## УДК 550.34 СЕЙСМИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ ЗАДУГОВОЙ ОБЛАСТИ ЮЖНО-КУРИЛЬСКОЙ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ

### М.Н. Лунева

им. Ю.А. Косыгина Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск, margo@itig.as.khb.ru

### Введение

Исследования параметров расщепленных S-волн от местных землетрясений в области островов Хоккайдо и Сахалин показывают сложную картину их изменения в пространстве и предполагают неоднородность анизотропных свойств. Неоднородность распределения анизотропных свойств может отражать различие реологических, термодинамических свойств мантии, особенности геометрии погружающееся плиты и как следствие сложную картину мантийных течений [3]. В области сочленения Японской и Курильской дуг Тихоокеанская плита погружается в северо-западном направлении в верхнюю мантию и выполаживается на глубине 400-650 км, протягиваясь вдоль переходной зоны (MTZ) на расстояние около 1000 км. Под Охотским морем Тихоокеанская плита погружается в ССЗ направлении в нижнюю мантию до глубины 700 км с образованием впадины с простиранием вдоль о-ва Сахалин. По данным сейсмической томографии [7] в области сочленения Японской и Идзу-Бонин дуг выявлен разрыв плиты в переходной зоне мантии. В данной зоне резкого изменения кривизны погружающейся плиты наблюдается концентрация крупных землетрясений. Предполагается, что подобное явление может быть и в области сочленения Японской и Курильской дуг, вызванное также и различием скорости отступления глубоководного желоба. В пользу данной гипотезы может служить наблюдаемое в южной части Курильской дуги отклонение азимутов быстрой S-волны от направлений вдоль или поперек глубоководного желоба.

В данной работе представлен анализ результатов измерения параметров расщепленных *S*-волн в области 12 станций Южного Сахалина от глубоких землетрясений под Охотским морем за период 2005-2007 гг., в области 7 станций Хоккайдо от землетрясений под Охотским морем и Японским морем за период 2003-2010 годов. В исследовании использовались цифровые записи сейсмических станций сети DAT (ИМГиГ ДВО РАН), японской сейсмологической сети F-net, H-net NIED [6]

# Результаты

Общая картина ориентации азимутов быстрой *S*-волны ( $\varphi$ ) от глубоких землетрясений с учетом разности времен прихода *S*-волн ( $\delta t$ ) в южной части Курильской дуги показана на рис. 1А. Данные вынесены к середине расстояния эпицентр-станция с учетом разности времен прихода *S*-волн ( $\delta t$ ). Результаты анализа параметров *S*-волн в области Южного Сахалина показывают доминирование азимутов поляризации быстрой *S*-волны под станциями центральной части острова в интервале направлений ССВ-СВ, СЗ. Под прибрежными станциями азимуты быстрой *S*-волны доминируют вдоль направлений В-ЮВ и согласуются с направлением движения Тихоокеанской плиты и направлением сжатия в южной области Сахалина. Разность времен прихода *S*-волн изменяется в интервале 0.12-2 с, а средние значения  $\delta t$  определены 0.6-0.8 с. Максимальные значения  $\delta t$  и степень анизотропии  $\alpha$  до 1-2.3% фиксируются в области активных разломов, в центральной части Южного Сахалина. Повышенные значения  $\delta t$  до 2 сек. с ориентацией  $\varphi$  вдоль простирания активных разломов могут свидетельствовать о глубинных корнях разломов с протяжением в литосферную мантию.

Результаты анализа параметров S-волн от событий под Охотским морем в северо-восточной области Хоккайдо показывают доминирование  $\varphi$  в интервале направлений ССВ-СВ. В области западных станций Хоккайдо  $\varphi$  доминируют вдоль ЮВ направлениях от событий с глубины до 350 км и

ССВ направлениях от более глубоких событий 400-600 км. В области станций западного Хоккайдо величина  $\delta t$  изменяется до 3 с от событий до глубины 350 км и до 4-6.5 с фиксируются от событий с глубины больше 360 км. Высокие значения  $\delta t > 3.5$  с отвечают *S*-волнам, распространяющимся с глубины 400-600 км, области метастабильного оливина. Средние значения  $\delta t$  определены ~2.8 с. Степень анизотропии достигает значений 3-5% от событий с глубины до 200 км и стабилизируется на более низком уровне 2.5-3.5% от событий с глубины больше 400 км, что может свидетельствовать о понижении анизотропии в переходной зоне по сравнению с вышележащей мантией. В области станций северо-востока Хоккайдо максимальные значения  $\delta t$  достигают 1.6-3 с, а средние значения  $\delta t$  определены в интервале 0.65-1.45 с в зависимости от положения станции. Максимальная степень анизотропии  $\alpha$  оценивается в интервале значений 3-3.5% от событий с глубины 300-350 км. Средние значения  $\alpha$  определены в пределах 0.73-2% в зависимости от положения станции.

Как можно видеть на рис.1А, ориентации  $\varphi$  в западной и северо-восточной части Хоккайдо существенно отличаются с учетом и данных в области станций вдоль восточной части Хоккайдо от событий с глубины больше 100 км за период 1998-2003 гг. [1, 2]. Ориентация  $\varphi$  с максимальными значениями  $\delta t$  согласуются с простиранием надвиговых зон в области Хоккайдо, показанных на рис. 1Б. Разделение в области Хоккайдо проходит вдоль надвиговых метаморфических поясов Хидака и Камуикотан, вдоль предполагаемой границы Охотской и Амурской микроплит. Картина распределения параметров *S*-волн согласуется с продвижением передовой части Курильской дуги вдоль глубоководного желоба в современный период и деформациями укорочения вдоль восточного Хоккайдо, вдоль зон высокой сейсмичности и проявления сильных землетрясений надвигового типа на глубине 35-90 км [5, 9].



**Рис. 1 А)** Распределение наблюденных азимутов быстрой *S*-волны с учетом разности времен *S*-волн от событий с глубины 100-350 км в области станций Южного Сахалина и Хоккайдо за период 2003-2010 гг. и с учетом данных от событий за период 1998-2003 гг. в области станций вдоль юго-восточной части Хоккайдо. Данные отнесены к координатам середины луча эпицентр-станция. Азимут отображается отрезком, длина которого пропорциональна разности времен *S*-волн. **Б**) Тектоническая схема Хоккайдо по данным [4, 5]. Точечные линии и линии с треугольниками отражают тектонические границы четвертичные и неогеновые зоны надвигов в области гор Хидака и равнины Токачи. Знак звезды отмечает эпицентры крупных надвиговых землетрясений. Треугольники отмечают положение активных вулканов.

По ориентации  $\varphi$  и величине  $\delta t$  выделены две области. Восточная область включает Охотское море, северо-восточную часть Хоккайдо и центральную часть Южного Сахалина. Западная область включает станции NKG, IMG, прибрежные станции Южного Сахалина и Японское море. В восточной

области доминируют  $\varphi$  вдоль ССВ-СВ направлений, а максимальные значения  $\delta t$  изменяются в интервале 1-2 с от событий с глубины до 300 км. В западной области доминируют  $\varphi$  вдоль В-ЮВ направлений с максимальными значениями  $\delta t$  в интервале 1.5-3.5 с. Для оценки симметрии, мантийного течения, проведено сопоставление наблюденных  $\varphi$  с распределением теоретических  $\varphi_T$ , определенных в рамках моделей анизотропных вязкоупругих сред ромбической и трансверсально-изотропной симметрии. На рис. 2 показаны ориентации быстрой *a*-оси [100] и средней *c*-оси [001] оливина, определенные в рамках ромбической модели при сопоставлении с наблюденными данными в области станций, а также топография поверхности погружающейся плиты. В западной области быстрая *a*-ось [100] оливина ориентирована горизонтально на C3-ЮВ, а средняя *c*-ось [001] наклонена от горизонтали на 20-30° в сторону погружения плиты на северо-восток. В восточной области быстрая *a*-ось [100] оливина ориентирована горизонтально на ССВ-ЮЮЗ, а средняя *c*-ось[001] наклонена более круто на 40-50° в сторону погружения плиты на ССЗ-СЗ.



**Рис. 2** Ориентация быстрой *а*-оси [100] и средней с-оси [001] ромбической симметрии в области станций Хоккайдо и Южного Сахалина. Угол наклона оси [001] показан от вертикальной оси в сторону падения. Пунктиром отражены изолинии и нормали верхней поверхности погружающейся плиты. Стрелки указывают направление и скорость движения Тихоокеанской плиты и вдоль дуги, а треугольники – положение станций.

Под западным Хоккайдо, Южным Сахалином и Японским морем распределение  $\varphi$  согласуется с развитием **E**-типа текстуры оливина с горизонтальной ориентацией *a*-оси [100] оливина в направлении C3310°±20°, что предполагает обратное конвергентное течение мантии в направлении ЮВ130°±20 в области глубин 100-200 км под надвигаемой плитой.

В области мантийного клина под восточной частью Хоккайдо, Южного Сахалина и Охотского моря распределение  $\varphi$  согласуется с горизонтальной ориентацией быстрой *a*-оси [100] вдоль CB30±15° с отклонением на 20-30° от простирания Курильской дуги, и наклоном *c*-оси [001] по падению погружающейся плиты. Учитывая повышенный тепловой поток в данном регионе и процессы дегидратации в субдуктирующей плите, предполагается развитие **B**-типа текстуры оливина и мантийного течения вдоль *c*-оси [001] оливина с ориентацией C3310°±20° и сдвиговой плоскостью (010). Под центральной частью вдоль Южного Сахалина предполагается развитие **C**-типа текстуры оливина с системой скольжений [001](001) в условиях флюидосодержащей мантии и частичного плавления.

Результаты анализа распределения параметров расщепленных S-волн в области Южного Сахалина и Хоккайдо от глубоких землетрясений свидетельствуют о взаимосвязи ориентации азимутов быстрой *S*-волны и геометрии погружающейся Тихоокеанской плиты в задуговой области Южно-Курильской зоны субдукции.

### Особенности расщепления S-волн в области станций Хоккайдо

В период исследования отмечен ряд особенностей в расщеплении *S*-волн от глубоких землетрясений в период 2007-2010 гг. В области станций Хоккайдо (КNP, NOP, SHR) выявлено отсутствие эффекта расщепления *S*-волн от отдельных событий 27.03.2008 (*M* 4.5, *H* 340 км), 18.09.2008 (*M* 5.4, *H* 360 км). От данных событий вектор поляризации *S*-волны ориентирован горизонтально и перпендикулярно к азимуту распространения волны. Фактически, это указывает на распространение поперечной *S*-волны с поляризацией *SH*-типа. Под п-вом Немуро (станция NMR) отсутствие расщепления *S*-волн зафиксировано в период 2007-2010 гг. (рис. 3). В данном случае фиксируется только *S*-волна с поляризацией *SV*-типа и ориентацией азимута  $\varphi$  в направлении распространения волны. Азимуты станция-эпицентр распределены в диапазоне 130-144°, а  $\varphi$  в интервале 127-143°. Как можно видеть на азимутальных сейсмограммах (рис. 3), на компонентах записи, ортогональных азимуту поляризации *S*-волны уровень шума достаточно низкий. Отсутствие эффекта расщепления *S*-волны может быть связано с распространением волны вдоль оси симметрии среды или значительным понижением степени анизотропии среды, вызванным повышением флюидного давления, повышением напряжений до уровня гидростатического.



**Рис. 3.** Азимутальные сейсмограммы в интервале *S*-волн, показывающие эффект расщепления *S*-волн (**a**) и его отсутствие (**б**) от глубоких землетрясений, зарегистрированных станцией NMR. Сейсмограммы построены в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в  $10^{\circ}$  и отсчетом от севера. В заголовке отмечено время события, глубина (*H*), эпицентральное расстояние (*R*), азимут эпицентр-станция (*Az*), магнитуда (*M*).

В области западных станций Хоккайдо (NKG, IMG) зафиксировано аномальное увеличение разности прихода S-волн до 4-6 секунд с доминированием азимутов быстрой S-волны в CCB направлении от событий из переходной области мантии 400-600 км (рис. 4). Природа S-волн может быть отнесена к типу неоднородных расщепленных S-волн, распространяющихся вдоль границы плита-мантия с затуханием амплитуды при удалении от границы раздела сред. С другой стороны, параметры  $\delta t$  и  $\varphi$ от событий с H > 400 км отражают анизотропию в области метастабильного оливина, переходной зоне мантии. Экспериментальные и теоретические исследования поликристаллов вадслеите, основного минерала верхней части MTZ, в условиях деформирования простого сдвига показывают более активное развитие системы скольжения [100](010) с отклонением около 20° от направления простого сдвига [8]. Сейсмическая анизотропия в вадслеите проявляется в распространении P-волны и S-волны, поляризованной параллельно направлению сдвига (SH), с наибольшей скоростью в направлениях близких к направлению простого сдвига. При распространении S-волн в ортогональных направлениях максимальная скорость отвечает волне SV типа. Максимальная величина  $\delta t$  проявляется при распространении волн в плоскости слвига и в направлении ортогональном к направлению сдвига. Анизотропия S-волн оценивается около 1-2.5%. В этом случае, учитывая ориентации  $\varphi$  вдоль C-CB направлений от событий с глубины больше 400 км, быстрая S-волна соответствует SH типу, а медленная волна соответствует SV типу с поляризацией, близкой к направлению сдвига.



Рис. 4 Пример расщепления S-волн от крупного землетрясения на глубине 481 км (31.08.2003, M6.2), зарегистрированного станциями NKG и IMG. Условные обозначения те же, что на рис. 3.

Работа поддержана программой Президиума РАН (№16) и Президиума ДВО РАН (гранты №09-І-П16-10, № 09-III-A-08-443).

#### Список литературы

- 1. Лунева М.Н., Касахара М. Изучение параметров расщепленных поперечных волн вдоль восточного Хоккайдо в период подготовки Токачи-оки землетрясения (М8.0, 26.09.2003) // Физика Земли. 2006. № 9. С. 46-60.
- 2. Лунева М.Н. Сейсмическая анизотропия и пространственное распределение параметров расшепленных волн от местных землетрясений вдоль восточного Хоккайдо // Физическая мезомеханика, 2008. Т. 11. №. 1. С. 37-43.
- 3. Kneller E.A., van Keken P.E. The effects of three-dimensional slab geometry on deformation in the mantle wedge: Implications for shear wave anisotropy // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. V. 9. doi:10.1029/2007GC001677.
- 4. Kimura G. 1994 The latest Cretaceous-early Paleogene rapid growth of accretionary complex and exhumation of high pressure series metamorphic rocks in northwestern Pacific margin // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 22147-22164.
- 5. Kita S., Hasegawa A., Nakajima J., Okada T., Matsuzawa T., Katsumata K. High-resolution seismic velocity structure beneath the Hokkaido corner, northern Japan: Arc-arc collision and origins of the 1970 M 6.7 Hidaka and 1982 M 7.1 Urakawa-oki earthquakes // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. B12301. doi:10.1029/2012JB009356.
- 6. NIED, http://www.bosai.go.jp, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
- 7. Obayashi M., Yoshimitsu J., Fukao Y. Tearing of stagnant slab // Science. 2009. V. 324. P. 1173-1175.
- 8. Tommasi A., Mainprice D., Canova G., Chastel Y. Viscoplastic self-consistent and equilibrium-based modelling of olivine lattice preferred orientations. 1. Implications for the upper mantle seismic anisotropy // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 7893-7908.
- 9. Toya Y., Kasahara M. Robust and exploratory analysis of active mesoscale tectonic zones in Japan utilizing the nationwide GPS array // Tectonophysics. 2005. V. 400. P. 27-53.