

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ МАНТИИ ПОД АМУРСКОЙ ПЛИТОЙ ПО ДАННЫМ ScS 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

Поступила в редакцию 10 февраля 2017 г.

Проведены исследования сейсмической анизотропии мантии под Амурской плитой по данным ScS волн, отраженных от внешнего земного ядра, от местных глубоких землетрясений в области 5 станций, расположенных в Приморье и Приамурье. Результаты измерения параметров расщепленных ScS в области станций показывают доминирование азимутов поляризации быстрой волны вдоль восточных направлений и согласуются с азимутальной анизотропией и направлением движения Тихоокеанской плиты (300°) и Амурской плиты ($\sim 120^\circ$) в зависимости от направления эпицентр-станция. В Приморье области станции ТЕУ азимуты поляризации быстрой ScS волны доминируют в интервале направлений СВ-В, ортогонально к линиям течения мантии вдоль сложной трехмерной поверхности погружающейся Тихоокеанской плиты. Выявлено повышение времени задержки ScS волн с увеличением глубины событий до 2 с в области верхней мантии и до 3.4 с в переходной зоне мантии. Наиболее высокая степень анизотропии проявляется в верхней мантии. При вертикальном распространении волн в условиях горизонтального течения мантии разность времен прихода ScS волн минимальна. Анизотропия в верхней зоне переходной мантии может быть связана с текстурой вадслеита с поляризацией быстрой ScS волны параллельно или ортогонально движению стагнирующей плиты. В верхней части нижней мантии анизотропия связана с текстурой перовскита и периглаза с ориентацией оси симметрии и поляризацией ScS волн параллельно погружению плиты и направлению субдукции.

Ключевые слова: сейсмическая анизотропия, расщепление ScS волн, глубокофокусные землетрясения, Амурская плита, задуговая зона Курильской дуги, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования распространения сейсмических волн свидетельствуют о проявлении сейсмической анизотропии в условиях конвективно-го течения в мантии Земли. Сейсмическая анизотропия является внутренним свойством геологической среды и проявляется в зависимости свойств среды от направления распространения объемных и поверхностных волн разного типа. Сейсмическая анизотропия среды может быть обнаружена на основе эффекта расщепления объемной поперечной волны на две волны, которые распространяются с разной скоростью и поляризацией в ортогональных направлениях. Основными параметрами расщепленных S волн разного типа являются азимут поляризации быстрой волны (φ) и время задержки медленной волны (δt). Существенный вклад в изучение анизотропии мантии также связан с использованием в широком диапазоне периодов групповых скоростей SV и SH, определяемых из

скоростей волн Рэлея и Лява, распространяющихся в горизонтальных направлениях. Волны Лява, поляризованные в горизонтальной плоскости, распространяются с более высокой скоростью (SH), чем волны Рэлея (SV). Анизотропия среды определяется по соотношению скоростей волн Лява и Рэлея $\xi = V_{SH}/V_{SV}$. При соотношении $\xi > 1$ анизотропия отвечает трансверсально-изотропной азимутальной модели среды с горизонтальной осью симметрии (HTI), а при $\xi < 1$ – радиальной модели среды с вертикальной осью симметрии (VTI). Существование азимутальной и радиальной анизотропии обнаружено в различных слоях Земли [1–3].

Сейсмическая анизотропия проявляется в слоях с наиболее высоким уровнем напряжений и деформаций. Наиболее высокая степень анизотропии обнаружена в верхней мантии до глубины 410 км в условиях развития текстуры оливина (LPO) разного типа [12, 21]. В условиях азимутальной анизотропии все типы

LPO, кроме В-типа, могут продуцировать азимуты поляризации быстрой волны параллельно горизонтальному течению мантии. В условиях радиальной анизотропии в области зон субдукции предполагается развитие С-типа текстуры оливина с ориентацией с-оси оливина ортогонально к направлению течения мантии с отношением $V_{sv}/V_{sh} > 1$. По результатам исследований наиболее высокая анизотропия проявляется в области погружения тектонических плит.

Меньшая степень анизотропии проявляется в переходной зоне мантии и верхнем слое нижней мантии D (400–900 км), а также в нижней части мантии D'' [21, 36, 38, 39]. В верхней части переходной зоны вадслеит и гранат характеризуются слабой трансверсальной изотропией (2–3 %) с осью симметрии, ортогональной к плоскости падения плиты. Выделено два типа текстуры вадслеита Awd и Bwd с взаимно-ортогональными азимутами поляризации быстрой волны в сдвиговой плоскости относительно вертикальной оси [9, 13, 32, 33]. Нижний слой переходной зоны мантии, представленный рингвудитом, предполагается изотропным. Экспериментальные исследования при высоких температурах и давлении выявили пластическую анизотропию рингвудита без формирования текстуры [23]. В верхнем слое нижней мантии, представленной высоко анизотропным перовскитом и периклазом, выявлено повышение анизотропии с ориентацией оси симметрии вдоль поляризации быстрой S-волны и максимальной скорости V_p параллельно направлению погружения плиты и направлению субдукции [5, 36]. По данным поверхностных и объемных волн, а также времен прихода волн построена глобальная трехмерная модель анизотропии Земли, которая показывает повышение анизотропии в верхней части нижней мантии и более значительное повышение анизотропии в нижней части нижней мантии [16, 22]. Анизотропия в основании нижней мантии может быть вызвана наличием постперовскита (по данным экспериментальных лабораторных исследований) [25, 27, 30].

Данная работа посвящена исследованию сейсмической анизотропии мантии в задуговой зоне Японской и Курильской дуг по данным расщепленных ScS волн, отраженных от внешнего ядра Земли, от глубоководных землетрясений с магнитудой 4–6, происходящих в погружающейся плите в средней ее части и в переходной зоне мантии. Под восточной частью Азии в области сочленения Курильской и Японской дуг Тихоокеанская плита погружается в северо-западном направлении до глубины 660 км и выполаживается в переходной зоне мантии на расстоянии около 1100 км от глубоководного желоба [11, 18]. По дан-

ными детальной томографии под Южным Приморьем выявлена область метастабильного оливина в переходной зоне мантии с углом погружения плиты около 22° и понижением скорости продольных волн около 7–9 % относительно модели Земли IASP91 [14]. В переходной зоне мантии возможно уменьшение скорости погружения плиты, ее стагнация и генерирование крупных глубоководных землетрясений взбросового и сдвигового типа [8]. Тихоокеанская плита прослеживается в переходной зоне мантии до 120° в.д. и 55° с.ш. [41].

В исследовании использовались широкополосные сейсмические записи глубоководных землетрясений, зарегистрированных пятью широкополосными станциями STS-2 сети Сахалинского филиала Геофизической службы РАН за период 2007–2014 гг. Параметры землетрясений выбраны из каталога NEIC [26]. На рис. 1 а представлено расположение станций и эпицентров землетрясений, а на рис. 1 б показана верхняя поверхность погружающейся плиты в задуговой зоне южной части Курильской дуги. Важной задачей исследований является выявление направленности течений в мантии в условиях погружающейся плиты во взаимосвязи с направлением движения Тихоокеанской плиты (300°) и Амурской/Евразийской плиты.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

В исследовании использовались записи ScS волн от землетрясений средней глубины и глубоководных землетрясений из переходной зоны мантии. Измерения параметров расщепленных поперечных волн проводились в полосе частот 0.02–0.1 Гц. Время прихода и угол выхода волн, вычисляемый по функции лучевого параметра, определялись в рамках скоростной модели Земли IASP91 [14] по программе TauP-2.1.1 [7]. Задачей исследования является определение поляризации быстрой ScS волны ϕ из эллиптически поляризованного смещения частицы и времени задержки δt . Определение параметров S волн проводится в системе координат LQT [35]. Ось L ориентирована вдоль лучевого направления волны на станцию. Плоскость QT ортогональна к направлению луча L с радиальной компонентой Q в направлении станция-эпицентр.

Измерение оптимальных параметров расщепленных S волн проводилось на основе двух методов: 1) метод взаимной корреляции волновых форм (RC – Rotation Correlation); 2) метод сингулярного разложения ковариационной матрицы вектора смещений на собственные значения (EV – Eigen Value) [4, 40]. В основе методов лежит поиск оптимальных пара-

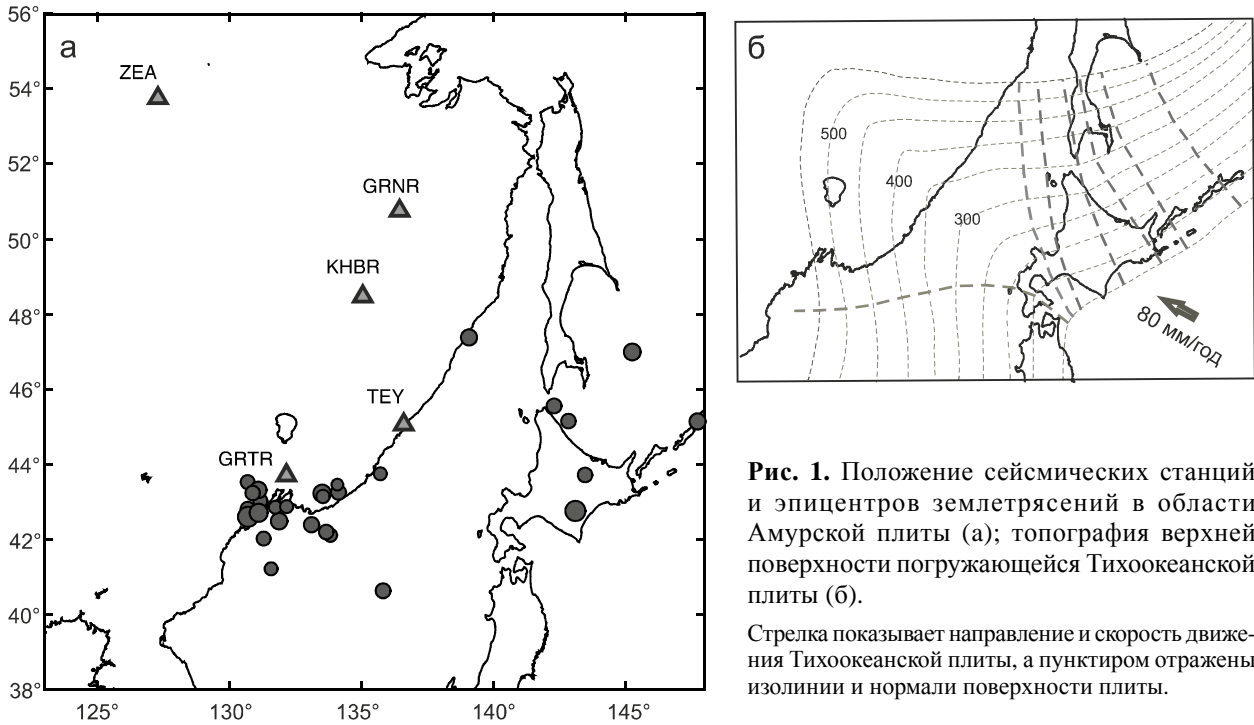


Рис. 1. Положение сейсмических станций и эпицентров землетрясений в области Амурской плиты (а); топография верхней поверхности погружающейся Тихоокеанской плиты (б).

Стрелка показывает направление и скорость движения Тихоокеанской плиты, а пунктиром отражены изолинии и нормали поверхности плиты.

метров расщепленных *S*-волн по сетке с вращением ортогональных компонент волновой записи на угол Ψ и изменением разности времени прихода волн δt . В результате формируется двумерная функция коэффициентов корреляции волновых форм и второго собственного значения. Оба метода эффективно используются при измерении параметров расщепленных волн от местных и удаленных землетрясений в широком диапазоне частот [40]. С целью уменьшения влияния шума в методах применен подход минимизации функции невязки [35]. Точность измерения параметров Ψ и δt определяется статистически по гистограммам, построенным по функциям невязки [29]. На рис. 2 показан пример результата измерения расщепленных *ScS* волн от двух глубокофокусных землетрясений в области станции GRTR. В результате измерения получаем два решения для быстрой волны: $\phi = D + \Psi$ и $\phi = D + \Psi + 90^\circ$, где D – заданное направление радиальной оси Q . Окончательные результаты измерения представляются в EHZ системе координат. Параметры *ScS* волн от данных событий определены $\phi = 82^\circ$, $\delta t = 1.5$ с и $\phi = 178^\circ$, $\delta t = 3.35$ с, соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты измерения параметров расщепленных *ScS* волн от выбранных землетрясений показывают различие азимутов поляризации быстрой волны и времени задержки волн в зависимости от положения станции. Станции GRTR и TEY расположены в При-

морье над зоной субдукции Тихоокеанской плиты, а станции ZEA, GRNR и KHBR расположены в Приамурье над зоной стагнирующей плиты в переходной зоне мантии на глубине 400–600 км (рис. 1 а). Статистическое распределение параметров расщепленных *ScS* волн в области станций GRTR и TEY представлено на рис. 3.

Распределение азимутов поляризации быстрой *ScS* волны с учетом времени задержки δt в области станций GRTR показано на рис. 3 а. Азимуты эпицентр-станция изменяются в пределах $\pm 90^\circ$ от направления на север (рис. 3 б). Азимуты поляризации быстрой *ScS* волны в области станции GRTR распределены в широком диапазоне направлений, но доминируют в интервале направлений В-ЮВ (3-С3) (рис. 3 б, в). Время задержки *ScS* волны изменяется в интервале 0.5–3.35 с. Максимальное время задержки δt определено вдоль С-Ю направления. Повышенные значения δt проявляются вдоль СВ-ЮЗ и ССЗ-ЮЮВ направлений. Оценка времени задержки *ScS* волн в зависимости от глубины событий показывает повышение δt с увеличением глубины событий в области погружающейся плиты в верхней мантии до 2 с и до 3.4 с в переходной зоне мантии (рис. 3 б).

Повышение δt от глубокофокусных событий может свидетельствовать о наличии анизотропии в верхней мантии, а также в верхней части переходной мантии и верхней части нижней мантии. Анализ распределения азимутов поляризации быстрой *ScS*

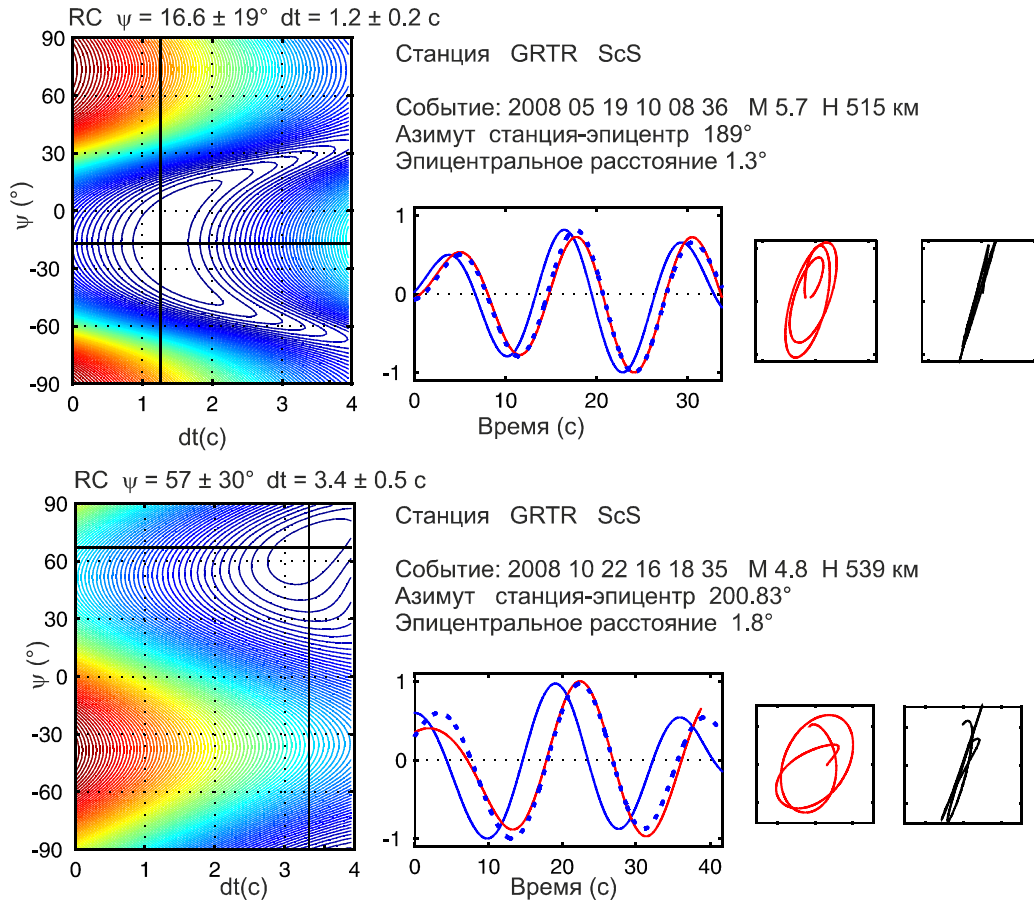


Рис. 2. Пример измерения параметров расщепленных ScS волн в области станции GRTR от двух глубокофокусных землетрясений.

Слева показана карта распределения функции невязки, рассчитанной на основе метода взаимной корреляции волновых записей (RC) с определением локального экстремума функции и оптимальных параметров ψ и δt со статистической оценкой их средних значений и стандартного отклонения. В центре показаны нормализованные волновые записи быстрой волны (черный цвет) и медленной волны (серый цвет) с коррекцией на время задержки δt (пунктир). Справа показаны проекции смещения частицы до и после коррекции.

волны от глубины событий показывает доминирование В-ЮВ направлений от событий из нижней зоны переходной мантии, а также СЗ-СЗ направлений от событий из верхней мантии и верхней зоны переходной мантии (рис. 3 в). Средние статистические значения параметров ϕ и δt оценены 296° и 1.4 с, соответственно. В целом, в области станции GRTR ϕ согласуются с направлением движения и погружения Тихоокеанской плиты на запад (рис. 1 а, б).

В области станции ТЕУ азимуты поляризации быстрой ScS волны распределены в широком диапазоне направлений, но доминируют в интервале СВ-В направлений (рис. 3 а). Максимальное время задержки ScS волн до 2–2.3 с определено вдоль диагональных направлений СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ. Время задержки ScS волн увеличивается с глубиной до 1.5 с в верхней мантии и до 2.3 с в переходной зоне мантии (рис. 3 б, в). Средние статистические значения параметров расще-

пленных волн ϕ , δt – 78° и 1.3 с, соответственно. Азимуты поляризации быстрой ScS волн в области станции ТЕУ доминируют в ортогональном направлении к движению Тихоокеанской плиты.

На рис. 4 а показано распределение азимутов поляризации быстрой ScS волны с учетом времени задержки δt в области станций ZEA, GRNR и KHBR, расположенных в Приамурье, в северной части Амурской плиты. В области станций азимуты эпицентр-станция распределены в достаточно узком интервале направлений ССЗ-ССВ. Общая картина распределения параметров расщепления ScS волн в области станций отражает доминирование азимутов поляризации быстрой волны вдоль СВ-ЮЗ и СЗ-ЮВ направлений. Максимальное время задержки δt определено до 2.95 с в области станции ZEA от события из верхней зоны переходной мантии вдоль азимута поляризации быстрой волны в северном направлении.

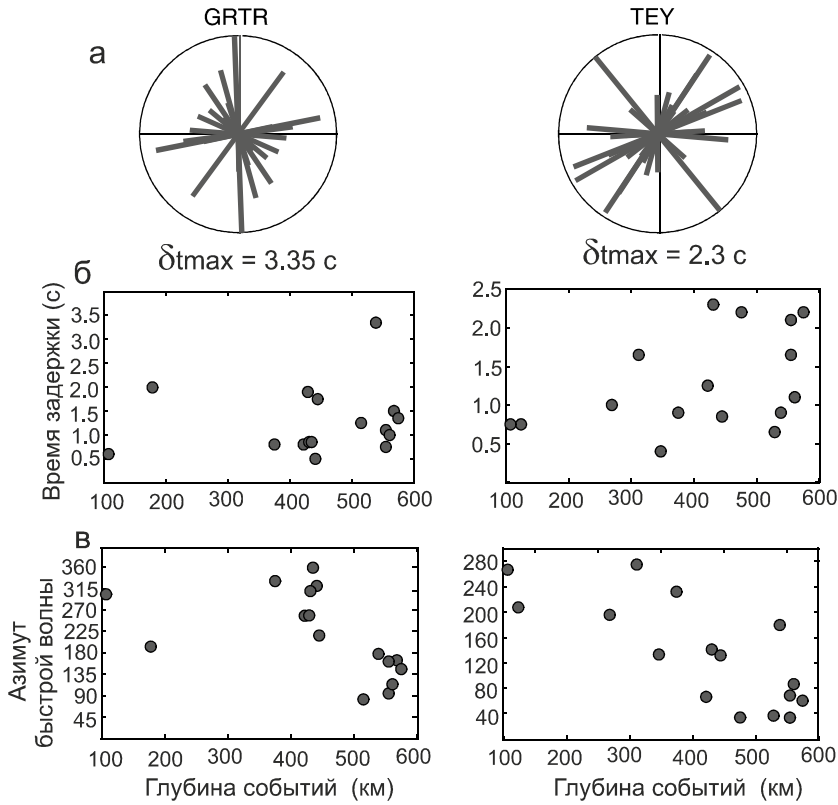


Рис. 3. Статистические оценки параметров расщепленных ScS волн в области станций GRTR и TEY.

а – распределение азимутов поляризации быстрой волны (φ) с учетом времени задержки (δt); б – распределение времени задержки (δt) в зависимости от глубины событий; в – распределение азимутов поляризации быстрой волны (φ) в зависимости от глубины событий.

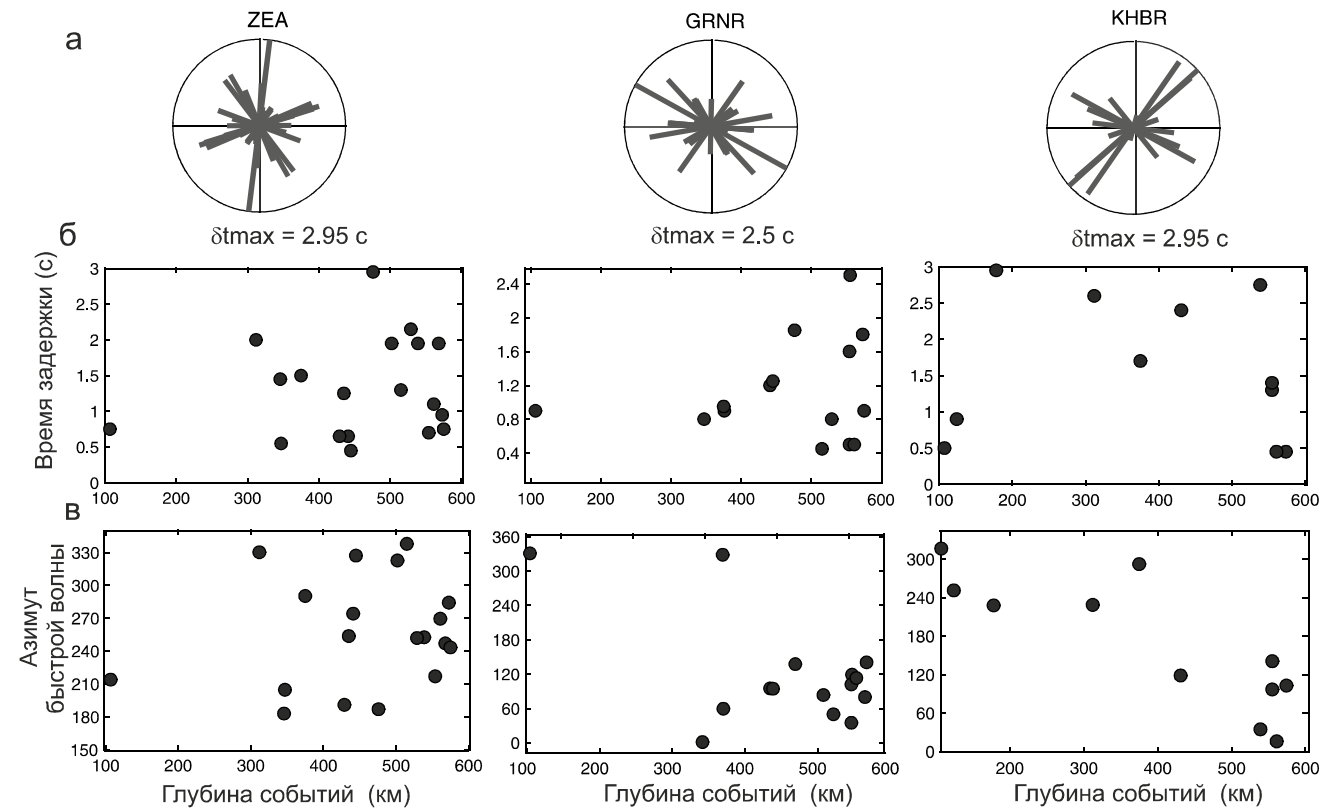


Рис. 4. Статистические оценки параметров расщепленных ScS волн в области станций ZEA, GRNR и KHBR.

а – распределение азимутов поляризации быстрой волны (φ) с учетом времени задержки (δt); б – распределение времени задержки (δt) в зависимости от глубины событий; в – распределение азимута поляризации быстрой волны (φ) в зависимости от глубины событий.

В области станции GRNR максимальная величина δt определена 2.5 с от события из нижней зоны переходной мантии вдоль СЗ-ЮВ направления (рис. 4 б, в). В области станции KHBR максимальное время задержки ScS волны до 2.95 с выявлено от события из верхней мантии. От события из нижней части переходной мантии максимальное время задержки волны 2.75 с определено в СВ направлении. В области станций ZEA, GRNR и KHBR средние статистические значения ϕ и δt – 260° и 1.3 с, 274° и 1.2 с, и 264° и 1.6 с, соответственно. В целом, азимуты поляризации быстрой ScS волн в области станций в Приамурье согласуются с направлением течения мантии вдоль движения Тихоокеанской плиты и Амурской плиты.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения параметров расщепленных ScS волн в области станций, расположенных в области Амурской плиты, показывают доминирование азимутов поляризации быстрой волны вдоль восточных или западных направлений.

В области станции GRTR азимуты поляризации быстрой волны согласуются с направлением движения Тихоокеанской плиты и отвечают азимутальной симметрии среды с горизонтальной осью симметрии (НТИ). Повышение времени задержки волн δt с увеличением глубины событий в области верхней мантии до 2с и переходной зоне мантии до 3.4 с свидетельствует о наличии анизотропии в верхней части переходной мантии и в верхней части нижней мантии. В области верхней мантии природа анизотропии связана с развитием А, Е или С типа текстуры оливина в условиях горизонтального течения.

В области станции TEY азимуты поляризации быстрой ScS волны доминируют в интервале СВ-ЮВ направлений. Максимальное время задержки ScS волн до 2–2.3 с определено вдоль направлений СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ. Время задержки ScS волн увеличивается с глубиной в верхней мантии до 2 с и переходной зоне мантии до 2.3 секунд. Азимуты поляризации быстрой ScS волны доминируют в интервале направлений СВ-В и отвечают модели радиальной анизотропии среды с осью симметрии, ортогональной линиям течения мантии вдоль сложной трехмерной поверхности погружающейся плиты.

В области сочленения Японской и Курильской дуг выявлены отклонения ϕ от направления вдоль погружения плиты, которые могут быть вызваны трехмерным нисходящим течением в мантии с учетом морфологии поверхности плиты [15]. В этом случае природа анизотропии связана с развитием текстуры оливина А-типа вдоль продвижения плиты

в верхней части мантии и с текстурой оливина Е- и С-типа с ортогональной ориентацией с-оси оливина вдоль направлений течения мантии над погружающейся плитой.

В области станций ZEA, GRNR и KHBR в Приамурье азимуты поляризации быстрой ScS волны доминируют в В-ЮВ направлениях и согласуются с азимутальной анизотропией среды с горизонтальной осью симметрии (НТИ). Время задержки ScS волн увеличивается с глубиной до 2–3 с в верхней мантии и до 2.5–3 с в переходной зоне мантии. Максимальная анизотропия среды проявляется в астеносфере в условиях развития текстуры оливина А, Е или С-типа. В области станций азимуты поляризации быстрой ScS волны согласуются с направлением движения Амурской плиты и Тихоокеанской плиты в зависимости от направления эпицентр-станция.

Минимальное время задержки ScS волн, распространяющихся вертикально, проявляется в условиях развития Awd или Vwd типа текстуры вадслеита в переходной зоне мантии с поляризацией ScS волн параллельно продвижению стагнирующей плиты [9, 22]. Более высокая анизотропия выявлена в верхней части нижней мантии с поляризацией ScS волн параллельно погружению плиты и направлению субдукции [5, 37].

В области исследуемых станций выявлено повышение времени задержки δt вдоль С, СВ и ЮВ направлений. Повышение времени задержки ScS волн вдоль С и СВ направлений в области станций может быть связано с анизотропией земной коры и литосферы [12, 21, 31, 34]. В верхней части земной коры азимуты поляризации быстрой ScS волны согласуются с направлением регионального сжатия, но во флюидонасыщенных зонах разломов ориентируются вдоль простирания разломов. В разломных зонах нижней части земной коры анизотропия связана с ориентацией высокоанизотропных минералов (слюда, амфиболы, серпентин и др.). Степень анизотропии в зонах разломов может достигать от 5 до 10 % в зависимости от глубины. Исследования в континентальных областях показывают сложный характер распределения параметров расщепленных волн, связанный с природой анизотропии мантии на различной глубине и неоднородным строением. Анизотропия континентальной литосферы определяется текстурой оливина А, С, а также D-типа при средних температурах в зависимости от содержания воды и уровня напряжений [12]. По сейсмическим и геодезическим данным в различных континентальных областях над зоной субдукции выявлен когерентный сдвиговый характер деформирования в коре и литосфере вдоль крупных разломов [34]. Азимуты поляризации быстрой волны,

определенные вдоль С-СВ направлений под восточной частью Амурской плиты, могут быть связаны с простиранием крупных разломов в коре и литосфере. Результаты измерения азимутов поляризации быстрой SKS волн в области станций региональной сети Китая под восточной частью Азии показали доминирование ϕ вдоль восточных направлений ($100\text{--}120^\circ$), которые согласуются с направлением движения Евразийской/Амурской плиты и Тихоокеанской плиты [20]. В области восточных станций ВJT, HNS, HAN, MDJ в южной части Амурской плиты выявлены азимуты поляризации быстрой волны вдоль С и СВ направлений, которые согласуются с простиранием геологических структур [19, 40].

ВЫВОДЫ

Проведены исследования сейсмической анизотропии мантии под Амурской плитой по данным расщепленных ScS волн, отраженных от внешнего земного ядра, от крупных глубоких землетрясений за период 2007–2014 гг. в области 5 широкополосных станций, расположенных в Приморье и Приамурье.

В области станции GRTR азимуты поляризации быстрой волны согласуются с направлением погружения плиты на запад и отвечают азимутальной анизотропии среды с горизонтальной осью симметрии. Повышение времени задержки ScS волн с увеличением глубины событий в области верхней мантии до 2 с и в переходной зоне мантии до 3.4 с свидетельствуют о наличии анизотропии в верхней части переходной мантии и верхней части нижней мантии.

В области станции TEY азимуты поляризации быстрой ScS волны доминируют в интервале СВ-В, ортогонально направлению движения Тихоокеанской плиты, и отвечают модели радиальной анизотропии. Максимальное время задержки ScS волн до 2–2.3 с определено вдоль СЗ и СВ направлений. Время задержки ScS волн увеличивается с глубиной событий в верхней мантии до 1.5 с и в переходной зоне мантии до 2.3 секунд. В этом случае природа анизотропии связана с развитием оливина А-типа в верхней части мантии и С-типа с ориентацией ортогонально к линиям течения мантии вдоль сложной трехмерной поверхности погружающейся Тихоокеанской плиты.

В области станций ZEA, GRNR и KHBR в Приморье азимуты поляризации быстрой ScS волны доминируют в восточных направлениях и согласуются с азимутальной анизотропией среды. В верхней мантии время задержки ScS волн увеличивается с глубиной до 2–3 с и до 2.5–3 секунд в переходной зоне мантии. В восточной части Амурской плиты проявляются азимуты поляризации быстрой волны вдоль С и СВ

направлений, которые согласуются с простиранием крупных разломов в Приморье и Приамурье.

При вертикальном распространении волн в условиях горизонтального течения мантии разность времен прихода ScS волн минимальна. Анизотропия в верхней зоне переходной мантии может быть связана с текстурой вадслеита с поляризацией быстрой ScS волны, отвечающей радиальной анизотропии. Более высокая анизотропия проявляется в условиях развития текстуры перовскита и периглаза в верхней части нижней мантии с ориентацией оси симметрии и поляризацией ScS волн параллельно погружению плиты и направлению субдукции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН при частичном финансировании Комплексной программой фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (проект 18-5-024). Авторы выражают благодарность Сахалинскому филиалу ГС РАН за предоставленные сейсмические данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яновская Т.Б., Кожевников В.М. Анизотропия верхней мантии Азиатского континента по групповым скоростям волн Рэлея и Лява // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 5. С. 622–629.
2. Becker T.W., Kellogg J.B., Ekstrom G., O'Connell R.J. Comparison of azimuthal seismic anisotropy from surface waves and finite-strain from global mantle-circulation models // Geophys. J. Int. 2003. V. 155. P. 696–714.
3. Becker T.W., Lebedev S., Long M.D. On the relationship between azimuthal anisotropy from shear splitting and surface wave tomography // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. B01306. doi:10.1029/2011JB008705.
4. 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.
5. Cordier P., Ungar T., Zsoldos L., Tichy G. Dislocation creep in MgSiO_3 perovskite at conditions of the Earth's uppermost lower mantle // Nature. 2004. N. 428. P. 837–840.
6. Chen W.P., Brudzinski M.R. Seismic anisotropy in the mantle transition zone beneath Fiji-Tonga // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, N. 13. P. 1682. doi:10.1029/2002GL016330.
7. Crotwell H.P., Owens T.J., Ritsema J. The TauP toolkit: Flexible seismic travel-time and raypath utilities // Seismol. Res. Lett. 1999. V. 70. P. 154–17.
8. 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.
9. Faccenda M. Mid mantle seismic anisotropy around subduction zones // Phys. Earth Planet. Inter. 2014. V. 227. P. 1–19.
10. Foley B. J., Long M. D. Upper and mid-mantle anisotropy beneath the Tonga slab // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L02303. doi:10.1029/2010GL046021.

11. Fukao Y., S. Widiyantoro S., Obayashi M. Stagnant slabs in the upper and lower mantle transition region // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39. P. 291–323.
12. 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.
13. Kawazoe T., Ohuchi T., Nishihara Y., Nishiyama N., Fujino K., Irifune T. Seismic anisotropy in the mantle transition zone induced by shear deformation of wadsleyite // *Phys. Earth. Planet. Inter.* 2013. V. 216. P. 91–98.
14. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Travel times for global earthquake location and phase identification // *Geophys. J. Int.* 1991. V. 105. P. 429–465.
15. 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, N 1. Q01003. doi:10.1029/2007GC001677.
16. Kustowski B., Ekstrom G., Dziewonski A.M. Anisotropic shear-wave velocity structure of the Earth's mantle: A global model // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. doi:10.1029/2007JB005169.
17. Lebedev S., van derHilst R.D. Global upper-mantle tomography with the automated multimode inversion of surface and S-wave forms // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 173. P. 505–518.
18. Li C., van der Hilst R. D. Structure of the upper mantle and transition zone beneath Southeast Asia from traveltimes tomography // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. B07308. doi:10.1029/2009JB006882.
19. Liu K.H., Gao S.S., Gao Y., Wu J. Shear wave splitting and mantle flow associated with the deflected Pacific slab beneath northeast Asia // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. B01305. doi:10.1029/2007JB005178.
20. Liu X.Q., Zhou H. K., Li H. S. Anisotropy of the upper mantle in Chinese mainland and its vicinity // *Acta Seismologica Sinica.* 2001. V. 14, N. 4. P. 359–370.
21. Mainprice D. Seismic anisotropy of the deep Earth from a mineral and rock physics perspective / Schubert G. (ed.) // *Treatise on geophysics.* Elsevier. Oxford. 2007. V. 2. P. 437–492.
22. Mainprice D., Tommasi A., Ferte D., Carrez P., Cordier P. Predicted glide system and crystal preferred orientations of polycrystalline silicate Mg-perovskite at high-pressure: implications for the seismic anisotropy in the lower mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 271. P. 135–144.
23. Miyagi L., Amulele G., Otsuka K., Du Z., Farla R., Karato S.I. Plastic anisotropy and slip systems in ringwoodite deformed to high shear strain in the Rotational Drickamer Apparatus // *Physics Earth Planet. Inter.* 2014. V. 228. P. 244–253.
24. Montagner J.P., Nataf H.C. A simple method for inverting the azimuthal anisotropy of surface waves // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91. P. 511–520.
25. Murakami M. K., Hirose K., Kawamura K., Sata N., Ohishi Y. Post-perovskite phase transition in MgSiO₃ // *Science.* 2004. N 304. P. 855–858.
26. NEIC, <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic>, United States Geological Survey, USA.
27. Oganov A.R., Ono S. Theoretical and experimental evidence for a post-perovskite phase of MgSiO₃ in the Earth's D'' layer // *Nature.* 2004. V. 430. P. 445–448.
28. Panning M., Romanowicz B. A three-dimensional radially anisotropic model of shear velocity in the whole mantle // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 167. P. 361–379.
29. Sandvol E., Hearn T. Bootstrapping shear-wave splitting errors // *Bull. Seismol. Soc.* 1994. V. 84. P. 1971–1977.
30. Shim S.H., Duffy T.S., Jeanloz R., Shen G. Stability and crystal structure of MgSiO₃ perovskite to the core-mantle boundary // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L10603. doi:10.1029/2004GL019639.
31. Silver P., Chan W. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96, N 10. P. 16429–16454.
32. Thurel E., Douin J., Cordier P. Plastic deformation of wadsleyite: III. Interpretation of dislocations and slip systems // *Phys. Chem. Miner.* 2003. V. 30. P. 271–279.
33. Tommasi A., Mainprice D., Cordier P., Thoraval C., Couvy H. Strain-induced seismic anisotropy of wadsleyite polycrystals and flow patterns in the mantle transition zone // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. B12405. doi:10.1029/2004JB003158.
34. Vaucher A., Tommasi A., Mainprice D. Fault (shear zone) in the Earth's mantle // *Tectonophysics.* 2012. V. 558–559. P. 1–27.
35. Vecsey L., Plomerova J., Babuska V. Shear-wave splitting measurements-problems and solutions // *Tectonophysics.* 2008. V. 462. P. 178–196.
36. Vinnik L.P., Romanowicz B., Stunff Y.L., Makeyeva L. Seismic anisotropy in the D'' layer // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 1657–1660.
37. Wenk H.R., Lonardelli I., Pehl J., Prakapenka V., Shen G., Mao H.K. In situ observation of texture development in olivine, ringwoodite, magnesiowuestite and silicate perovskite at high pressure // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 226. P. 507–519.
38. Wookey J., Kendall J.M., Rumpker G. Lowermost mantle anisotropy beneath the North Pacific from differential S–ScS splitting // *Geophys. J. Int.* 2005. N 161. P. 829–838.
39. Wookey J., Kendall J.M. Seismic anisotropy of post-perovskite and the lowermost mantle / K. Hirose et al. (Eds.), *Post-perovskite: the last mantle phase transition* // *Am. Geophys. Union.* 2007. P. 171–189.
40. 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.
41. Zhao L., Zheng T. Using shear wave splitting measurements to investigate the upper mantle anisotropy beneath the North China Craton: Distinct variation from east to west // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L10309. doi:10.1029/2005GL022585.
42. Zhao D., Ohtani E. Deep slab subduction and dehydration and their geodynamic consequences: Evidence from seismology and mineral physics // *Gondwana Res.* 2009. V. 16. P. 401–413.

M.N. Luneva, V.V. Pupatenko

Seismic mantle anisotropy beneath the Amur plate using ScS waves of local deep earthquakes

Seismic mantle anisotropy was investigated beneath the Amur plate using ScS waves from local deep earthquakes recorded at 5 stations in Primorye and Priamurye areas. The measurement results of the ScS shear wave splitting parameters show the dominant fast azimuths along the eastern directions (90–120°) and agreement with the azimuthal anisotropy and the Pacific and Amur plate motion directions. For TEY station (site Terney), the fast ScS wave polarizations dominate in NE-E normal to the downgoing Pacific plate motion and correspond to the radial anisotropic model with the symmetry axis normal to the slab dip and along strike directions of convective mantle flow. It has been revealed the ScS delay-time increase with the depth of events up to 2 s in the upper mantle and to 3.4 s in the mantle transition zone. The highest degree of anisotropy is manifested for various olivine-texture types in the upper mantle. The ScS time delays are minimum for vertically propagating waves in the case of the horizontal mantle flow. In the upper part of mantle transition zone, anisotropy may be associated with wadsleyite and fast ScS wave polarizations trench normal or trench parallel. Slightly stronger transverse isotropy develops in the upper part lower mantle (perovskite, periclase), where the symmetry axis and ScS waves polarized parallel to the slab dip and the subduction direction.

Key words: seismic anisotropy, shear wave splitting, ScS waves, deep focus earthquakes, Amur Plate, South Kuril subduction zone, Far East of Russia.