

М.Н. Лулева

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

Введение

Остров Сахалин принадлежит задуговой области Курильской дуги и области сочленения Курильской и Японской дуг. По данным сейсмической томографии [7] поверхность погружающейся Тихоокеанской плиты в области сочленения дуг представляет сложную конфигурацию с плавным погружением под Азиатский континент до глубины 500-700 км с образованием возвышенности с осью, ориентированной на северо-восток, и крутым погружением в северном направлении вдоль Сахалина (рис.1). Сложная геометрия поверхности погружающейся плиты может быть связана с характером деформаций в плите, мантии и вышележащей литосферы, а также с характером распределения сейсмичности с глубиной. Сам о. Сахалин является палеосубдукционной зоной, сформировавшейся в меловой и ранний кайнозойский периоды в области конвергенции Азиатской окраины и Тихого океана. Этапы эволюции острова и его глубинное строение остаются дискуссионными [1, 2].

Представленная работа посвящена исследованию сейсмической анизотропии под Южным Сахалином от местных глубокофокусных землетрясений, зарегистрированных станциями локальной сети. Исследование проводится на основе эффекта расщепления S -волн в анизотропной среде. Основными параметрами измерения являются азимут поляризации быстрой S -волны (φ) и разность времен прихода быстрой и медленной S -волн (δt), которые несут информацию о направленности деформаций и степени анизотропии среды. Многочисленные исследования по изучению сейсмической анизотропии на основе метода расщепленных волн от местных и удаленных землетрясений проведены в зонах субдукции Тихого океана, которые показывают ряд закономерностей изменения поляризации быстрой S -волны и степени анизотропии среды вдоль зон субдукции и при движении от желоба к задуговой области. Менее изученными являются территории Курильских островов, Охотского моря и о. Сахалин. Первые результаты [6, 9] в области Сахалина по сейсмической анизотропии по расщепленным S и SKS волнам, зарегистрированные станцией YSS IRIS (г. Южно-Сахалинск) за период 1992-1995, показали, что азимуты поляризации быстрой S -волны ориентируются субмеридионально и круто наклонены к направлению абсолютного движения Тихоокеанской плиты. В работах неоднозначно оценивается характер изменения с глубиной степени анизотропии мантии и взаимосвязь между деформациями верхней плиты, мантии и субдуктирующей плиты. По [6] увеличение разности времен прихода S -волн δt до 1.35 с под Охотским морем и Сахалином указывает на существование анизотропии до глубин 500-600 км, коэффициент анизотропия мантии определен около 0.5%. По [9] значения δt достигают 1.8 с от событий до глубины 350 км, и авторами и предполагается анизотропия мантии до 400 км.

Для исследования из регионального и оперативного каталогов СФ ГС РАН выбраны 15 глубокофокусных землетрясений (250-400 км) за период 2005-2007 г. Гипоцентры землетрясений локализируются преимущественно под заливом Анива. Минимальные глубины событий находятся в Татарском проливе и в окрестности острова Хоккайдо. Максимальная глубина событий фиксируется под северной частью залива Анива (340-360 км) и Курильской впадиной (395 км). Использовались записи землетрясений, зарегистрированных цифровыми сейсмическими станциями локальной сети СФ ГС РАН, 4 станции которой расположены вдоль западного побережья Южного Сахалина (YBL, KHL, KLN, KKH), 4 станции – вдоль центральной части (ZGR, OJD, BSK, KRS) и 4 станции – вдоль восточного побережья острова (OSM, LSN, OKT, MLK). Станции оснащены 3-компонентными сейсмометрами с одинаковыми динамическими характеристиками и шагом дискретизации 10 мс. Измерение параметров сейсмических волн от землетрясений проводилось в частотном диапазоне до 1 Гц, что обусловлено амплитудно-частотными характеристиками сейсмометров. В случае повышенного уровня шума, помех для улучшения качества записи проводилась фильтрация.

Результаты

На рис. 1 представлены наблюдаемые азимуты поляризации быстрой S -волны (φ) с учетом разности времен прихода S -волн (δt). Данные вынесены к координатам соответствующих станций и эпицентрам землетрясений. По данным [6] дополнительно вынесены азимуты поляризации быстрой S -волны от глубоких землетрясений, зарегистрированных станцией YSS IRIS в период 1993-1995 гг. Азимуты поляризации быстрой S -волны ориентируются вдоль ССЗ-СВ и В-ЮВ. Доминирование φ вдоль ССЗ, С-СВ отмечается в центральной части острова, а также под станциями OSM, ОКТ восточного побережья и YBL, KHL западного побережья. Субширотные направления φ проявляются под станциями KLN, KKH и MLK. Разность времен прихода S -волн изменяется в диапазоне от 0.12 до 2 секунд в зависимости от положения станции (рис. 2). Четкой зависимости δt от глубины событий, (нарастания δt с глубиной) не наблюдается. Максимальные значения δt отмечаются при ориентации азимуты поляризации быстрой S -волны вдоль ССЗ-СВ. Степень анизотропии среды, определяемая по разности времен S -волн вдоль лучей, оценивается в среднем 0.5-1%.

Данные, отнесенные к координатам станций, хорошо согласуются с простираем основных разломов и осей складок в области Южного Сахалина (рис. 1) [3]. Данные, отнесенные к координатам эпицентров землетрясений, согласуются с морфологией поверхности дна и береговыми линиями островов. В области Татарского пролива и залива Анива данные под Южным Сахалином согласуются с данными под Хоккайдо [8]. В целом, азимуты φ с повышенными значениями δt согласуются с продвижением Тихоокеанской плиты на СЗ и миграцией южной части Курильской дуги в ЮЗ направлении [5]. Субширотные направления φ в области прибрежных станций согласуются с направлениями сжатия, обусловленными процессами растяжения под Татарском проливом и Курильской впадиной.

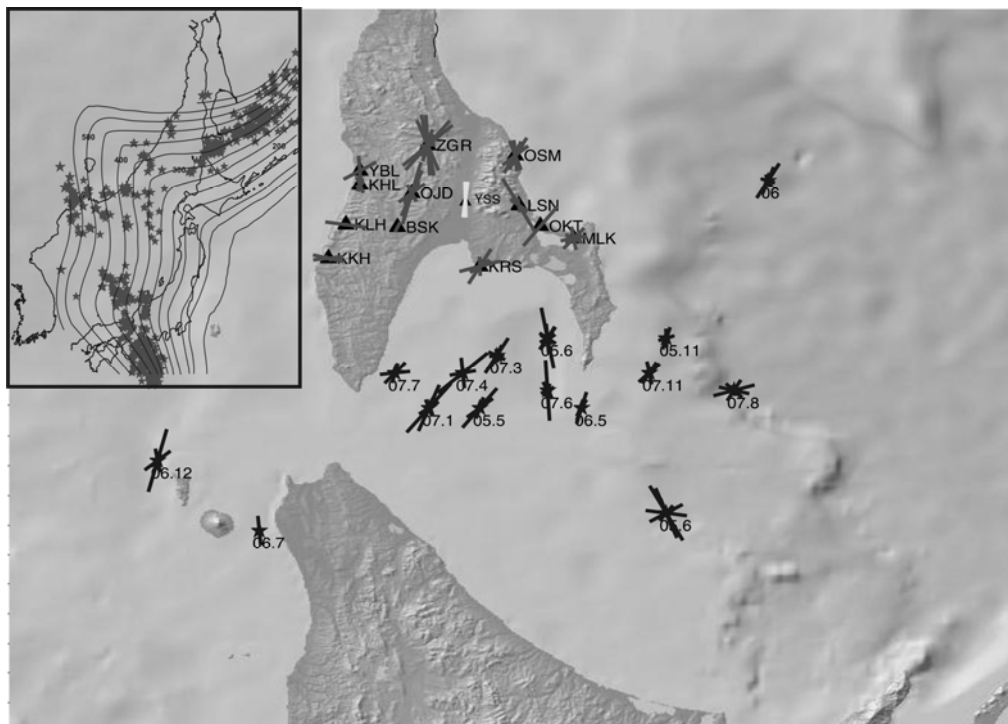


Рис. 1 Распределение азимуты быстрой S -волны с учетом времени задержки между S -волнами в области Южного Сахалина. Азимуты отнесены к координатам соответствующих станций и эпицентров землетрясений. Азимут отображается отрезком, длина которого пропорциональна времени задержки между S -волнами. Треугольники показывают положение станций. Звездочки показывают эпицентры землетрясений с указанием даты их происхождения. Азимуты S_f -волны в области YSS станции вынесены по [6]. На врезке показана глубинная сейсмичность ($M \geq 5, H \geq 250, 1970-2009$) и топография поверхности погружающейся плиты по [7].

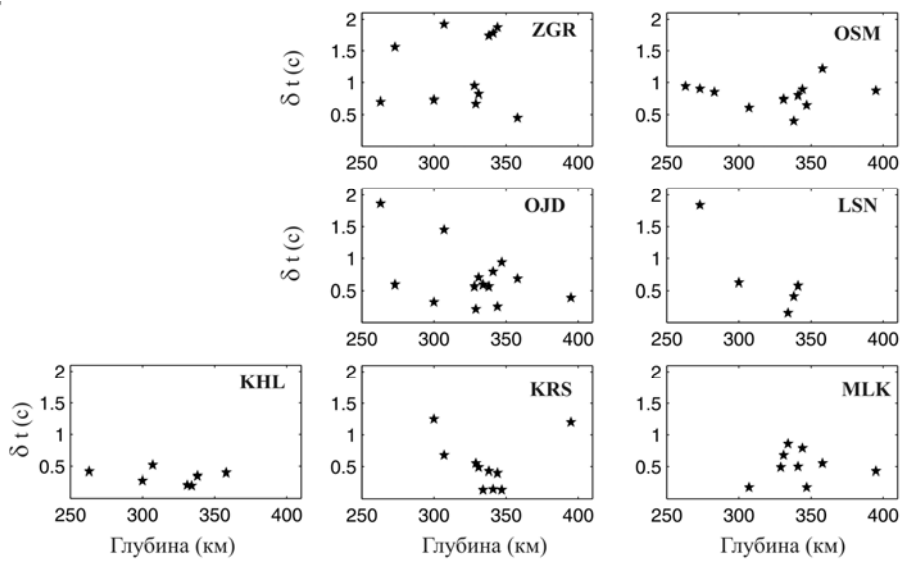


Рис. 2 Распределение разности времен прихода расщепленных S -волн (δt) в зависимости от глубины землетрясений под станциями Южного Сахалина.

На рис. 3 представлено распределение азимутов поляризации быстрой S -волны при изменении положения землетрясений с запада на восток. Азимуты поляризации φ отклоняются в небольшом диапазоне углов при изменении положения событий с тенденцией изменения φ от ССЗ-С к СВ. Это позволяет считать среду трансверсально-изотропной с горизонтальной осью симметрии (ГТИ) (азимутальная анизотропия).

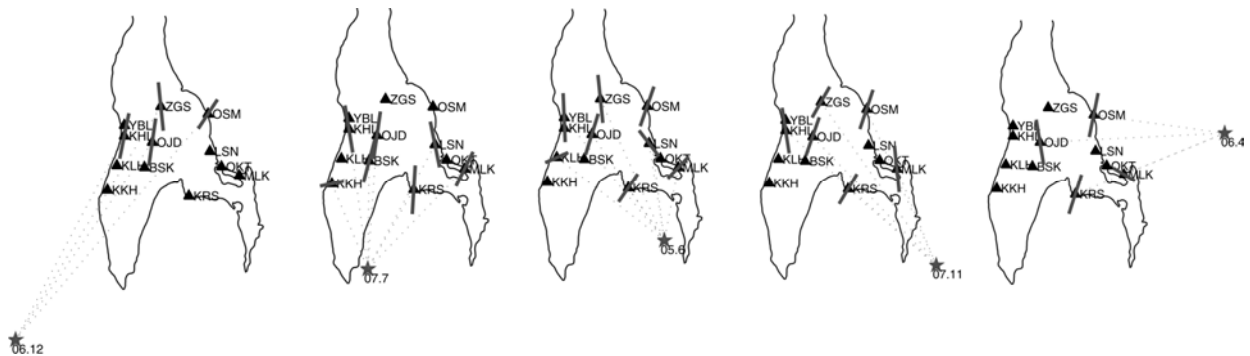


Рис. 3 Распределение азимутов поляризации быстрой S -волны от землетрясений разной локализации в пространстве в области Южного Сахалина.

Наблюдаемая тенденция отклонения φ и изменение уровня значений δt с запада на восток могут быть связаны с горизонтальной неоднородностью, неупругими свойствами среды (изменением вязкости). Горизонтальная неоднородность может быть обусловлена особенностями мантийных течений в зависимости от изменения кривизны поверхности погружающейся под Сахалин плиты, направления падения которой по данным томографии изменяются от С к СЗ (рис. 1, врезка), а также скоростным строением литосферы. Признаками неупругих свойств среды являются проявление эллиптичности в поляризации сейсмических волн и различия в затухании волн в зависимости от направления распространения. В вязкоупругих средах волны становятся неоднородными с затуханием вдоль волнового фронта. Исключением может быть S -волна, поляризованная нормально к плоскостям симметрии (SH -волна), которая остается практически однородной с затуханием вдоль направления распространения волны. Распространение S -волн с разным типом поляризации и затухания более типично для трансверсально-изотропных вязкоупругих сред [4]. Проявления неупругих свойств среды отмечаются под Южным Сахалином. На рис. 4 показаны азимутальные сейсмограммы, траектория

смещений и сейсмограммы расщепленных S -волн, зарегистрированные станцией OJD от землетрясения под заливом Анива. Медленная S -волна со смещением вдоль СЗ направления является эллиптической и по амплитуде почти в два раза превышает быструю волну со смещением на СВ (рис. 4 б, в). Быстрая S -волна характеризуется линейной поляризацией и меньшим периодом колебаний. В рамках ГТИ модели среды направление азимута поляризации быстрой волны типа SH согласуется с направлением сжатия.

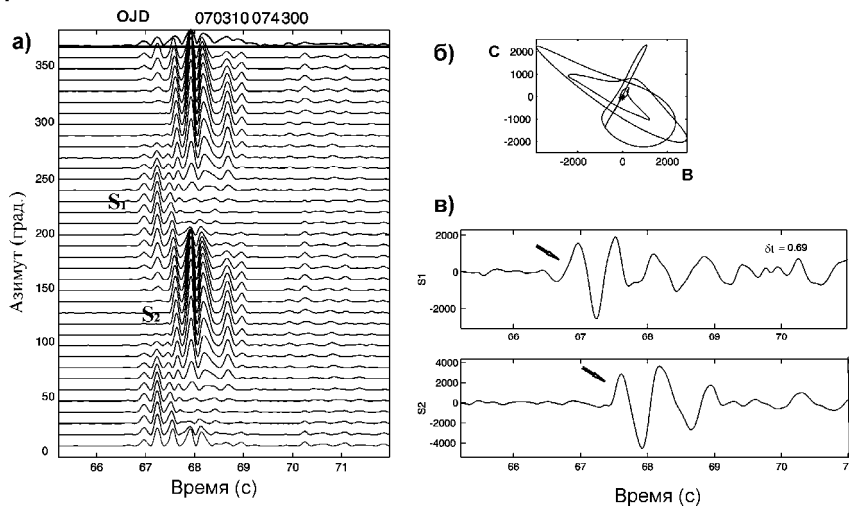


Рис. 4 Пример расщепления поперечных волн от глубокофокусного землетрясения (10.03.2007), зарегистрированного станцией OJD. **а)** Азимутальные сейсмограммы в интервале S -волн. Сейсмограммы построены в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 10° и отсчетом от севера. Быстрая (S_1) и медленная (S_2) волны указаны стрелкой. **б)** Проекция траектории смещения S -волн на горизонтальную плоскость С-В. Звездочкой отмечена начальная точка траектории. **в)** Сейсмограммы S_1 , S_2 -волн построены вдоль векторов поляризации соответствующих S -волн. Разность времен прихода S -волн (δt) указана в верхнем углу.

Анализ колебаний расщепленных S -волн показывает, что характер поляризации, соотношение волновых амплитуд $R = A_{S1}/A_{S2}$, времени задержки δt изменяются в зависимости от положения станции и положения события (рис. 5)

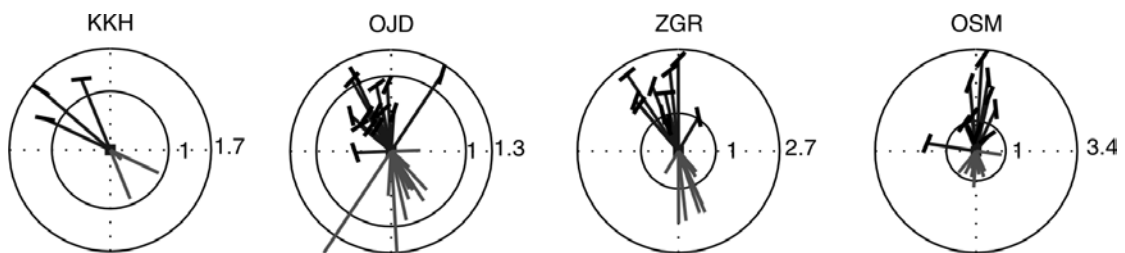


Рис. 5 Изменение отношения амплитуд S -волн ($R = A_{S1}/A_{S2}$), азимута поляризации быстрой волны (φ) и разности времени прихода S -волн (δt) в зависимости от направления распространения волн (эпицентр-станция). Координаты станции – (0,0). Отношение амплитуд выстроено вдоль азимута эпицентр-станция и длиной R , а δt – в обратном направлении длиной δt . В концевых точках векторов R вынесены азимуты поляризации быстрой S -волны. Радиус внешнего круга соответствует максимальному значению R , а внутренний – $R = 1$.

В области станции OJD наблюдается доминирование амплитуды медленной волны и азимута поляризации A_{S1} -волны вдоль СВ. Минимальное затухание медленной волны фиксируется вдоль СЗ, а максимальное – вдоль З-ЮЗ ($\pm 180^\circ$). Обратная картина затухания отмечается для волны типа SH . При выравнивании амплитуд $R \sim 1$ отмечается увеличение времени задержки δt . Более быстрое затухание

SH в некоторых направлениях распространения связано с проблемой ее выделения на фоне рассеянных волн.

В области прибрежной станции ККН обе волны поляризованы линейно и характеризуются более высокими частотами и степенью рассеяния волн. быстрая S -волна доминирует по амплитуде. Это свидетельствует о более жестких свойствах среды. Направления φ быстрой волны указывают на направление сжатия. В области станций ZGR и OSM отмечается доминирование амплитуды быстрой волны и смена азимута быстрой волны от СВ к ССЗ относительно северного направления. Наблюдаемый скачок изменения φ под ZGR и OSM может также свидетельствовать о неоднородном характере деформаций под восточным и западным Сахалином.

Заключение

Результаты измерения параметров расщепленных S -волн от местных глубокофокусных землетрясений за период 2005-2007г. в области 12 станций на Южном Сахалине показывают неоднородность распределения анизотропных свойств и их согласованность с простираем основных тектонических структур в области Сахалина.

Азимуты поляризации быстрой S -волны под станциями в центральной части острова ориентированы вдоль ССЗ и ССВ-СВ, поперек и вдоль Курильского желоба. Субширотные направления азимутов поляризации быстрой S -волны в области Крильон, Тонино-Анивского полуостровов и залива Анива согласуются с направлениями сжатия, обусловленными процессами растяжения в Татарском проливе и Курильской впадине. Разность времен прихода S -волн под станциями изменяется в диапазоне от 0.12 до 2 секунд. Наибольшая степень анизотропии среды до 0.9-1.5% фиксируется в центральной части Южного Сахалина. Максимальные значения δt отмечаются при ориентации азимутов поляризации быстрой S -волны вдоль ССЗ-СВ.

Результаты исследований параметров расщепленных S -волн свидетельствуют о неупругих свойствах среды, влиянии анизотропии затухания на параметры S -волн. Наблюдаемые различия параметров S -волн от глубокофокусных землетрясений указывают на горизонтальную неоднородность среды под Южным Сахалином во взаимосвязи с геометрией погружающейся плиты.

По данным от широкополосных станций в области Хоккайдо от Курильских глубокофокусных землетрясений и работам [6, 9], доминирующие частоты S -волн определяются около 0.5 Гц. Представленные результаты измерения параметров S -волн, полученные в частотном диапазоне 1-5 Гц, фактически отражают среднемасштабную анизотропию, формирующуюся в верхней части среды.

Автор благодарен Сахалинскому филиалу геофизической службы РАН за представление сейсмологических данных. Работа поддержана программой Президиума РАН (№16) и Президиума ДВО РАН (гранты №09-I-П16-10, № 09-III-A-08-443).

Список литературы

1. Граник В.М. Древние сейсмофокальные зоны Сахалина Владивосток: Дальнаука. 2003. 121 с.
2. Натальин Б.А., Фор М. Геодинамика восточной окраины Азии в мезозое // Тихоокеанская геология. 1991. №. 6. С. 3-23.
3. Рождественский В.С. Роль сдвигов в структуре Сахалина // Геотектоника. 1982. №. 4. С. 99-111.
4. Cerveny V., Psenchik I 2005. Plane waves in viscoelastic anisotropic media – I. Theory // Geophys. J. Int. 2005. V. 161. P. 197–212.
5. DeMets C. Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan trenches // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 17615-17625.
6. Fouch M.J., Fischer K.M. Mantle anisotropy beneath northwest Pacific plate // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. №. B7. P. 15987-16002.
7. Fukao Y., Widiyantoro S., Obayashi M. Stagnant slab in the upper and lower mantle transition region // Rev. Geophys. 2001. V. 39. P. 291-323.
8. Nakajima J., Shimizu J., Hori S., Hasegawa A. Shear wave splitting beneath the southwestern Kurile arc and northwestern Japan arc: A new insight into mantle return flow // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. №. 5. L05305.
9. Sandvol E., Ni J. Deep azimuthal seismic anisotropy in the southern Kurile and Japan subduction zones // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. №. B5. P. 9911-9922.