

**ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН ОТ СЛАБЫХ МЕСТНЫХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БЛИЗКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ НА ЮГО-ВОСТОКЕ КАМЧАТКИ****М.Н. Лулева***Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск*

Проведены исследования волнового поля и сейсмических параметров волн от слабых землетрясений близкой локализации с целью изучения напряженно-деформированного состояния среды юго-востока Камчатки. Использовались трехкомпонентные записи PET IRIS (г. Петропавловск-Камчатский) за период 1993–2002 гг. Волновое поле от коровых событий характеризуется достаточно хорошей стабильностью во времени, но наблюдаются изменения амплитуд обменных и кратных волн. Для глубоких землетрясений с глубины 90–100 км характерна нестабильность волнового поля во времени, изменяется интенсивность волн, их количество и длительность колебаний. Наиболее существенные вариации отмечаются для азимутов поляризации быстрой *S*-волны, времени задержки между расщепленными *S*-волнами и отношений амплитуд прямых *P*- и быстрой *S*-волн. Отмечается цикличность в поведении азимута быстрой *S*-волны и времени задержки между расщепленными *S*-волнами во времени.

Ключевые слова: анизотропия, сейсмические волны, мониторинг напряженного состояния, Камчатка.

ВВЕДЕНИЕ

Различные сейсмологические методы активно применяются для изучения изменения напряженно-деформированного состояния среды в пространстве и во времени в динамически активных областях, к которым относится и Курило-Камчатская сейсмическая зона. Сейсмическая активность в этих областях распределена достаточно неоднородно в пространстве и во времени, включая слабые, сильные и медленные землетрясения. В сейсмологических исследованиях, в отличие от сейсморазведочных работ, источник излучения не является фиксированным в пространстве и стабильным по характеристикам излучения. Поэтому при обработке и интерпретации сейсмических параметров мониторинга землетрясений доминируют статистические подходы и возникает вопрос о степени зависимости параметров волн от пространственного положения землетрясений, свойств среды в различных направлениях. Этот вопрос достаточно актуальный, учитывая структурную неоднородность (мозаичность) и анизотропные свойства среды. При ответе на него возникает проблема исследования сейсмических параметров для выборочных направлений или от землетрясений, локализованных в пространстве.

Данная работа посвящена изучению изменения сейсмических параметров волн от землетрясений близкой локализации, выделенных за период 1993–2002 гг. в области станции PET IRIS (г. Петропавловск-Камчатский). Эта работа является продолжением исследований анизотропии среды и вариаций параметров расщепленных поперечных волн от слабых местных землетрясений [3, 7].

Анизотропия среды в области PET увеличивается с глубиной в среднем от 1–2 % в коре до 4–7 % в субдуктирующей плите на глубине 100–140 км. На всех сейсмических записях четко наблюдается эффект расщепления поперечных волн на быструю и медленную волну. Доминирующие направления азимута поляризации быстрой *S*-волны ориентируются вдоль $V 90^{\circ} \pm 20^{\circ}$ и совпадают с направлением движения Тихоокеанской плиты и доминирующим направлением сжатия в регионе. В настоящее время накоплено значительное количество данных [4–6], показывающих взаимосвязь между временным изменением времен задержки между поперечными волнами (t_{ss}) и изменением напряженного состояния среды, обусловленным различными процессами (землетрясения, вулканическая активность и т.д.). Традиционно считается, что параметр t_{ss} является основой для мони-

торинга напряженного состояния земной коры, а азимуты поляризации быстрой S -волны ведут себя статистически устойчиво во времени. В то же время, детальные исследования в области РЕТ показывают, что выделяются временные аномалии и в азимутах поляризации быстрой S -волны, а также наблюдается цикличность во временном ходе. Наиболее устойчивые циклические изменения с доминирующим периодом 172 дня отмечены для азимутов быстрой волны от событий с глубин больше 80–140 км за период 1996–1998 гг. и 400–600 дней за период 1993–2002. Исследование волнового поля от кластеров землетрясений с разной глубины и разных направлений позволяет оценить поведение различных сейсмических характеристик во времени и сопоставить их со статистическими результатами исследований.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Для исследований использовались трехкомпонентные сейсмические записи слабых местных землетрясений, зарегистрированные широкополосной станцией РЕТ IRIS (г. Петропавловск-Камчатский) за период 1993–2002 гг. Проведена выборка записей землетрясений с энергетическим классом $K < 10.5$ и эпицентральной расстоянием до 100 км от станции РЕТ. По данным каталога КОМСП ГС РАН за 9-летний период в радиусе 400 км от РЕТ произошло 33 сильных землетрясения ($K \geq 13$), включая Кроноцкое землетрясение (05.12.97, $M = 7.8$) без его афтершоков. За данный период выделены кластеры землетрясений, расстояние между гипоцентрами которых не превышает 10 км. Для корового слоя обнаружен один кластер, состоящий из 5 событий, зарегистрированных к северу от РЕТ на расстояниях около 12 км и глубинах 18–24 км. Несколько кластеров выделено для событий с глубины 90–110 км. Для улучшения качества сигналов записи отфильтрованы в полосе

частот 1–18 Гц. В каждом кластере были рассчитаны коэффициенты корреляции между соответствующими компонентами сейсмограмм (e, n, z) событий, а также между амплитудными сейсмограммами $A(t) = |\mathbf{u}(e, n, z, t)|$.

При обработке сейсмических записей предполагалось, что прямые продольная P - и поперечные расщепленные S_1 -, S_2 -волны, распространяющиеся от источника, имеют максимальные амплитуды и их векторы поляризации взаимно ортогональны. Определение прямых волн, измерение их кинематических и динамических параметров проводилось на основе поляризационного и статистического анализа [1, 2, 7], позволяющего наиболее точно определять такие волновые характеристики, как 1) вектор поляризации; 2) амплитуда; 3) степень линейности; 4) степень ортогональности волн; 5) время задержки между волнами. Ошибка измерения поляризации оценивается с точностью 10–20°. Если волна четко прослеживается в интервале от полупериода до периода, физическая разрешимость достигает 5–10°. Точность измерения направления вектора поляризации волны оценивается количественно через соотношение осей эллипсоида поляризации для выбранных волновых фаз [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Вариации волновых параметров от коровых землетрясений

На рисунках 1 и 2 представлены амплитудные сейсмограммы коровых землетрясений и азимутальные сейсмограммы, построенные в горизонтальной плоскости в интервале S -волн за период 1997–1998 гг. Азимутальные сейсмограммы представляют собой проекции смещений на выборочную систему направлений $\{l(\varphi, \theta)\}$: $u_i^p(t) = (\mathbf{u}(n, e, z, t) \cdot \mathbf{l}(\varphi, \theta))^n$. Пара-

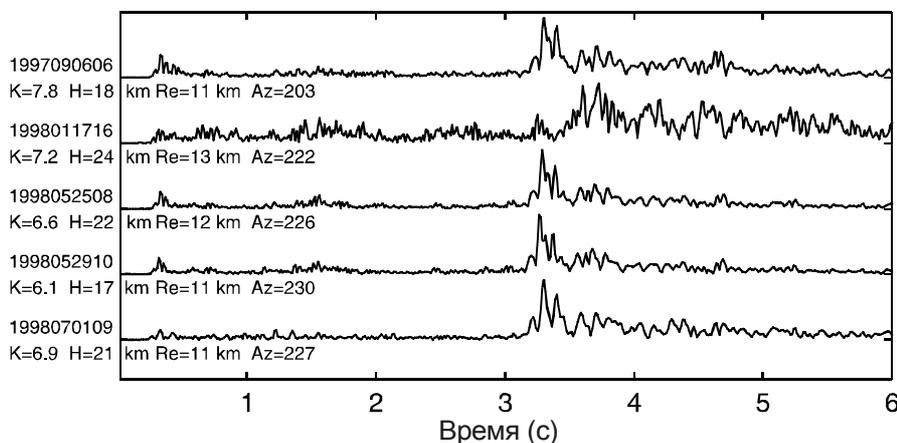


Рис. 1. Амплитудные сейсмограммы от коровых землетрясений с близкими гипоцентрными координатами. Время событий и характеристики землетрясения даны слева (K – энергетический класс, H – глубина, Re – эпицентральное расстояние, Az – азимут на станцию РЕТ).

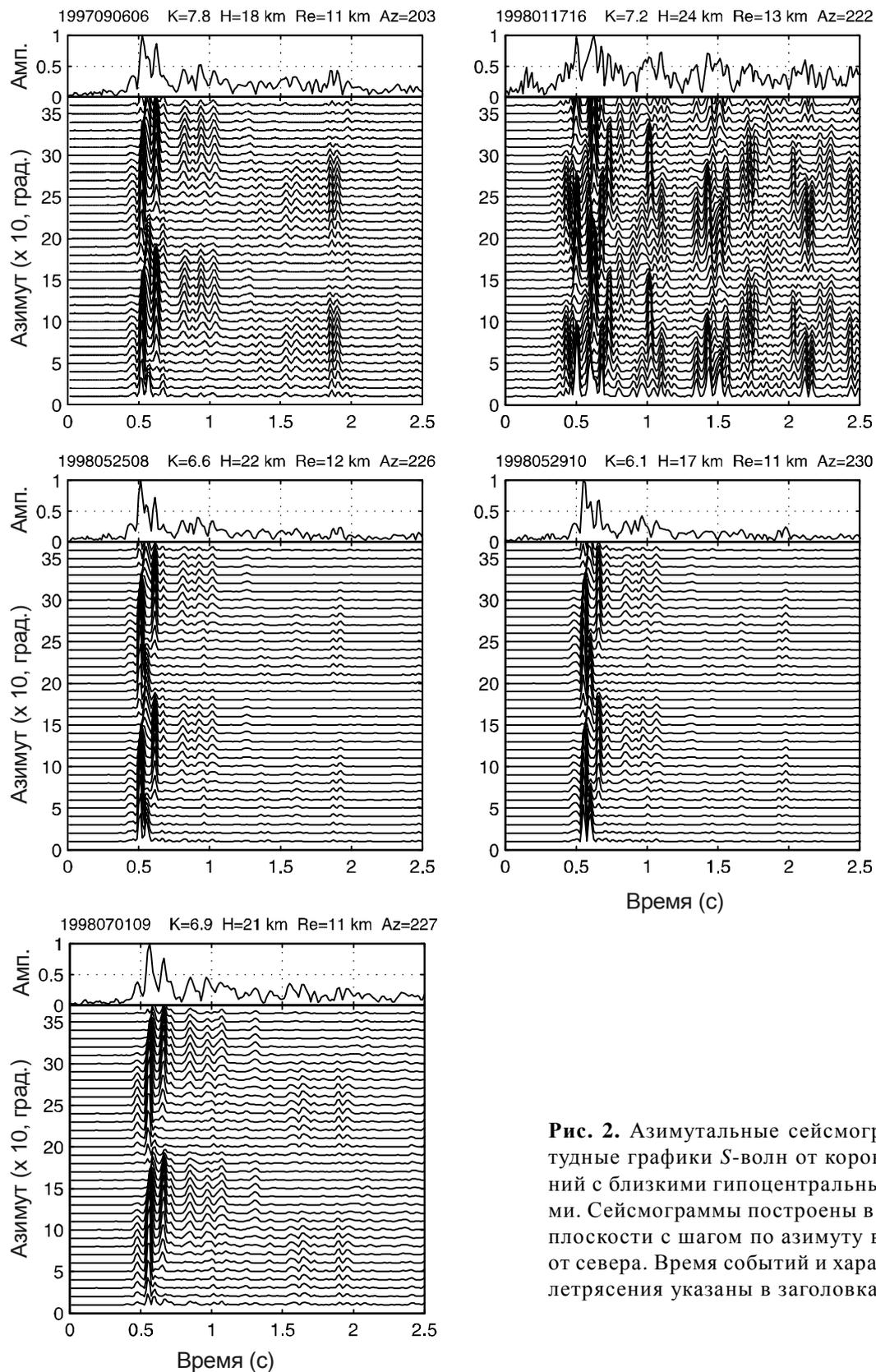


Рис. 2. Азимутальные сейсмограммы и амплитудные графики S -волн от коровых землетрясений с близкими гипоцентрными координатами. Сейсмограммы построены в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 10° и отсчетом от севера. Время событий и характеристики землетрясения указаны в заголовках.

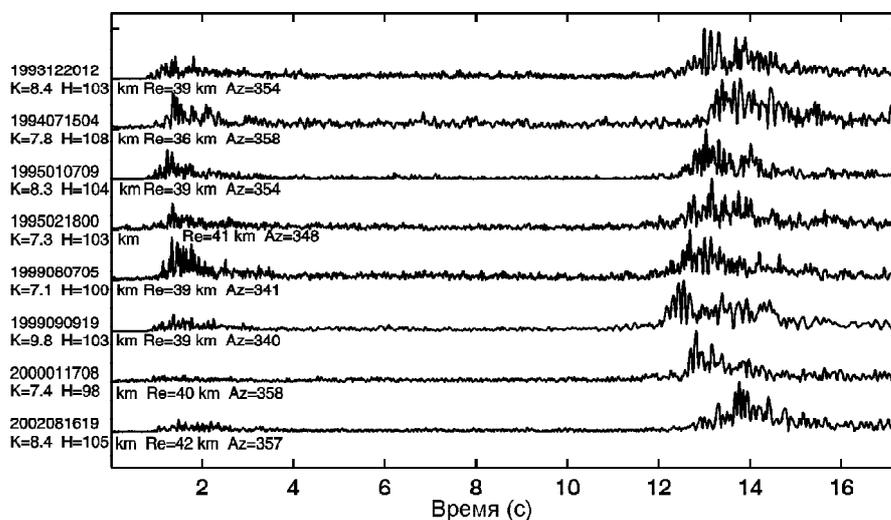
метр $m > 1$ регулирует энергетическую направленность, подчеркивая регулярные фазы и подавляя помехи. В данном случае используется значение $m = 2$. Коэффициенты корреляции между соответствующими компонентами сейсмограмм от 4-х событий (1997090606, 1998052508, 1998052910 и 1998070109) превышают значение 0.8. Наблюдается хорошее соответствие в последовательности волновых фаз, но амплитуды обменных/кратных волн изменяются относительно быстрой S_1 -волны, имеющей максимальную амплитуду. В интервале S -волн доминируют волны близгоризонтальной поляризации ортогональных направлений. Время задержки между расщепленными прямыми волнами (t_{SS}) от 4-х событий изменяется в пределах 0.04–0.055 с, время задержки между P и S_1 волнами (t_{PS}) изменяется в пределах 2.85–2.95 с. Азимут поляризации S_1 -волны (ϕ) ведет себя достаточно устойчиво, изменяясь в пределах 85° – 106° , и согласуется с направлением движения Тихоокеанской плиты. В интервале P -волны наиболее интенсивные волновые фазы, следующие за прямой волной, поляризованы близвертикально или наклонно и могут быть отнесены к кратным продольным волнам. Малоамплитудные обменные волны типа PS фиксируются наиболее четко сразу после прямой P -волны. Коэффициент корреляции между соответствующими компонентами сейсмограмм (e, n, z) в интервале P -волны не превышает значений 0.6, что указывает на меньшую устойчивость волнового поля во времени по сравнению с волновым полем в интервале S -волны. Волновое поле от события, зарегистрированного за день до крупного землетрясения (18.01.1998, $K=12.2$, 54.9° с.ш., 162.3° в.д.), представляет более сложную картину, состоящую из достаточно интенсивных S -волн, амплитуды которых сопоставимы с

амплитудой быстрой S -волны. Коэффициенты корреляции между сейсмограммами данного события и остальными не превышают значения 0.4. Значения времен задержки t_{SS} и t_{PS} имеют более высокие значения – 0.1 с и 3.3 с, соответственно. На сейсмограммах от событий 25 и 29 мая 1998 г. амплитуды волн в последующих вступлениях имеют минимальные значения. Данные записи зарегистрированы за 2 дня до и в период серии землетрясений на юге Авачинского залива ($K = 13.4$, 27.05.1998; $K = 12.7$, 28.05.1998; $K = 13.7$, 01.06.1998). Значительное различие волнового поля от события в январе и событий в мае 1998 г. показывает, что нет прямой корреляции между характером волнового поля и временем происхождения крупного землетрясения.

Вариации волновых параметров от глубоких землетрясений

Для глубоких землетрясений характерна нестабильность волнового поля во времени, коэффициенты корреляции между компонентами записи не превышают 0.6, а в интервале P -волны имеют значения меньше 0.3. Коэффициенты корреляции между амплитудными сейсмограммами показывают более высокие значения – около 0.8 – в интервале P - и S -волн. На рисунке 3 представлены амплитудные сейсмограммы за период 1993–2002 гг. от 8 глубоких событий, произошедших к югу от РЕТ на глубине 98–105 км, с эпицентрными азимутами 340° – 358° (кластер А). Азимуты поляризации быстрой S -волны доминируют в восточных направлениях. Значения t_{SS} распределены в интервале 0.14–0.95 с, а t_{PS} изменяется от 11.15 до 12.09 секунд. Наименьшие значения t_{SS} фиксируются от 3-х событий в период 1995–1999 гг. Отношения между амплитудами P - и

Рис. 3 Амплитудные сейсмограммы от глубоких землетрясений с близкими гипоцентрными координатами (кластер А).



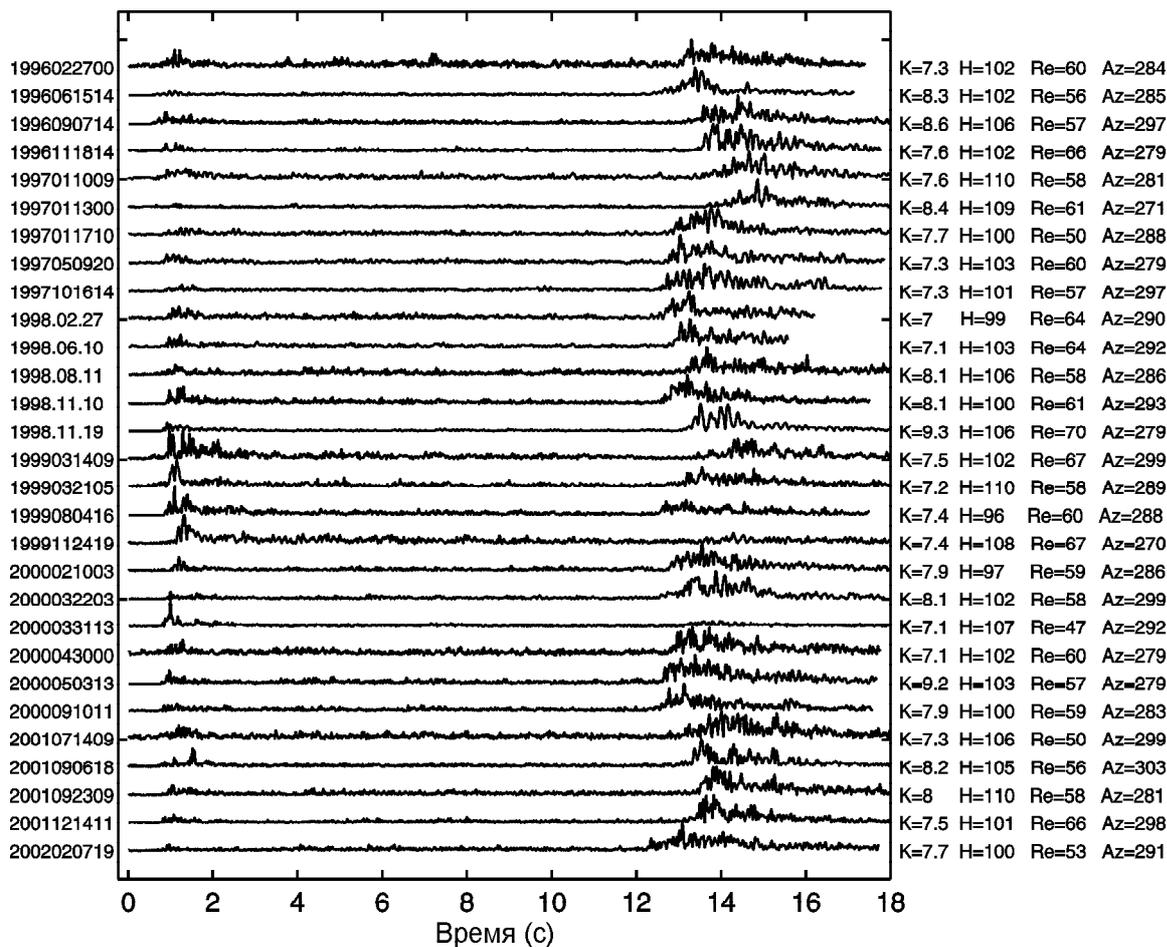


Рис. 4 Амплитудные сейсмограммы от глубоких землетрясений с близкими гипоцентрными координатами (кластер В).

S_1 -волн (A_p/A_s) варьируют от 0.11 до 0.86. Пониженные значения A_p/A_s фиксируются для 3-х событий с 09.09.1999 по 16.08.2002. Максимальное значение A_p/A_s наблюдается для события 07.08.1999.

На рисунке 4 представлены амплитудные сейсмограммы за период 1996–2002 гг. от 29 событий, расположенных к востоку от РЕТ на глубине 96–110 км, с эпицентрными азимутами 270° – 303° (кластер В). Для событий кластера В также наблюдаются вариации параметров t_{PS} и A_p/A_s , но в более широком диапазоне значений. Значения t_{PS} плавно увеличиваются и уменьшаются со временем в пределах 10.6–13.4 секунд. Разброс величины A_p/A_s находится в интервале от 0.17 до 2.1. Максимальные значения A_p/A_s наблюдаются для событий с 14.03.1999 по 31.03.2000. Для 4-х из 33 событий кластера В появление P -волн и, соответственно, время вступления P -волны четко не фиксируется (записи данных собы-

тий не представлены на рис. 4). Для оценки временных вариаций волнового поля построены графики таких волновых параметров, как азимут поляризации P - и S_1 -волн, времена задержки t_{SS} и t_{PS} , отношения амплитуд прямых волн A_p/A_{S1} и A_{S2}/A_{S1} для событий более представительного кластера В (рис. 5). Наиболее устойчиво ведут себя азимуты поляризации P -волны и хорошо согласуются с азимутами землетрясений, определенными по данным каталога КОМСП (рис. 5б). Для азимутов поляризации быстрой S_1 -волны наблюдается плавное колебание от 135° до 45° во времени. Отклонение ϕ к СВ направлениям отмечается в 1997 и 1999 годах (рис. 5в). Тенденция к циклическому изменению отмечается для времен задержки t_{SS} . В среднем, t_{SS} изменяется в пределах 0.2–0.9 с с увеличением в период 1997 и 1999 годов и в конце 2001 года. Отмечается корреляция между областями с повышенными значениями t_{SS} и областями смеще-

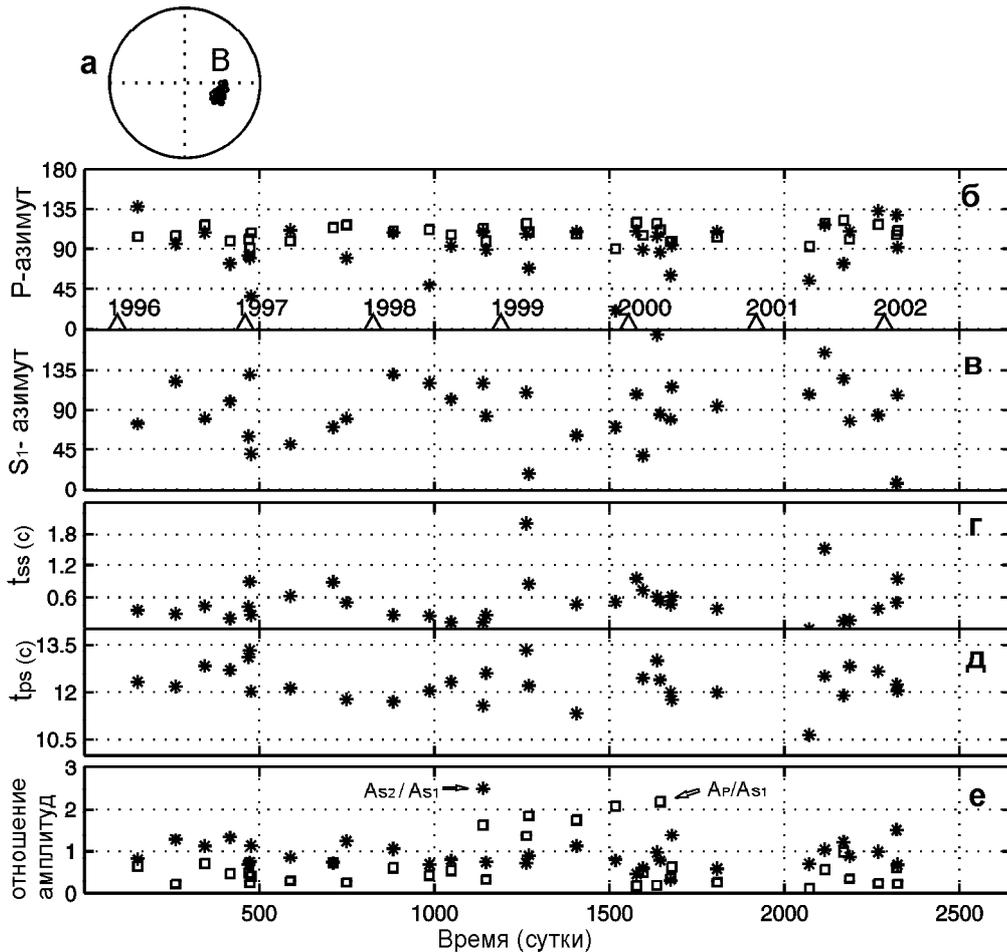


Рис. 5 Стереопроекция гипоцентров землетрясений кластера В относительно станции РЕТ (а) и распределение во времени азимутов поляризации Р-волны (звездочки) и азимутов на эпицентр (квадраты) (б), азимутов поляризации быстрой S-волны (в), времен задержки между расщепленными прямыми S-волнами (г), времен задержки между Р-и быстрой S-волнами (д) и отношения амплитуд прямых волн A_P/A_{S1} (квадраты) A_{S2}/A_{S1} (звездочким) (е).

ния ϕ в северном направлении (рис. 5 в, г). Хотя значения t_{ps} распределены, в среднем, около значения 12 с, наблюдаются периоды повышения t_{ps} до 13.4 с в конце 1997 и 1999 годов. Квазипериодические изменения азимута поляризации S₁-волны и t_{ss} свидетельствуют об изменении анизотропных свойств среды во времени. Изменение t_{ss} может свидетельствовать об изменении скорости поперечных волн и степени анизотропии среды, в то время как изменение ϕ может быть обусловлено деформационными процессами, пространственной переориентацией микронеоднородностей в действующем поле упругих напряжений. Анализ отношения амплитуд прямых волн показывает, что амплитуды медленной и быстрой поперечных волн соразмерны: значение A_{S2}/A_{S1} изменяется в интервале 0.68–1.2 (рис. 5е). Амплитуды

да P-волны обычно имеет более низкие значения по сравнению с поперечными волнами ($A_P/A_{S1} - 0.17-0.7$). В то же время, в период с декабря 1998 г. по март 2000 г. фиксируются P-волны, интенсивность которых превышает интенсивность S-волн. Изменение в соотношении амплитуд может быть обусловлено прежде всего изменением направленности излучения P- и S-волн, что свидетельствует о смене типа деформаций, фокального механизма в данной области.

Анализ волнового поля от глубоких событий показывает изменение структуры волнового поля и длительности колебаний во времени. Наблюдается изменение количества волн и их интенсивности. На рис. 6 даны примеры азимутальных сейсмограмм от глубоких событий кластеров А и В, демонстрирующих различие волновых полей в интервале S-волн.

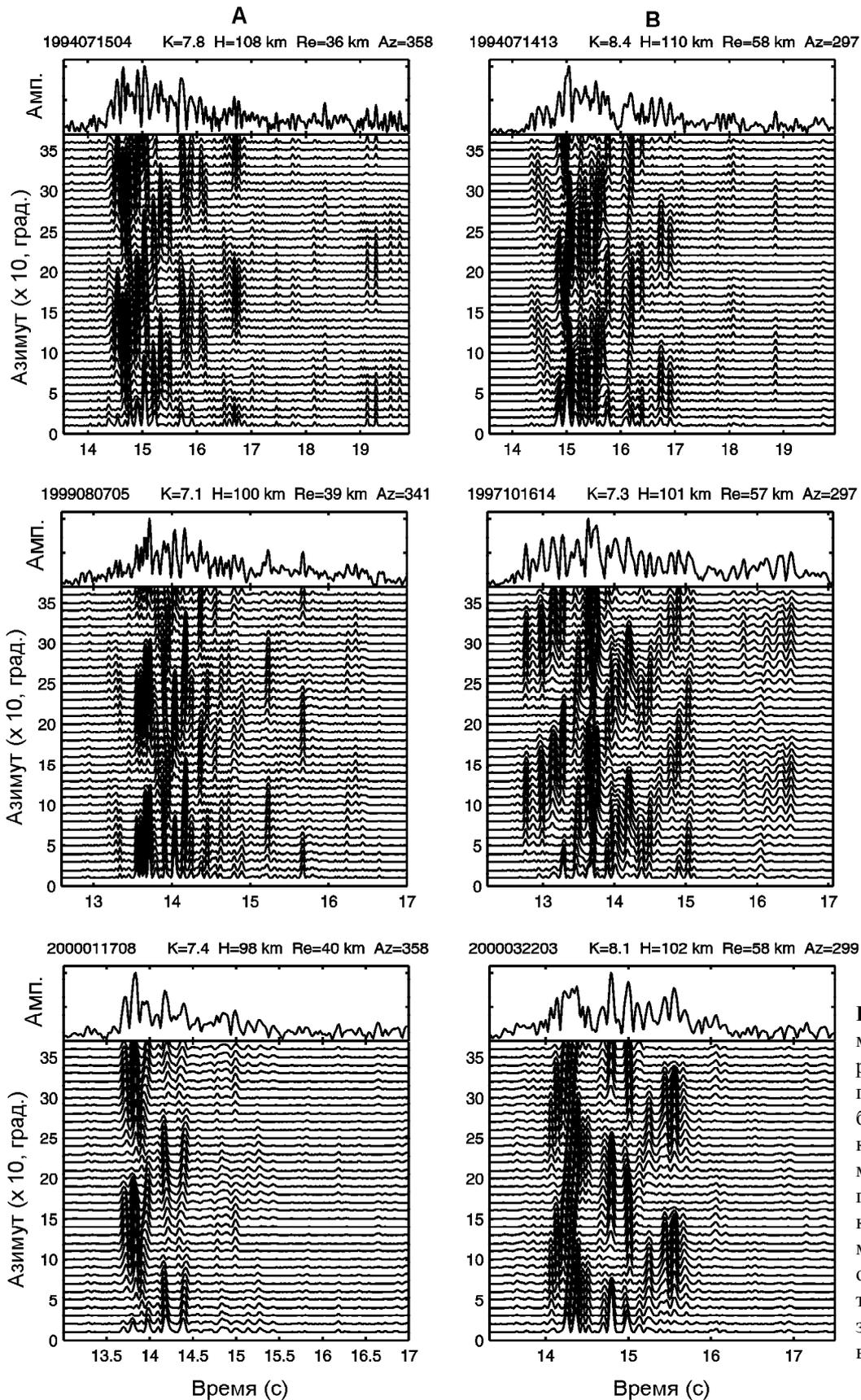


Рис. 6. Примеры азимутальных сейсмограмм и амплитудных графиков S -волн от глубоких землетрясений кластеров А и В. Сейсмограммы построены в горизонтальной плоскости с шагом по азимуту в 10° и отсчетом от севера. Время событий и характеристики землетрясения указаны в заголовках.

Пример записи 2000011708 представляет простейшую картину волнового поля, когда четко выделяется пара расщепленных S_1 - и S_2 -волн, а интенсивность колебаний быстро затухает со временем. Длительность колебаний в интервале S -волн от событий кластера В меняется от 1.5 с до 5 с. Обменные волны меньшей амплитуды типа SPS могут фиксироваться в первых вступлениях. Азимутальные сейсмограммы от событий 1994071413, и 1999080705 демонстрируют появление в первых вступлениях перед прямой S_1 -волной обменных волн типа SPS , которые имеют существенно меньшую амплитуду. В то же время, могут фиксироваться и достаточно интенсивные обменные волны типа SPS (рис. 6, запись 1997101614). Обменные волны ведут себя более неустойчиво по сравнению с прямыми S -волнами, образуют расщепленные пары, направления азимута поляризации которых могут быть ориентированы субпараллельно, ортогонально или наклонно по отношению к азимутам поляризации расщепленных прямых S -волн. Амплитуды обменных/кратных волн в последующих вступлениях могут быть сопоставимы с амплитудой прямых волн, что значительно усложняет их идентификацию (рис. 6).

Таким образом, анализ волнового поля от событий с близкими гипоцентрными параметрами свидетельствует о временных вариациях кинематических и динамических характеристик волн. В то же время, необходимо отметить, что азимуты поляризации волн от событий кластеров А и В доминируют в восточных направлениях и достаточно согласованно изменяются во времени. Наблюдаемые изменения волновых параметров свидетельствуют об изменении скорости сейсмических волн, степени анизотропии среды и деформаций в среде на различной глубине. Предполагается, что основные изменения напряженного-деформированного состояния происходят в земной коре и субдуктирующей плите (сейсмофокальной зоне). Анизотропия и состояние верхней мантии считаются достаточно устойчивыми во времени.

ВЫВОДЫ

За период 1993–2002 гг. в радиусе 100 км от станции РЕТ выделены кластер землетрясений в земной коре и два наиболее представительных кластера (А, В) на глубине 90–110 км в южном и восточном направлениях от РЕТ. Исследования волнового поля и сейсмических параметров от землетрясений близкой локализации показали следующие результаты.

Волновое поле от коровых событий за период 1997–1998 характеризуется достаточной стабильнос-

тью во времени. Коэффициенты корреляции между различными компонентами записи имеют значения выше 0.8 за исключением события, зарегистрированного в афтершоковый период Кроноцкого землетрясения. Азимуты поляризации быстрой S -волны ориентированы в интервале 85° – 106° , значения t_{SS} не превышают 0.1 секунды. В то же время, наблюдаются существенные изменения относительных амплитуд обменных и кратных волн.

Для глубоких землетрясений характерна неустойчивость волнового поля во времени, изменяется последовательность и количество волн, длительность колебаний. Наблюдаются вариации времени задержки между прямыми P - и S -волнами. Азимуты поляризации быстрой S -волны варьируют от 45° до 135° , а значения времен задержки между расщепленными S -волнами в среднем варьируют в интервале 0.2–0.95 с. Наблюдается цикличность в поведении азимута быстрой S -волны и времени задержки t_{SS} во времени. Азимуты поляризации от событий кластеров А и В достаточно согласованно изменяются во времени. Отмечаются также существенные изменения в отношении амплитуд прямых P - и быстрой S -волн. В период 1999 г. амплитуда P -волны значительно превосходит амплитуду быстрой S -волны от событий кластера В, что свидетельствует об изменении направленности излучения источника, типа фокального механизма землетрясений.

Наблюдаемые изменения сейсмических параметров свидетельствуют о временных изменениях скорости сейсмических волн, степени анизотропии среды и деформационного состояния среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гальперин Е.И. Поляризационный метод сейсмических исследований. М.: Недра, 1977. 277 с.
2. Лунева М.Н., Дроздин В.Д., Овчинников В.Е. Изучение расщепления поперечных волн от землетрясений 1998 года на полуострове Камчатка // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19, № 5. С. 78–90.
3. Лунева М.Н., Ли Д.М. Анизотропия среды и вариации азимута поляризации быстрой S -волны под Южной Камчаткой // Материалы междунар. совещ. по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 210–211.
4. Bokelman G.H.R., Harjes H.P. Evidence for temporal variation of seismic velocity within the upper continental crust // J. Geophys. Res.. 2000. V. 105. N B10. P. 23879–23894.
5. Crampin S. Stress forecasting: a viable alternative to earthquake prediction in a dynamic Earth // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth Sciences. 1998. V. 89. P. 121–133.

6. Liu Y., Crampin S., Main I. Shear wave anisotropy: spatial and temporal variation in time delay at Parkfield, Central California // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 130. P. 771–785.
7. Luneva M.N., J.M. Lee. Shear wave splitting beneath South Kamchatka during 3-year period associated with the 1997 Kronotsky Earthquake // *Tectonophysics.* 2003. V. 374. P. 135–161.

Поступила в редакцию 15 мая 2005 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

M. N. Luneva

Temporal variations of wave parameters of small local earthquakes with similar hypocentral location in southeastern Kamchatka

Seismic wave parameter measurements of local earthquakes of similar locations (clusters) are used to determine stress-strain state changes with time. The local small seismic events recorded at the PET IRIS station (Petropavlovsk-Kamchatsky City) for the period of 1993-2002 were analyzed. Waveforms of the crust event cluster show comparatively good similarity with cross-correlation coefficients higher than 0.8 with the exception of the event happened during the aftershock period of the Kronotsky Earthquake ($M7.8$, 05.12.97). At the same time, temporal changes of relative amplitudes of converted and multiple waves are detected. Waveform instability is more typical of the event clusters of 90-110 km depths. The most significant variations are observed for the fast azimuths, split shear wave time delays and amplitude ratio between direct P and fast S waves. A tendency of cyclic variation in fast azimuths and shear wave splitting time delays with time is observed.

Key words: anisotropy, seismic waves, stress state monitoring, Kamchatka.