning electron microscope study of the effect of dynamic recrystallization on lattice preferred orientation in olivine // Tectonophysics. – 2002. – V. 351. – P. 331–341.
11. *Silver P.G., Chan W.W.* Shear wave splitting and subcontinent mantle deformation // J. Geophys. Res. B. – 1991. – V. 96. – No. 16. – P. 16429–16454.
12. *Ito Y., Matsubayashi H., Kimura H. et al.* Spatial distribution for moment tensor solutions of the 2003 Tokachi-oki earthquake (M_{JMA} = = 8.0) and aftershocks // Earth, Planets, Space. – 2004. – V. 56. – P. 301–306.
13. *DeMets C.* Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan trenches // J. Geophys. Res. – 1992. – V. 97. – P. 17615–17625.
14. *Kimura G.* Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril arc // Geology. – 1986. – V. 14. – P. 404–407.
15. *Katsumata K., Wada N., Kasahara M.* Newly imaged shape of the deep seismic zone within the subducting Pacific plate beneath the Hokkaido corner, Japan-Kuril arc-arc junction // J. Geophys. Res. B. – 2003. – V. 108. – No. 12. – P. 2565–2588.
16. *Isacks B., Molnar P.* Distribution of stress in the descending lithosphere from a global survey of focal mechanism solutions of mantle earthquakes // Rev. Geophys. Space. Phys. – 1971. – V. 9. – P. 103–174.
17. *Гальперин Е.И.* Поляризационный метод сейсмических исследований. – М.: Недра, 1977. – 277 с.
18. *Luneva M.N., Lee J.M.* Shear wave splitting beneath South Kamchatka during 3-year period associated with the 1997 Kronotsky Earthquake // Tectonophysics. – 2003. – V. 374. – P. 135–161.
19. *Лунева М.Н., Ли Д.М.* Анизотропия среды и временные вариации азимута поляризации быстрой S-волны под Южной Камчаткой в период 1993–2002 гг. // Физика Земли. – 2006. – № 4. – С. 40–56.

Поступила в редакцию
29.10.2007 г.