

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ МАНТИИ ВОСТОКА АЗИИ ПО ДАННЫМ SCS И S ВОЛН ОТ ГЛУБОКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*М.Н. Лулева, В.В. Пупатенко**ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000; e-mail: [margo@itig.as.khb.ru](mailto:margo@itig.as.khb.ru)*

Поступила в редакцию 3 июля 2015 г.

Проведены исследования сейсмической анизотропии мантии по данным *S* волн и *ScS* волн от землетрясений из переходной зоны мантии за период 2007–2013 г. в области станций, расположенных на континентальной окраине Азии, о-ва Сахалин и южной части п-ова Камчатка. Результаты измерения азимутов поляризации быстрых *S* и *ScS* волн в области континентальной окраины Азии показывают их доминирование вдоль В-ЮВ направлений. По распределению параметров расщепленных *S* волн симметрия среды может быть описана в рамках трансверсально-изотропной модели среды с горизонтальной осью симметрии и может отвечать горизонтальному течению в верхней части мантии под Амурской плитой. Азимуты поляризации быстрой *ScS* волны, определенные в С-СВ направлениях в области станций в северной части о-ва Сахалин и Азии, могут отвечать наклонному течению в условиях косой субдукции и сложной геометрии погружающейся Тихоокеанской плиты. В области Южной Камчатки азимуты поляризации *S* и *ScS* волн от Охотского землетрясения (*M* 8.4) определены вдоль движения Тихоокеанской плиты. Азимуты поляризации быстрой *S* волны от афтершоков Охотского землетрясения и крупных событий 2008–2009 г. почти параллельны простиранию глубоководного желоба. Азимуты поляризации быстрой *ScS* волны от афтершоков определены вдоль движения Тихоокеанской плиты, но ортогонально от событий 2008–2009 годов. На основе распределения азимутов поляризации быстрой *S* волны симметрия среды может быть описана в рамках трансверсально-изотропной модели с наклоном оси симметрии ортогонально плоскости погружения плиты и ориентацией оси симметрии в западном направлении, ортогонально простиранию глубоководного желоба.

**Ключевые слова:** сейсмическая анизотропия, расщепление *ScS*, *S* волн, глубоководные землетрясения, Восток Азии, Курило-Камчатская зона субдукции

## ВВЕДЕНИЕ

В современных геодинамических исследованиях активно используются данные по сейсмической анизотропии, что обусловлено взаимосвязью деформационных процессов с анизотропными и реологическими свойствами среды. Важным направлением исследований является выявление конвективных течений в мантии, которые определяют движение литосферных плит. Большинство экспериментальных работ направлены на изучение скоростной анизотропии и поляризации сейсмических волн. Наиболее информативным является метод расщепления поперечных волн, основанный на распространении в анизотропной среде двух поперечных волн с разной скоростью и ортогональной поляризацией. Основные параметры расщепленных волн – азимут поляризации быстрой волны ( $\phi$ ) и время задержки волн ( $\delta t$ ) – содержат ин-

формацию о направленности деформаций и степени анизотропии среды. Деформации в условиях верхней мантии рассматриваются в рамках модели вязкопластического течения с преимущественной ориентацией кристаллической решетки оливина LPO (lattice preferred orientation), обусловленной дислокационным скольжением вдоль одной из возможных систем скольжения кристаллической решетки с наименьшим сопротивлением деформации сдвига [10, 12–14]. В зависимости от термодинамических условий, скорости деформаций и водонасыщенности мантии текстура оливина (тип LPO) может изменяться. В рамках ромбической симметрии среды оси симметрии  $a$  [100],  $b$  [010] и  $c$  [001] в кристалле оливина определяются как быстрая, медленная и средняя по скорости распространения продольной волны вдоль осей. В сухой мантии  $a$ -ось оливина (А-тип LPO) с максимальной

скоростью продольной волны ориентируется параллельно деформациям простого сдвига, линиям течения в плоскости (010). В водосодержащей мантии при высоком уровне напряжений  $c$ -ось оливина ориентируется по течению в сдвиговой плоскости (010) (В-тип LPO), а в мантии при условии средних напряжений и высокого содержания воды  $c$ -ось оливина направлена по течению в сдвиговой плоскости (100) (С-тип LPO). В условиях низких напряжений и высокого содержания воды  $a$ -ось оливина ориентируется по течению (Е-тип LPO) в сдвиговой плоскости (001), ортогональной  $c$ -оси оливина. В условиях горизонтального течения все типы текстуры оливина, кроме В-типа, могут формироваться в верхней мантии. В условиях наклонных или восходящих течений проявляются текстуры оливина В-, С- или Е-типа в области конвективных течений в мантийном клине в задуговой зоне субдукции [14, 20].

Исследования распределения параметров расщепленных поперечных волн разного типа от местных и удаленных землетрясений показывают хорошую согласованность сейсмической анизотропии с данными измерения абсолютного движения плит в области океанов, где развиваются преимущественно горизонтальные течения в астеносфере [4]. Более сложная картина распределения параметров расщепленных поперечных волн наблюдается в задуговой области зон субдукции, где может проявляться латеральная и вертикальная неоднородность анизотропии и реологических свойств мантии [20]. Исследования в зонах субдукции Тихого океана показывают разнообразие в направлениях поляризации быстрой  $S$  волны, величине задержки и степени анизотропии вдоль зон субдукции и при движении от глубоководного желоба к задуговой области. Предложен ряд моделей, которые учитывают трехмерное течение в мантийном клине, в области погружающейся плиты, а также скорость и направление миграции субдуктирующей плиты и глубоководного желоба [20, 27, 28]. Дискуссионными остаются вопросы о природе анизотропии в переходной зоне мантии, верхней части нижней мантии, а также о направленности течений в области погружающейся плиты [6, 7, 18, 29].

Исследования параметров расщепленных  $S$  волн разного типа от местных землетрясений в задуговой области Японской и Курило-Камчатской зон субдукции указывают на сложную картину их изменения в пространстве и проявление неоднородности анизотропных свойств [21, 33]. В области сочленения Японской и Курильской дуг Тихоокеанская плита погружается в северо-западном направлении ( $300^\circ$ ) в мантию и выполаживается на глубине 400–650 км, протягиваясь вдоль переходной зоны мантии на рас-

стояние около 1000 км. Под Охотским морем Тихоокеанская плита погружается до глубины 700 км с образованием впадины с простираем вдоль о. Сахалин. Анализ распределения параметров расщепленных поперечных волн от глубоководных и удаленных землетрясений приводит к неоднозначной интерпретации природы анизотропии, которая может быть связана с анизотропией верхней мантии, переходной зоны мантии или с деформациями, вызванными движением плиты.

Данная работа посвящена исследованию сейсмической анизотропии мантии по данным расщепленных прямых  $S$  волн и  $ScS$  волн, отраженных от внешнего земного ядра, от крупных глубоководных землетрясений из переходной зоны мантии в области станций, расположенных вдоль континентальной окраины Востока Азии, в области центральной и северной части острова Сахалин и южной части полуострова Камчатка.

Сейсмическая анизотропия восточной части Азии остается малоизученной. В области Южного Сахалина проводились измерения  $S$  волн от средних и глубоких землетрясений, а также  $SKS$ ,  $SKKS$ ,  $PKS$  волн, зарегистрированных в период 1992–1995 гг. станцией YSS IRIS (г. Южно-Сахалинск) [8, 9]. Результаты измерений показали, что азимуты быстрой волны доминируют в интервале от  $-13^\circ$  до  $18^\circ$  и согласуются с простираем сдвиговых систем Сахалина, но круто отклонены от направления движения Тихоокеанской плиты. Время задержки волн изменяется в диапазоне 0.4–1.35 с. Увеличение времени задержки волн с увеличением глубины событий под Сахалином предполагает проявление анизотропии мантии с коэффициентом 0.5 % на глубине 500–600 км.

Исследования сейсмической анизотропии под восточной частью Азии и Охотским морем до глубины 780 км на основе детальной сейсмической томографии  $P$  и  $S$  волн показали понижение скорости  $P$  и  $S$  волн в области метастабильного оливина в переходной зоне мантии, а также изменение направления максимальной скорости  $P$  волны по глубине [32]. Под Приморьем и западной частью Хоккайдо направления максимальной скорости  $P$  волны доминируют в В-ЮВ направлениях в интервале глубин 100–660 км, а под Южным и Центральным Сахалином, восточной частью Азии, севернее Приморья, вдоль ССЗ-ССВ направлений на глубине 250–780 км. Предполагается, что существование области метастабильного оливина с пониженными скоростями сейсмических волн в плите может приводить к уменьшению скорости погружения плиты, ее стагнации и генерированию глубоких землетрясений взбросового типа [11, 32].

В области Южной Камчатки измерения параметров  $S$  волн от местных землетрясений с глубины до 150–200 км в области станции PET IRIS и  $ScS$  волн от широкофокусных сильных землетрясений 2013 г. показали доминирование азимутов поляризации быстрой  $ScS$  волны в В-ЮВ направлениях [1, 2, 17, 22]. По данным измерения  $SKS$  волн, азимуты поляризации ориентированы параллельно желобу под восточной частью Камчатки, но поперек желоба в ее западной части и в области сочленения с Алеутской дугой [24].

#### ДАнные И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Проведены измерения параметров расщепленных  $S$  и  $ScS$  волн от широкофокусных землетрясений с магнитудой  $M > 4.5$  с глубины больше 400 км за период 2007–2013 гг. в области станций, расположенных на российской континентальной окраине Азии, о. Сахалин и п-ове Камчатка. Параметры землетрясений выбраны из каталога NEIC. В исследовании использовались записи землетрясений, зарегистрированные станциями сети Сахалинского филиала Геофизической службы РАН, станцией PET международной сети IRIS Камчатского филиала Геофизической службы РАН и станцией VNN1 Единой сети деформационных и сейсмологических наблюдений ДВО РАН.

В исследовании использовались записи  $S$  и  $ScS$  волн от событий с эпицентральным расстоянием до  $6^\circ$  и с ограничением угла выхода  $S$  волн докритическим углом выхода волн ( $35^\circ$ ) на границе земной поверхности. Измерения параметров расщепленных поперечных волн проводились в области доминирующих частот 0.02–0.1 и 0.05–0.1 Гц. Время прихода и угол выхода волн, вычисляемый по функции лучевого параметра, определялись в рамках скоростной модели Земли iasp91 [15] по программе TauP-2.1.1 [5].

Задачей исследования является восстановление линейной поляризации быстрой  $S$  волны  $\varphi$  из эллиптически поляризованного смещения частицы и времени задержки волн  $\delta t$ . Определение параметров  $S$  волн проводится в лучецентрированной системе координат LQT [31]. Ось L ориентирована вдоль лучевого направления распространения волны на станцию. Плоскость QT ортогональна к направлению луча L с радиальной компонентой Q в направлении на событие.

Для измерения оптимальных параметров расщепленных  $S$  волн применены два метода: 1) метод взаимной корреляции волновых форм (RC-Rotation Correlation); 2) метод сингулярного разложения ковариационной матрицы вектора смещений на собственные значения (EV- Eigen Value) [3, 30]. В основе этих методов лежит поиск оптимальных параметров  $\varphi$ ,  $\delta t$  расщепленных  $S$ -волн по сетке с вращением ортогональных компонент волновой записи с изменением

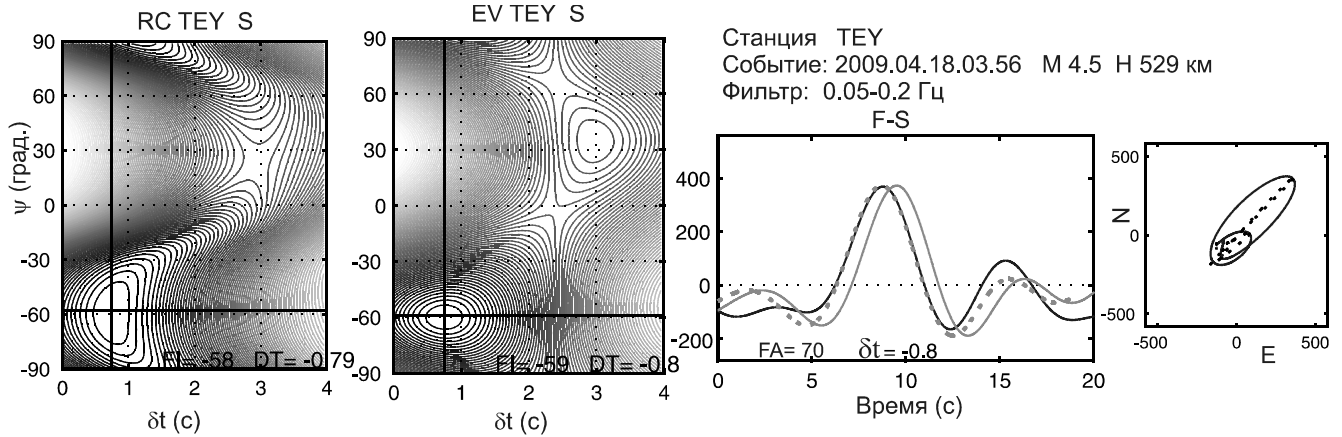
времени задержки  $S$  волн. В результате формируется двумерная функция коэффициентов корреляции волновых форм и собственных значений. Оба метода эффективно используются при измерении параметров расщепленных волн от местных и удаленных землетрясений в широком диапазоне частот и показывают расхождение в пределах  $\varphi \pm 3^\circ$  и  $\delta t \pm 0.2$  с [34].

При измерении параметров прямых  $S$  волн и отраженных от внешнего ядра  $ScS$  волн, распространяющихся в мантии, начальная поляризация волны неизвестна. В этом случае начальная поляризация может быть выбрана в направлении радиальной оси Q, направлении станция–эпицентр, а затем уточнена по данным фокальных механизмов или на основе метода собственных значений по максимальному собственному значению смещения частицы.

Важной задачей в определении точности измерений волновых параметров является оценка уровня шума и минимизация его влияния. С целью уменьшения влияния помех применен метод минимизации функции помехи, предложенный Vecsey, Plomerova, Babuska [31]. Точность измерения параметров  $\varphi$  и  $\delta t$  определяется статистически по гистограммам, построенным по функциям RC и EV [25, 31]. Для обоих параметров определяются средние значения и стандартные отклонения на уровне 95 % вероятности, а также оцениваются визуально волновые формы на ортогональных компонентах записи и диаграмма смещения частицы до и после коррекции.

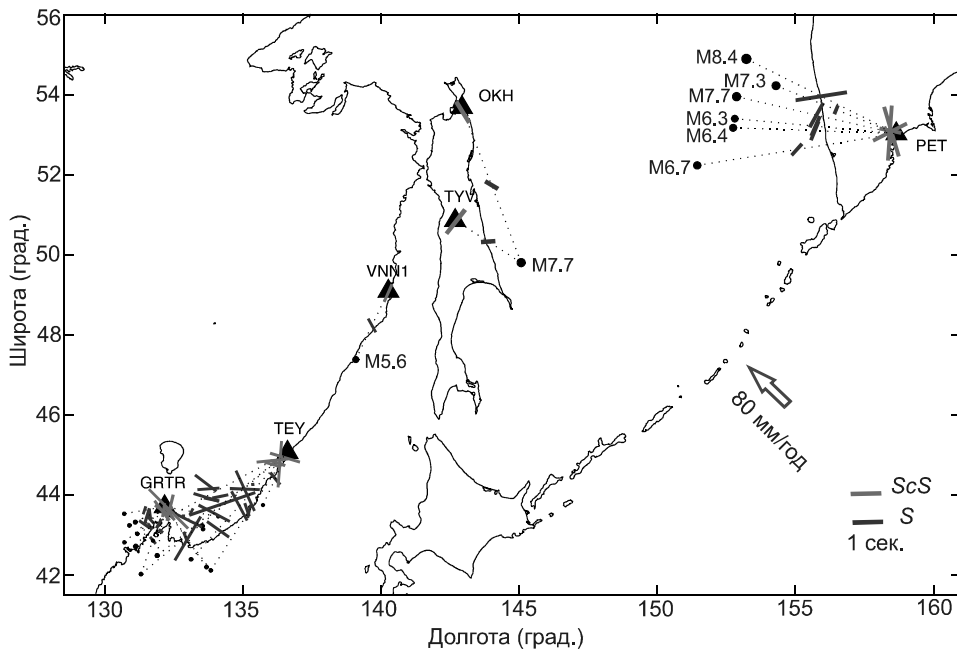
По качеству измерения параметров расщепленных поперечных волн проводится деление на категории [19, 33, 34]. Хорошее качество измерения параметров волн характеризуется высоким отношением сигнал/шум, четкостью волновых форм, отражающих начальное эллиптическое смещение частицы и линейное после коррекции, а также стандартное отклонение  $\delta t \pm 0.5$  с и  $\varphi \pm 10^\circ$ . Среднее качество определяется понижением корреляции волновых форм и увеличением стандартного отклонения  $\delta t \pm 1.0$  с,  $\varphi \pm 20^\circ$ . Низкое качество измерений параметра  $\varphi$  или  $\delta t$  может быть связано с проявлением локального экстремума функции на краю области и/или повышенным уровнем шума. Несущественный результат характеризуется проявлением четких волновых форм, начальной линейной или близкой к линейности траектории смещения частицы. Результат в данном случае указывает на отсутствие анизотропии среды или на то, что начальная поперечная волна уже поляризована в направлении быстрой или медленной волны или оси симметрии среды.

На рис. 1 показан пример результата измерения расщепленных  $S$  волн в области станции TEY, расположенной в Приморском крае, от широкофокусного



**Рис. 1.** Пример измерения параметров расщепленных *S* волн в области станции TEY от глубоководного землетрясения.

Слева: карты распределения коэффициентов корреляции волновых записей (RC) и собственных значений вектора смещений (EV) с определением локального экстремума функции и оптимальных параметров FI, DT. В центре – записи смещений быстрой волны (Fast, черный) и медленной волны (Slow, серый) с коррекцией медленной волны на величину задержки (пунктир). Параметр FA – направление поляризации быстрой *S* волны. Справа – проекции смещения частицы до коррекции (сплошная линия) и после коррекции (пунктир).



**Рис. 2.** Распределение параметров расщепленных *S* и *ScS* волн в области станций Востока Азии, о. Сахалин и п-ова Камчатка.

Треугольники указывают положение станций, стрелка показывает направление абсолютного движения ( $300^\circ$ ) и скорость Тихоокеанской плиты.

землетрясения ( $M 4.5$ ,  $H 529$  км, 2009.04.18.03.56). Результат измерения расщепленных *S* волн в рамках RC, EV методов показывает различие  $1^\circ$  в определении направления поляризации быстрой волны  $\phi$  и  $0.01$  с в определении времени задержки волн  $\delta t$ . Стандартное отклонение направления быстрой волны и времени задержки определены в пределах  $\phi \pm 9^\circ$  и  $\delta t \pm 0.35$  с.

**РЕЗУЛЬТАТЫ**

Общая картина распределения азимутов поляризации быстрой *S* и *ScS* волн с учетом времени задержки волн от глубоководных землетрясений за период 2007–2013 гг. под континентальной частью Азии, о. Сахалин и п-овом Камчатка показана на рис. 2. Азимуты поляризации *S* волн вынесены к середине расстояния

эпицентр–станция с учетом времени задержки волн. Данные  $ScS$  волн с учетом их почти вертикального угла выхода отнесены к координатам станций. В области континентальной части Азии проведены измерения параметров  $S$  и  $ScS$  волн от местных глубокофокусных землетрясений с глубины 442–575 км в области станций GRTR

(п. Горнотаежное) и ТЕУ (п. Терней), расположенных в Приморском крае, и станции VNN1 (п. Ванино).

### Восток континентальной Азии

Результаты измерения параметров расщепленных  $S$  и  $ScS$  волн в области станций GRTR и ТЕУ показаны на рис. 3, 4. На врезках показаны гисто-

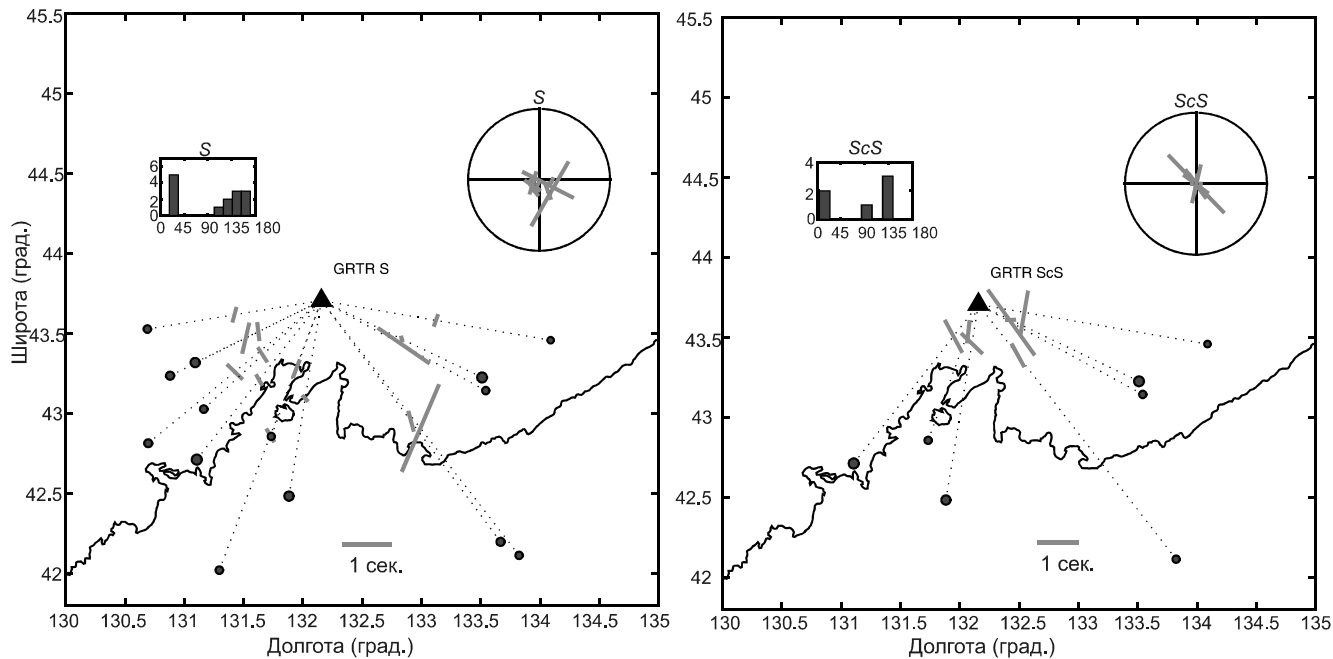


Рис. 3. Распределение параметров  $S$  и  $ScS$  волн и эпицентров землетрясений в области станции GRTR.

Азимуты поляризации быстрой  $S$  волн показаны отрезками, отнесенными на середину луча эпицентр–станция, с учетом времени задержки волн. Ближе к положению станции показаны азимуты поляризации быстрой  $ScS$  волны. На врезках показаны гистограммы распределения азимутов поляризации  $S$  и  $ScS$  волн и ориентация поляризации  $S$  и  $ScS$  волн в стереографической проекции в зависимости от азимута станция–эпицентр и угла падения с учетом времени задержки волн.

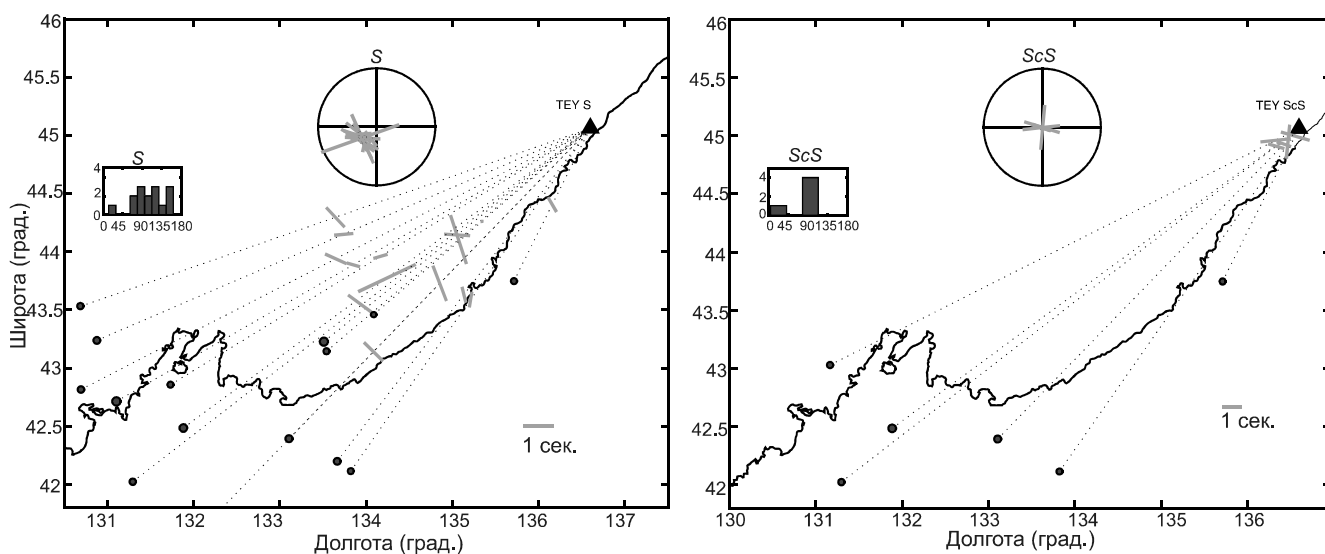


Рис. 4. Распределение параметров  $S$  и  $ScS$  волн и эпицентров землетрясений в области станции ТЕУ. Условные обозначения те же, что на рис. 3.

граммы распределения  $\phi$  и ориентация поляризации быстрой  $ScS$  и  $S$  волн с учетом времени задержки в стереографической проекции. В области станции GRTR азимуты поляризации быстрой  $S$  волны доминируют вдоль восточных направлений  $120\text{--}145^\circ$  и вдоль северо-восточных направлений  $17\text{--}30^\circ$ . Время задержки  $S$ -волн изменяется в интервале  $0.4\text{--}2.1$  с со средними значениями  $0.5\text{--}0.8$  с. Азимуты поляризации  $ScS$  волны доминируют вдоль восточных направлений  $80\text{--}145^\circ$ , а  $\delta t$  изменяется в диапазоне  $0.3\text{--}1.1$  с.

В области станции TEY азимуты поляризации  $S$  и  $ScS$  волн доминируют вдоль восточных направлений  $90\text{--}140^\circ$ . Время задержки  $S$  волн изменяется в интервале от  $0.5$  до  $2.8$  с, а  $ScS$  волн – от  $0.3$  до  $1.3$  с. Наиболее высокие значения  $\delta t$  проявляются от событий, произошедших в период  $2007\text{--}2008$  гг., в постсейсмический период Симуширских землетрясений ( $M 8.3$ ,  $15.11.2006$ ;  $M 8.1$ ,  $13.01.2007$ ).

В области станции VNN1 параметры волн  $ScS$  и  $S$  определены от глубокофокусного землетрясения ( $2012.07.29$ ,  $H 502$  км,  $M 5.6$ ). Азимут поляризации быстрой  $S$  волны определен вдоль ЮВ направления ( $153^\circ$ ), а время задержки волн составляет  $0.65$  с. Азимут поляризации быстрой  $ScS$  волны определен в ССВ направлении ( $23^\circ$ ), и время задержки  $\delta t$  оценено  $0.8$  с (рис. 2).

В целом, азимуты поляризации быстрой  $S$  и  $ScS$  волн от глубокофокусных событий под континентальной частью Азии доминируют в интервале В-ЮВ ( $80\text{--}140^\circ$ ) направлений и согласуются с текстурой оливина А-, С- или Е-типа. Проявление азимуты поляризации быстрой  $S$  волны вдоль С-СВ направлений может быть связано с изменением реологического состояния мантии или литосферы. По распределению азимуты поляризации быстрой  $S$  волны симметрия среды может быть описана в рамках трансверсально-изотропной модели среды с горизонтальной осью симметрии и ориентацией плоскости симметрии в ЮВ направлении и может отвечать горизонтальному течению в верхней части мантии под Амурской плитой.

### Сахалин

В области острова Сахалин измерения параметров  $S$  и  $ScS$  волн проведены от глубокофокусного землетрясения под Охотским морем ( $2012.08.14$ ,  $H 583$  км,  $M 7.7$ ) по записям станций TYV (п. Тымовское) и ОКН (г. Оха).

В области северной станции ОКН азимуты поляризации быстрой  $ScS$  и  $S$  волн определены  $328^\circ$  и  $302^\circ$ , а время задержки  $1.03$  и  $0.62$  с, соответственно. Азимуты поляризации быстрой волны согласуются с направлением движения Тихоокеанской плиты ( $300^\circ$ ) (рис. 2).

Азимут поляризации быстрой  $S$  волны в области станции TYV определен вдоль западного направления  $267^\circ$ , а время задержки волн оценено  $0.58$  с. Азимут поляризации быстрой  $ScS$  волны определен вдоль С-СВ направления ( $37^\circ$ ), а время задержки волн  $1.25$  с. Азимут быстрой  $ScS$  волны ортогонален к движению Тихоокеанской плиты, как и в области станции VNN1 (рис. 2). Наблюдаемые ориентации азимуты поляризации быстрой  $ScS$  волны в области станций TYV и VNN1 могут отвечать наклонному течению в условиях косо́й субдукции и сложной геометрии погружающейся Тихоокеанской плиты.

### Южная Камчатка

В области станции PET IRIS проведено измерение параметров расщепленных  $ScS$  и  $S$  волн от мощного Охотского землетрясения ( $2013.05.24$ ,  $M_w 8.4$ ,  $H 603$  км), двух его сильных афтершоков, а также трех сильных землетрясений, произошедших в  $2008\text{--}2009$  гг. ( $2008.07.05.02$ ,  $H 646$  км,  $M 7.7$ ;  $2008.11.24.09$ ,  $H 505$  км,  $M 7.3$ ;  $2009.12.10.02$ ,  $H 653$  км,  $M 6.3$ ) в переходной зоне мантии Камчатской зоны субдукции.

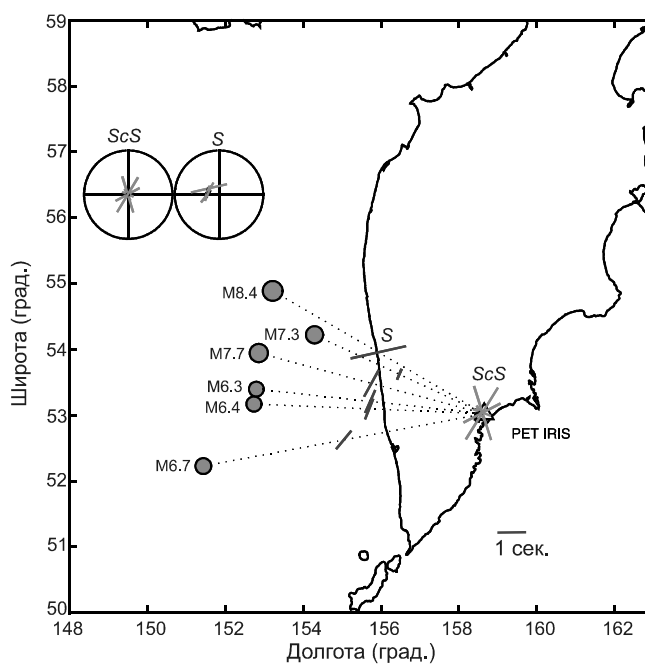


Рис. 5. Распределение параметров  $S$  и  $ScS$  волн и эпицентров землетрясений в области станции PET.

Азимуты поляризации быстрой  $S$  волны показаны отрезками, отнесенными на середину луча эпицентр–станция с учетом времени задержки расщепленных волн. Ближе к положению станции показаны азимуты поляризации  $ScS$  волны. На врезках показано распределение азимуты поляризации  $S$  и  $ScS$  волн с учетом времени задержки волн в стереографической проекции в зависимости от азимута станция–эпицентр и угла падения.

Результаты измерения параметров  $S$  и  $ScS$  волн от глубоководных событий представлены на рис. 5.

По данным измерения азимуты поляризации быстрой  $S$  и  $ScS$  волн от Охотского землетрясения определены в восточных направлениях  $77^\circ$  и  $112^\circ$ , а задержки волн  $\delta t$  достигают значений 2.1 и 0.9 с, соответственно. Азимуты поляризации  $ScS$  волн от афтершоков ориентированы поперек простирания желоба  $152^\circ$  и  $153^\circ$  с задержкой волн 0.7 и 0.9 с. Азимуты поляризации быстрой  $S$  волны от афтершоков Охотского землетрясения и событий 2008–2009 гг. параллельны простиранию желоба ( $22\text{--}39^\circ$ ), а изменяются в интервале 0.45–1.2 с. От крупных событий 2008–2009 гг. азимуты поляризации быстрой  $ScS$  волны определены параллельно или ортогонально к простиранию желоба  $59^\circ$ ,  $163^\circ$  и  $31^\circ$ , а  $\delta t$  достигают более высоких значений 1.3–1.9 с. По данным распределения параметров расщепленных  $S$  волн симметрия среды может быть описана в рамках трансверсально-изотропной модели с наклоном оси симметрии ортогонально плоскости погружения плиты ( $50^\circ$ ) и ориентацией оси симметрии в западном направлении ( $290 \pm 10^\circ$ ), ортогонально простиранию глубоководного желоба.

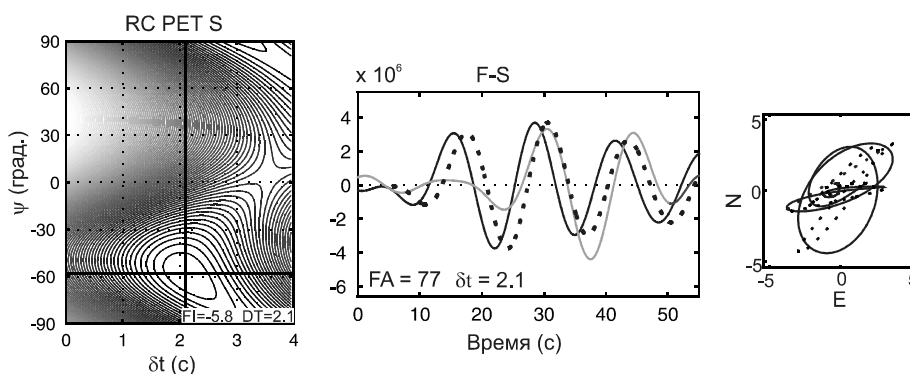
Различие параметров расщепленных  $ScS$  и  $S$ -волн от исследуемых событий могут отражать латеральную неоднородность среды, изменение во времени напряжений и вязкости внутри прочной холодной плиты в переходной зоне мантии. На основе анализа физики механизма землетрясений Zhan, Kanamori et al. [35] показано, что главный разрыв Охотского землетрясения распространялся в западном направлении со скоростью более 4 км/с и сопровождался серией субразрывов в период с 8 до 30 с вдоль простирания плиты в узкой зоне метастабильного оливина на глубине 565–624 км. Данный эффект хорошо проявляется в различии доминирующей частоты расщепленных  $S$  волн от Охотского землетрясения, в виде задержки вступления медленной волны, а также в длительности колебаний быстрой и медленной волн (рис. 6).

Азимуты поляризации  $ScS$  волн от Охотского землетрясения и его афтершоков согласуются с направлением движения Тихоокеанской плиты. Наблюдаемые азимуты поляризации быстрой  $S$  и  $ScS$  волн вдоль простирания желоба от событий 2008–2009 гг. могут отвечать текстуре оливина С- или Е-типа в условиях наклонного течения во флюидонасыщенном мантийном клине на глубине больше 120–150 км. Азимуты поляризации быстрой  $ScS$  волны вдоль простирания желоба могут также быть связаны с природой анизотропии в переходной зоне мантии и/или в верхней части нижней мантии

Наблюдаемые азимуты поляризации быстрой  $S$ ,  $ScS$  волн вдоль простирания желоба от глубоких землетрясений могут быть также связаны с унаследованной текстурой материала в погружающейся плите при отступлении прото-Курильской дуги и прото-Камчатки при открытии Охотского моря в период с позднего олигоцена до раннего миоцена [16, 23]. В случае отступления субдуктирующей плиты азимуты поляризации быстрой  $S$  и  $ScS$  волн ориентируются в соответствии с течением мантии вдоль желоба, а величина  $\delta t$  не зависит от скорости миграции желоба, но пропорциональна величине отступления/отката желоба [26, 28].

## ВЫВОДЫ

Проведены исследования сейсмической анизотропии мантии по данным расщепленных прямых  $S$  волн и  $ScS$  волн, отраженных от внешнего земного ядра, от крупных глубоководных землетрясений



**Рис. 6** Пример измерения параметров расщепленных  $S$  волн в области станции PET от Охотского землетрясения (2013, M 8.4).

Слева: карта распределения коэффициентов корреляции RC. В центре – волновые формы быстрой (Fast, черный) и медленной волны (Slow, серый) с коррекцией быстрой волны на величину  $\delta t$  (пунктир). Справа – проекции смещения частицы до коррекции (сплошная линия) и после коррекции (пунктир).

из переходной зоны мантии за период 2007–2013 гг. в области станций, расположенных вдоль континентальной окраины Востока Азии, о-ве Сахалин и южной части п-ова Камчатка. Измерения параметров расщепленных  $S$  волн и  $ScS$  волн в области станций континентальной Азии, а также в области Северного Сахалина проведены впервые.

Результаты анализа распределения азимутов поляризации быстрой  $S$  и  $ScS$  волн под станциями Приморья доминируют в интервале В-ЮВ (80–140°) направлений. По данным распределения параметров расщепленных  $S$  волн симметрия среды может быть описана в рамках трансверсально-изотропной модели среды с горизонтальной осью симметрии и отвечать горизонтальному течению в верхней части мантии под Амурской плитой.

В области Северного Сахалина азимуты поляризации  $ScS$  и  $S$  волн согласуются с направлением движения Тихоокеанской плиты. Азимут поляризации быстрой  $S$  волны в области станции ТУУ определен вдоль западного направления, а быстрой  $ScS$  волны вдоль С-СВ направления. Наблюдаемые ориентации азимутов поляризации быстрой  $ScS$  волны в области станций ТУУ и VNN1 могут отвечать наклонному течению в условиях косой субдукции и сложной геометрии погружающейся Тихоокеанской плиты.

В области станции РЕТ IRIS проведено измерение параметров  $ScS$  и  $S$  волн от мощного Охотского землетрясения (2013.05.24,  $M_w$  8.4,  $H$  603 км), двух его сильных афтершоков, а также трех сильных землетрясений, произошедших в 2008–2009 гг. в переходной зоне мантии. От Охотского землетрясения азимуты поляризации быстрой  $S$  и  $ScS$  волн определены в восточных направлениях 77 и 112°, вдоль продвижения Тихоокеанской плиты, а время задержки волн достигают значений 2.1 и 0.9 с, соответственно. Азимуты поляризации быстрой  $S$  волны от афтершоков Охотского землетрясения и событий 2008–2009 гг. ориентированы параллельно простиранию желоба. Азимуты поляризации быстрой  $ScS$  волны от афтершоков согласуются с направлением движения Тихоокеанской плиты, но поперек от крупных событий 2008–2009 гг. На основе распределения параметров расщепленных  $S$  волн симметрия среды может быть описана в рамках трансверсально-изотропной модели с наклоном оси симметрии ортогонально плоскости погружения плиты и ориентацией оси симметрии в западном направлении, ортогонально простиранию глубоководного желоба.

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований ДВО РАН “ДАЛЬНИЙ ВОСТОК” (грант ДВО РАН 15-I-2-014). Авторы выражают благодарность Сахалинскому филиалу ГС РАН за предо-

ставленные сейсмические данные, а также рецензенту за ценные замечания, которые способствовали улучшению рукописи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Лунева М.Н., Пупатенко В.В. Расщепление  $ScS$  и  $S$ -волн от глубоководного Охотского землетрясения 2013.05.24,  $M_w$  8.3 и его сильных афтершоков // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 28, № 6. С. 96–106.
3. Bowman J.R., Ando M. Shear-wave splitting in the upper-mantle wedge above the Tonga subduction zone // Geophys. J. RAS 1987. V. 88. P. 25–41.
4. Conrad C.P., Behn M.D., Silver P.G. Global mantle flow and the development of seismic anisotropy: differences between the oceanic and continental upper mantle // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. B07317. doi:10.1029/2006JB004608.
5. Crowell H.P., Owens T.J., Ritsema J. The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and raypath utilities // Seismol. Res. Lett. 1999. V. 70. P. 154–170
6. Faccenda M. Water in the slab: A trilogy // Tectonophysics. 2014. V. 614. P. 1–30.
7. Faccenda M. Mid-mantle seismic anisotropy around subduction zones // Phys. Earth Planet. Inter. 2014. V. 227. P. 1–19.
8. Fischer K.M., Fouch M.J., Wiens D.A., Boettcher M.S. Anisotropy and flow in Pacific subduction zone back-arcs // Pure Appl. Geophys. 1998. V. 151. P. 463–475.
9. Fouch M.J., Fischer K.M. Mantle anisotropy beneath northwest Pacific plate // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. N. B7. P. 15987–16002.
10. Holtzman B.K., Kohlstedt D.L., Zimmerman M.E. et al. Melt segregation and strain partitioning: implications for seismic anisotropy and mantle flow // Sci. 2003. N 301. P. 1227–1230.
11. Jiang G., Zhao D., Zhang G. Detection of metastable olivine wedge in the western Pacific slab and its geodynamic implications // Phys. Earth Planet. Inter. 2015. V. 238. P. 1–7.
12. Kaminski E., Ribe N.M. A kinematic model for recrystallization and texture development in olivine polycrystals // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. V. 89. P. 253–267.
13. Kaminski E., Ribe N.M. Time scales for the evolution of seismic anisotropy in mantle flow // Gechem. Geophys. Geosyst. 2002. V. 3. N. 1. 10.1029/2001GC000222.
14. Karato S., Jung H., Katayama I., Skemer P. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: new insight from laboratory study // Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. 2008. V. 36. P. 59–95.
15. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophys. J. Int. 1991. V. 105. P. 429–465.
16. Konstantinovskaya E.A. Arc-continent collision and subduction reversal in the Cenozoic evolution of the Northwest Pacific: An example from Kamchatka (NE Russia) // Tectonophysics. 2001. V. 333. P. 75–94. doi:10.1016/S0040-1951(00)00268-7.
17. Levin V., Droznin D., Park J., Gordeev E. Detailed mapping of seismic anisotropy with local shear waves in southeastern Kamchatka // Geophys. J. Int. 2004. V. 158. P. 1009–1023.



18. Litasov K.D., Shatskiy A., Ohtani E. Melting and subsolidus phase relations in peridotite and eclogite systems with reduced C-O-H fluid at 3-16 GPa // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2014. V. 391. P. 87–99.
19. Liu K.H., Gao S.S. Making reliable shear-wave splitting measurements // *Bull. Seismol. Soc. America*. 2013. V. 103, N. 5. P. 2680–2693. doi: 10.1785/0120120355
20. Long M. D., Becker T.W. Mantle dynamics and seismic anisotropy // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. V. 297. P. 341–354.
21. Long M. D., Wirth E.A. Mantle flow in subduction systems: The mantle wedge flow field and implications for wedge processes // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. V. 118. doi:10.1002/jgrb.50063.
22. Luneva M.N., Lee J.M. Shear wave splitting beneath South Kamchatka during 3-year period associated with the 1997 Krontotsky Earthquake // *Tectonophysics*. 2003. V. 374. P. 135–161.
23. Park J., Levin V., Lees J., Brandon M.T., Peyton V., Gordeev E., Ozerov A. A dangling slab, amplified arc volcanism, mantle flow and seismic anisotropy near the Kamchatka plate corner, Plate Boundary Zones / S. Stein, J. Freymueller, eds. // *AGU Geodynamics Series*. N. 30. AGU, Washington DC, 2002. P. 295–324.
24. Peyton V., Levin V., Park J., Brandon M.T., Lees J., Gordeev E., Ozerov A. Mantle flow at a slab edge: seismic anisotropy in the Kamchatka region // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 379–382.
25. Sandvol E., Hearn T. Bootstrapping shear-wave splitting errors // *Bull. Seismol. Soc.* 1994. V. 84. P. 1971–1977.
26. Schellart W.P., Jessell M.W., Lister G.S. Asymmetric deformation in the backarc region of the Kuril arc, northwest Pacific: New insights from analogue modeling // *Tectonics*. 2003. V. 22, N 5. P. 1047–1063, doi:10.1029/2002TC001473.
27. Schellart W.P., Stegman D.R., Freeman J. Global trench migration velocities and slab migration induced upper mantle volume fluxes: Constraints to find an Earth reference frame based on minimizing viscous dissipation // *Earth-Sci. Rev.* 2008. V. 88. P. 118–144.
28. Schellart W.P., Stegman D.R., Farrington R.J., Moresi L. Influence of lateral slab edge distance on plate velocity, trench velocity, and subduction partitioning // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. B10408. doi:10.1029/2011JB008535.
29. Schellart W.P., Moresi L. A new driving mechanism for backarc extension and backarc shortening through slab sinking induced toroidal and poloidal mantle flow: Results from dynamic subduction models with an overriding plate // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. 118. doi:10.1002/jgrb.50173.
30. Silver P., Chan W. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. N.10. P. 16429–16454.
31. Vecsey L., Plomerova J., Babuska V. Shear-wave splitting measurements: problems and solutions // *Tectonophysics*. 2008. V. 462. P. 178–196.
32. Wei W., Zhao D., Xu J., Wei F., Liu G. *P* and *S* wave tomography and anisotropy in Northwest Pacific and East Asia: Constraints on stagnant slab and intraplate volcanism // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2015. V. 120. P. 1642–1666. doi:10.1002/2014JB011254.
33. Wirth E., Long M. D. Frequency-dependent shear wave splitting beneath the Japan and Izu-Bonin subduction zones // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2010. V. 181. P. 141–154.
34. Wüstefeld A., Bokelmann G., Zaroli C., Barruol G. Splitlab: A shear-wave splitting environment in matlab // *Comput. Geosci.* 2008 V. 34. P. 515–528. doi:10.1016/j.cageo.2007.08.002.
35. Zhan Z., Kanamori H., Tsai V.C., Helmlinger D.V., Wei S. Rupture complexity of the 1994 Bolivia and 2013 Sea of Okhotsk deep earthquakes // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2014. V. 385. P. 89–96.

*Рекомендована к печати Б.В. Левиным*

### *M.N. Luneva, V.V. Pupatenko*

#### **Seismic anisotropy beneath Eastern Asia using ScS and S waves of local deep-focus earthquakes**

Seismic anisotropy has been studied using data of S and ScS waves from earthquakes occurred in the mantle transition zone and recorded at stations located on the Asian continental margin, the Island of Sakhalin and the southern part of the Kamchatka Peninsula during 2007–2013. The measurement results of the fast azimuths of S and ScS waves obtained in area of the Asian continental margin show that these waves dominate along the E-SE directions. According to S wave splitting parameter distribution, the symmetry of the medium can be described within the framework of the transversally-isotropic medium with the horizontal symmetry axis and may agree with the horizontal current in the upper mantle beneath the Amur Plate. The fast ScS wave azimuths determined in the NNE direction beneath stations located in the northern part of Sakhalin and Asia may agree with the inclined current due to oblique subduction of the Pacific Plate and the complex geometry of the downgoing plate. In southern Kamchatka, the azimuths of fast S and ScS waves from the M 8.4 Okhotsk earthquake have been determined along the Pacific plate motion. The azimuths of fast S waves from the aftershocks of the Okhotsk earthquake and the 2008–2009 large events are sub-parallel to the trench strike. The azimuths of fast ScS waves from the Okhotsk earthquake aftershocks are determined along the Pacific plate motion, whereas those from the 2008–2009 events are orthogonal. Based on the fast ScS wave azimuth distribution, the symmetry of the medium can be described by the transversally-isotropic medium with the symmetry axis inclined orthogonally to the plane of the downgoing plate and the symmetry axis oriented westward and orthogonally to the trench strike.

**Key words:** seismic anisotropy, shear wave splitting, ScS, S waves, deep-focus earthquakes, Eastern Asia, Kuril-Kamchatka subduction zone.