

УДК 550.34

Е. М. ГУСЕВА, А. А. ГУСЕВ, Л. С. ОСКОРБИН

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ И ЕГО ОПРОБОВАНИЕ НА ПРИМЕРЕ НЕКОТОРЫХ ЗАПИСЕЙ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Описан пакет программ для обработки сейсмических записей, полученных приборами разных типов. Для иллюстрации возможностей пакета использованы записи сильных движений станции Шикотан (Южные Курилы) и Петропавловск (Камчатка). Рассчитаны ускорение, скорость и смещение; определено максимальное ускорение; построены спектры реакций и спектры Фурье; приведены поляризационные диаграммы S-волн. Приведены результаты обработки толчка 06.XII.1978 г. на ст. Шикотан ($I=7-8$ баллов, $M=7, 8$).

A SET OF PROGRAMS FOR DIGITAL PROCESSING OF SEISMIC RECORDS AND TRIAL APPLICATION TO SOME STRONG MOTION RECORDS, by Guseva E. M., Gusev A. A., and Oskorbin L. S. A set of programs is described for processing seismic records obtained by instruments of various types. The records of strong motions at stations Shikotan (Southern Kuril Islands) and Petropavlovsk (Kamchatka) were used to illustrate the potential of the set. Acceleration, velocity and displacement have been calculated; the maximum acceleration has been determined; Fourier and response spectra have been determined; the diagrams of S-wave polarization are given. The results of processing of the shock of December 6, 1978 recorded at Shikotan station (intensity 7—8, magnitude 7, 8) are presented.

(Received September 25, 1988)

Institute of volcanology, Far East Division, USSR Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, USSR

Institute of Sea Geology and Geophysics, Far East Division, USSR Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, USSR, 693002

Введение

Единая сеть сейсмических наблюдений СССР (ЕССН) для записи сильных движений широко использует сейсмографы С5С в комплекте с самописцами ИСО и др. Для обработки записей подобных каналов существует ряд отдельных методик (см. обзор литературы в [2, 3]). Однако стандарт в данной области пока не выработан. В этой связи может быть полезным разработанный единый пакет программ, имеющий одной из основных задач обработку записей сильных движений велосиграфами. Он также позволяет с определенными удобствами проводить обработку записей акселерографов и сейсмографов как с гальванометрической, так и с прямой регистрацией. Пакет может быть использован и при обработке обычных сейсмограмм. Примененные алгоритмы цифровой обработки в основном традиционны. Опробование пакета было проведено на примере записей сильных движений, полученных на дальневосточных станциях Шикотан (Южные Курилы) и Петропавловск (Камчатка), обозначаемых далее ШКТ и ПТР. В процессе обработки попутно получены некоторые сейсмологические результаты частного характера.

Краткое описание алгоритмов и программ для цифровой обработки

Описываемый пакет программ для обработки сейсмических записей включает программы, реализующие следующие функции: 1) расчет «истинного» смещения, скорости и ускорения грунта по записи сейсми-

ческого канала путем линейной обратной фильтрации; 2) диалоговая процедура восстановления «истинного» смещения для сигнала в виде однополярного импульса; 3) расчет модельной записи заданного сейсмического канала по записи другого сейсмического канала; 4) расчет спектров реакции; 5) расчет несглаженных спектров Фурье, сглаживание амплитудного спектра Фурье с постоянным шагом по частоте и постоянной шириной полосы, расчет спектров мощности; 6) расчет спектров Фурье со сглаживанием по логарифмической сетке частот с постоянной относительной шириной полосы; 7) расчет оценки спектра мощности методом максимальной энтропии (ММЭ).

Назначение программ и принципы их применения. Опишем кратко основные практические задачи, для решения которых предназначаются программы пакета. Программа 1 позволяет реконструировать временной ход смещения, скорости или ускорения грунта по записи сейсмического прибора. Наиболее надежные результаты она дает для фазовой коррекции, например при расчете ускорения по акселерограмме, а также смещения по сейсмограмме. Восстановление низкочастотной части спектра смещения, особенно по акселерограммам, может быть выполнено лишь с ограниченной надежностью. В определенных условиях лучших результатов можно достичь с помощью программы 2. Хотя она далеко не универсальна, в ряде случаев ее применение позволяет получить довольно надежные оценки сейсмических моментов и характеристик длительности очагового процесса.

Можно считать, что применение программы 1 для расчета скорости и ускорения по велосиграммам и акселерограммам можно выполнять без жесткого контроля специалиста-сейсмолога. Это относится и к расчету смещения по скорости в фиксированной полосе частот. Расчет ускорения по сейсмограммам, смещения по акселерограммам и использование программы 2 может при отсутствии ясного представления о возможных погрешностях этих процедур привести к неверным результатам и поэтому предполагает в качестве пользователя специалиста достаточной квалификации.

Программа 3 рассчитывает модельную запись заданного прибора по наличной записи другого. Применяется, в частности, для реконструкции (по записи сильного движения) модельной записи регионального сейсмографа и определения энергетического класса.

Программа 4 дает стандартное инженерно-сейсмологическое представление колебаний в виде спектра реакции. Следует иметь в виду, что сетка частот должна быть согласована с величиной затухания. При малом затухании (0—2%) не рекомендуется использовать шаг по логарифму частоты более 0,05. Следует также учесть, что на вход модели осциллятора подается рассчитанная в программе временная функция ускорения, и ее неточности отразятся в спектре реакции. В частности, подав на вход программы 4 запись смещения, не следует ожидать надежных результатов на высоких частотах.

Программы 5, 6 и 7 предназначены для различных вариантов спектрального анализа. Программа 5 ориентирована на стандартные приложения фурье-спектра, включая обычную оценку спектра мощности и доверительного интервала для него. Уточнение положения спектральных пиков (характеристик резонанса грунта или здания) может быть выполнено по программе 7.

Программа 6 создана специально для сейсмологических приложений с учетом все большей популярности изображения спектров в билогарифмическом масштабе для анализа сейсмических сигналов и шумов. Для упрощения работы с высокочастотной частью спектра реализован специальный алгоритм сглаживания модуля спектра Фурье с постоянной относительной шириной полосы и с постоянным шагом по логарифму частоты. Поясним, что результат такой обработки непосредственно

сопоставим со спектрами реакции и ЧИСС-спектрами, при построении которых также используется принцип постоянной относительной ширины полосы.

Стыковка сглаженной таким образом высокочастотной части спектра и его низкочастотной части, где сглаживание невыполнимо, выполняется пользователем вручную. Отметим, что примененный в программах 5 и 6 алгоритм сглаживания сохраняет мощность (энергию) сигнала; в этом он отличается от нередко применяемых алгоритмов сглаживания модуля спектра.

Описание программ. Все программы пакета включают стандартную начальную часть и особую часть. Стандартная начальная часть включает модуль ввода и модуль стандартной обработки. Модуль ввода осуществляет ввод и корректировку оцифрованной записи, выделение участка для обработки и прореживание записи.

Введенные результаты оцифровки сначала корректируются за вероятный сдвиг и перекос нулевой линии исходной сейсмограммы, возникающий при оцифровке. Это осуществляется путем расчета линейной функции, аппроксимирующей названную нулевую линию, после чего эта линейная функция вычитается из исходных отсчетов. Для нахождения функции может быть использован один из следующих способов. В первом, обычном способе, методом наименьших квадратов определяется прямая, аппроксимирующая отсчеты сейсмограммы. Во втором; более примитивном, но, как оказалось, более удобном и надежном способе, используется уровень нулевой линии в начале и конце участка цифровки, что и определяет искомую прямую. При этом возникает дополнительное требование, чтобы до и после интересующего нас участка записи были оцифрованы два участка нулевой линии. Второй способ имеет преимущества для коротких асимметричных записей.

После выполнения коррекции под визуальным контролем (за дисплеем) проводится выделение и «вырезание» сегмента записи, предназначенного для обработки. Чтобы в начале и конце выбранного сегмента записи не возникало искусственных «ступенек», начальный и конечный участки этого сегмента умножаются на «заглаживающие» функции типа половинки косинусного окна; например, для начального участка «заглаживающая» функция имеет вид

$$W(t) = \begin{cases} 0; & t < t_1 \\ 0,5 \left(1 - \cos \pi \left(\frac{t-t_1}{t_2-t_1} \right) \right); & t_1 < t < t_2 \\ 1; & t > t_2 \end{cases}$$

Длина левого (t_1-t_2) и правого участков заглаживания задается в диалоге за дисплеем.

В ряде случаев для надежности цифровка проводится с избыточной детальностью. В подобных случаях может быть выполнено прореживание записи в 2^n раз. Соседние отсчеты при этом осредняются.

Модуль стандартной обработки выполняет коррекцию записи за прибор (обратную фильтрацию) и получение нужного типа сигнала (смещение, скорость или ускорение). Коррекция за прибор выполняется в частотной области, путем деления сигнала на передаточную функцию прибора (ПФП). Для расчета ПФП используются параметры сейсмического канала, а также увеличение на заданной частоте. У всех сейсмических приборов (каналов) передаточная функция близка к нулю на достаточно малых частотах, поэтому для подавления низкочастотных помех, связанных с делением на малое число, применяется регуляризирующий высокочастотный фильтр. Частота среза этого фильтра подбирается так, чтобы обеспечить компромисс между уровнем низкочастотной помехи и степенью искажения формы очагового импульса.

Эта операция практически существенна только при расчете смещения. Подбор частоты среза фильтра проводится в диалоговом режиме и под визуальным контролем. При обработке записей сейсмографов и вело-сиграфов начальное приближение для значения этой частоты можно задавать близким к собственной частоте маятника. Детальнее данный вопрос рассмотрен в [3].

Помимо ВЧ-фильтрации в ряде практических случаев необходимо использовать и НЧ-фильтр (например, для подавления высокочастотного шума или для сопоставления результатов, полученных разнотипной аппаратурой). НЧ-фильтр также реализован, и частота его среза также задается в диалоге.

Алгоритм описываемого блока последовательно включает: прямое преобразование Фурье (методом БПФ), ВЧ- и НЧ-фильтрацию, деление на ПФП, умножение на $(i\omega)^K$, где $K=0,1$ или 2 для получения смещения, скорости или ускорения; и при необходимости обратное БПФ. Дальнейшие действия в различных программах различаются. Они описаны ниже в пунктах, номера которых соответствуют приведенному выше списку программ.

1. Выводятся на график временные функции смещения, скорости или ускорения. Одновременно можно вывести исходную запись.

2. Выполняется диалоговая процедура расчета «истинного» движения грунта, которая была детально описана в [3]. В данной работе она использовалась почти без изменений. Дадим краткие пояснения к этой программе. Известно, что процедура обратной фильтрации в ограниченной полосе частот, не включающей нуля, приводит к низкочастотным искажениям восстановленного смещения грунта. В некоторых случаях при наличии априорной информации о сигнале эти искажения можно скомпенсировать. Алгоритм, описанный в [3], может быть применен для восстановления сигналов в виде однополярного импульса. Именно такими в теории должны быть объемные волны от дислокационного источника в однородной изотропной среде. Идея алгоритма — экстраполяция спектра сигнала в окрестность нуля. В случае, когда удастся уверенно выделить однополярный очаговый импульс, в программе определяется его площадь E_0 и значения нормированных степенных моментов — первого начального e_1 и второго центрального e_2 по формулам:

$$E_0 = \int_{t_A}^{t_B} x_u(t) dt,$$

$$e_1 = \frac{1}{E_0} \int_{t_A}^{t_B} x_u(t) (t - t_A) dt,$$

$$e_2 = \frac{1}{E_0} \int_{t_A}^{t_B} x_u(t) (t - t_A)^2 dt - e_1^2,$$

где t_A, t_B — моменты времени начала и конца импульса. $x_u(t)$ — оценка очагового импульса. Площадь импульса E_0 , равная значению модуля спектра Фурье на нулевой частоте, может быть использована для получения оценок сейсмического момента M_0 .

Для целей изучения сейсмических источников в ранее разработанную программу добавлен блок расчета поправок к спектру за поглощение. Для расчета поправок следует задать время пробега и зависимость добротности от частоты. Амплитудная поправка к спектру рассчитывается тривиально. Фазовая поправка рассчитывается как преоб-

разование Гильберта от логарифма модуля амплитудной поправки, чем обеспечивается физическая реализуемость оператора среды [5].

3. Спектр смещения умножается на передаточную функцию моделируемого прибора, параметры которого задаются. Затем выполняется обратное БПФ, и смоделированная запись выводится на график.

4. Производится расчет спектра реакции, поэтому для набора величин безразмерного затухания D и собственной частоты ω_0 механического осциллятора моделируется временной ход смещения под действием заданного ускорения. Набор максимумов модуля смещения X как функция ω_0 дает спектр смещений (для заданного D); можно получить также спектр псевдоскорости $V(\omega_0) = \omega_0 X(\omega_0)$ и псевдоускорения $A(\omega_0) = \omega_0^2 X(\omega_0)$. Для моделирования колебаний осциллятора с помощью дискретных временных рядов применяется рекурсивный фильтр пятого порядка. Коэффициенты фильтра рассчитываются по формулам [9]. Графики спектра реакции для заданного набора D выводятся в билогарифмическом масштабе.

5. Формируются и выводятся два графика, оба в одинаковом логлинейном масштабе. На первый график выводятся значения несглаженного модуля спектра Фурье (смещения, скорости или ускорения). Затем по заданной равномерной сетке частот (с постоянным шагом по частоте) рассчитывается спектр энергии как квадрат модуля спектра Фурье, и он сглаживается косинусным окном заданной ширины. В типичном случае ширина окна (при -3 дБ) равна удвоенному шагу сетки частот. С точностью до коэффициента результат сглаживания можно рассматривать как оценку спектра мощности. Сглаженный амплитудный спектр Фурье получается путем извлечения квадратного корня; он выводится на второй график. Заметим, что из-за логарифмического масштаба по ординате извлечение корня по существу не влияет на форму кривой спектра.

6. Формируются и выводятся два графика, оба в одинаковом билогарифмическом масштабе. На первый график выводятся значения несглаженного модуля спектра Фурье (смещения, скорости или ускорения). Затем, примерно так же, как и в программе 5, рассчитывается сглаженный спектр Фурье. Однако сетка частот, для которых рассчитываются значения сглаженного спектра, принята неравномерной — с постоянным шагом по логарифму частоты. Соответственно и ширина сглаживающего окна также не постоянна — постоянна относительная ширина. Для оценки на частоте f , рекомендуемая (абсолютная) полуширина на уровне -3 дБ равна $\delta f = \frac{1}{2} f (10^\Delta + 10^{-\Delta})$, где Δ — шаг по логарифму частоты (и одновременно полуширина в логарифмической шкале). Например, если сетка частот содержит 10 точек на декаду, то $\Delta = 0,1$ и $\delta f = 0,23 f$. Для достаточно низких частот значения сглаженного спектра не формируются: требуется, чтобы в окно сглаживания попало не менее двух-трех отсчетов несглаженного спектра. Сформированные значения несглаженного спектра выводятся на второй график.

7. Алгоритм метода максимальной энтропии Бурга реализован, следуя [5], и дополнен так, чтобы результат имел смысл спектра мощности. На график выдается оценка спектра мощности по ММЭ и одновременно несглаженная оценка спектра мощности, полученная с помощью дискретного преобразования Фурье, обе в логлинейном масштабе.

Наблюдательный материал

Велосиграфы ст. ШКТ и ПТР, как обычно, используют гальванометрическую регистрацию, фотозапись. Установка С5С-Н700 ст. ШКТ имеет 2 чувствительных горизонтальных канала с коэффициентом чувствительности $V=5$ с; 2 заглубленных горизонтальных канала с $V=0,5$ с;

Список обработанных землетрясений по ст. ШКТ

Дата	T ₀ , час, мин, сек.	φ° с. ш.	λ° в. д.	h, км	Δ, км	R, км	K	M	I, балл	Индекс записи	
										С-Ю	В-З
08.V.1981	06.44.50,0	44,6	146,4	165	95	190		5,8LH	2	A18	A17
04.VIII.1981	22.45.14,0	44,0	147,1	90	30	95	10			A5	A4
08.IX.1981	19.26.28,0	43,4	146,4	48	55	73	12	5,7LH	3	A19	—
03.X.1981	07.21.50,0	43,8	146,6	75	15	76	10,5	5,1PV(A)	4—5	A8	A6
13.XI.1981	19.35.10,0	43,5	146,5	60	65	88	11	5,4PV(A)	5	A14	A13
04.VII.1982	14.51.56,0	43,9	146,8	90	10	91	10,5	—	4	A11	A9
30.VIII.1982	06.27.16,0	44,6	147,4	90	90	127	10,5	—	—	A16	A15
22.X.1982	02.28.40,0	43,5	146,7	50	40	64	10	—	4	A3	A2
06.XII.1978	14.02.05,0	44,6	146,64	140	82	162		7,5LH	7—8		

Таблица 2

Список обработанных землетрясений ст. ПТР

№	Дата	T ₀ , час, мин, сек.	φ°	λ°	h, км	Δ, км	S-P, с	K _{S1,2} ^{Ф68}	M
1	12.IV.1973	13.49.14,5	50,70	158,88	70		28	14,8	m _{PV(A)} =6,2
2	11.VII.1975	05.23.22,8	53,28	159,00	115		13	11,7	m _{PV(A)} =5,0
3	11.II.1980	15.29.47,0	53,12	160,05	57		12	12,7	M _{LH} =4,4
4	13.X.1981	15.33.57,4	51,35	157,71	101		23	12,9	m _{PV(A)} =5,3
5	14.V.1982	03.38.03,5	52,55	158,31	121		14	11,9	m _b =5,0
6	01.II.1987	04.11.35,2	52,91	158,94	100		11	12,1	m _{PV(A)} =4,8
7	24.XI.1971	19.35.49,0	52,50	162,20	100	120	—	16	M _{LH} =7,2
8*	—	—	52,42	160,05	10—30	102	—	14	—

* Запись № 44 из [7], без обратной фильтрации.

вертикальный канал с $V=0,5$ с и отметчик времени. Регистрация гальванометрическая на 12-см фотобумаге, развертка—20 мм/с. Прибор работает в ждущем режиме, поэтому без потерь записываются только S-волны.

В качестве исходного материала были выбраны записи землетрясений, зарегистрированных на ст. ШКТ в 1981, 1982 гг., их магнитуды M_{LH} в интервале 5—6. Выбирались толчки с глубинами от 50 до 120 км (табл. 1, 2, рис. 1), с гипоцентрными расстояниями 60—200 км. Такой критерий отбора объясняется тем, что особый интерес представляло выделение неискаженных очаговых импульсов смещения. Из практики работ с P-волнами было известно, что этого можно ожидать лишь при достаточно крутых лучах. Следует сразу заметить, что надежды на выделение очаговых импульсов S-волн оправдались лишь частично. В качестве дополнительного материала привлекали записи акселерографа ССРЗ ст. ШКТ, а также комплекта С5С-ИСО-2 ст. ПТР. Все записи были оцифрованы на установке УЦС (Ф004). Цифровались участки максимальных амплитуд, включающие S-волны, на горизонтальных компонентах. Шаг цифрования $\Delta t=0,004—0,01$ с.

Результаты опробования пакета

Организация опробования. Велосиграммы толчков средней силы использованы для опробования программ 1, 2, 4 и 6. Результаты этой работы далее излагаются последовательно; попутно, в основном в иллю-

стративных целях, проводится в небольшом объеме их сейсмологическая интерпретация. Далее используются записи толчков большой магнитуды, они обработаны по программам 1, 4 и 6. Опробование программы 2 отражено также в статьях [2, 3]. Результаты расчетов по программе 3 отражены в статье [4]. Материалы опробования программ 5 и 7 не приводятся. Стандартным элементом при работе всех программ было восстановление входного сигнала прибора. Оно велось в полосе частот от 0,2—0,3 Гц до 15—30 Гц. Верхняя часть среза определялась шагом цифрования, который в свою очередь выбирался с учетом фактической «изрезанности» записи. Почти всегда обеспечивалось не менее шести точек на минимальный видимый период записи. Нижняя частота среза выбиралась с учетом собственной частоты маятника (0,2 Гц).

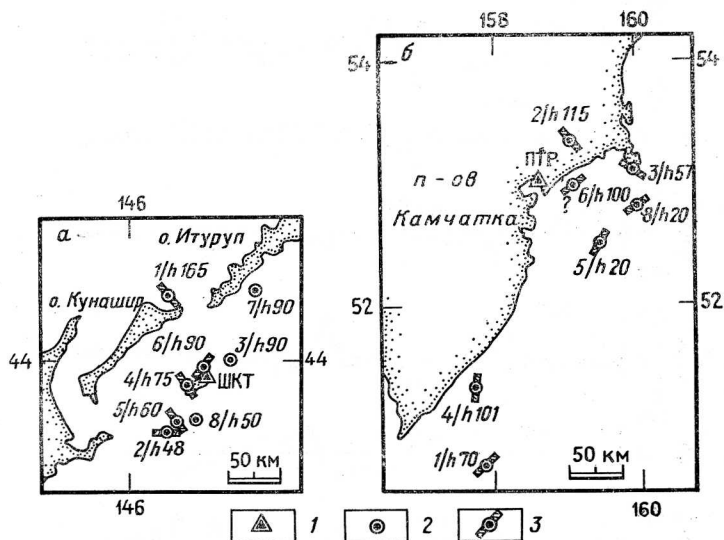


Рис. 1. Схема расположения очагов изученных землетрясений: а — район ст. ШКТ; б — район ст. ПТР. 1 — сейсмические станции; 2 — эпицентры землетрясений; 3 — то же с указанием ориентировки плоскости поляризации более быстрой S-волны на сейсмической станции. Номера эпицентров землетрясений соответствуют списку записей землетрясений, приведенных в табл. 1 и 2; *h* — глубина землетрясения

Расчет смещений, скоростей и ускорений. На рис. 2 приведены примеры восстановления смещений, скоростей и ускорений записей ст. ШКТ. Обработывались довольно короткие участки записей. Это связано с ограниченными вычислительными и графическими возможностями используемой ЭВМ. Исходная запись велосиграфа на графике совмещена (в нужном масштабе) с восстановленным графиком скорости. При сравнении исходных велосиграмм и графиков «истинной» скорости видно, что амплитуды этих графиков практически совпадают (как следовало ожидать), но заметны небольшие различия, вызванные фазовой коррекцией. Напомним, что фазовая характеристика реального велосиграфа нелинейна. По восстановленным записям ускорения, скорости и смещения определены максимальные значения этих величин (a , v , x), а также для скоростей и ускорений соответствующие видимые периоды (T_v , T_a). Результаты обработки сведены в табл. 3. Номера в табл. 3 соответствуют табл. 2.

На рис. 3 для большинства обработанных записей приведены графики исходных велосиграмм, смещений, восстановленных путем линейной обратной фильтрации, а также, где возможно, восстановленных импульсов смещения (см. описание программы 2). При сравнении вто-

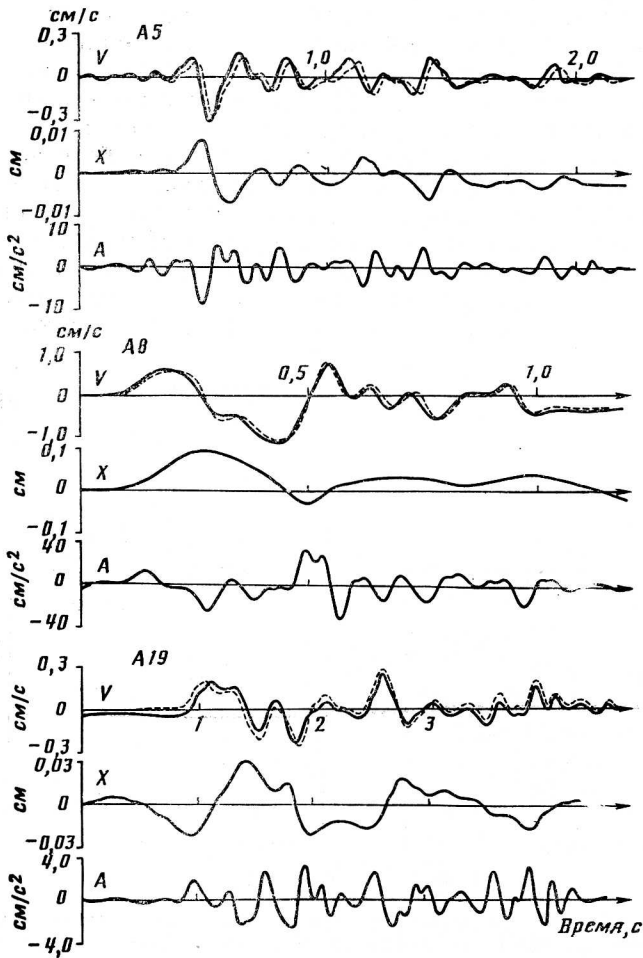


Рис. 2. Примеры восстановленных смещений (X), скоростей (V) и ускорений (A) для записей землетрясений на ст. ШКТ. Штриховая линия — исходная велосигграмма; индекс (например, $A5$) соответствует записям в табл. 1

рого и третьего графиков можно заметить, как использование априорной информации о сигнале позволяет снять искажения графиков смещения, восстановленных линейной обратной фильтрацией.

При более детальном рассмотрении данных рис. 3 следует учитывать следующие факты. Во-первых, при достаточно крутых лучах (углы выхода менее $35-40^\circ$) поляризация колебаний S -волн при регистрации на поверхности изотропной среды близка к линейной, даже при учете сферичности волнового фронта [10]. Во-вторых, по опыту изучения P -волн в аналогичных условиях [2] можно было рассчитывать на регистрацию характерных однополярных импульсов S -волн; соответствующим стандартной дислокационной модели очага. Оба эти ожидания, в общем, не оправдались. На рис. 3 видно, что имеются существенные различия формы волны на двух компонентах и что, если и выделяется с некоторой уверенностью однополярный импульс, то, кроме одного случая, лишь на одной из компонент.

В этих условиях были основания провести поляризационный анализ записей, рассчитывая на выявление анизотропии среды. С другой стороны, по однополярным импульсам можно было грубо оценить сейсми-

Характеристики записей землетрясений ст. ШКТ

Канал	V , см/с	T_D , с	a , см/с ²	T_a , с	x , см	S , см/с	$\lg M_0$, дин·см
Север — юг	0,12	0,45	2,4	0,12	0,007	$0,33 \cdot 10^{-2}$	23,22
Восток — запад	0,09	0,25	2,6	0,09	0,006	$0,31 \cdot 10^{-2}$	23,14
Север — юг	0,23	0,16	9,2	0,11	0,009	—	—
Восток — запад	0,3	0,1	12,8	0,13	0,009	$0,47 \cdot 10^{-2}$	23,07
Север — юг	0,20	0,3	2,88	0,33	0,025	$0,71 \cdot 10^{-1}$	23,13
Восток — запад	—	—	—	—	—	—	—
Север — юг	0,86	0,35	25,2	0,14	0,064	$0,21 \cdot 10^{-1}$	23,63
Восток — запад	0,47	0,3	13,4	0,10	0,035	$0,14 \cdot 10^{-1}$	23,46
Север — юг	0,27	0,14	11,5	0,12	0,015	$0,89 \cdot 10^{-2}$	22,96
Восток — запад	0,30	0,14	16,0	0,12	0,017	$0,60 \cdot 10^{-2}$	22,78
Север — юг	0,40	0,14	13,6	0,12	0,012	$0,23 \cdot 10^{-2}$	22,73
Восток — запад	0,39	0,09	18,4	0,1	0,011	$0,25 \cdot 10^{-3}$	21,89
Север — юг	0,06	0,19	1,38	0,19	0,018	—	—
Восток — запад	0,07	0,19	3,52	0,14	0,002	—	—
Север — юг	0,51	0,25	16,0	0,10	0,032	$0,10 \cdot 10^{-1}$	22,88
Восток — запад	0,62	0,18	18,0	0,18	0,024	$0,41 \cdot 10^{-2}$	22,47
Север — юг	8,0	0,19	205 (154)*	0,14	—	—	—
Восток — запад	17,6	0,45	320 (312)*	0,18	—	—	—

* В скобках — максимальное ускорение по акселерограмме.

ческие моменты и длительности очагового процесса для источников излучения.

Поляризационный анализ данных ст. ШКТ. По графикам смещений рис. 3 были построены траектории частиц грунта в горизонтальной плоскости (рис. 4). Участки, отображенные на рис. 4, помечены точками на рис. 3. На всех записях, кроме одной, линейной поляризации нет. Более того, следуя [11], в ряде случаев можно предположительно отметить вступление более медленной волны с направлением поляризации, приблизительно ортогональным к такому направлению для первой, более быстрой, S -волны. Эта ситуация указывает, по-видимому, на анизотропию среды под ст. ШКТ. Чтобы уточнить характер анизотропии, мы определили примерное направление поляризации более быстрой волны по графикам рис. 4 и нанесли их на карту рис. 1. Несмотря на ограниченный объем материала, создается впечатление, что эти направления не случайны, и можно даже предполагать, что направление поляризации быстрой S -волны вблизи ст. ШКТ примерно перпендикулярно островной дуге.

Поляризационный анализ данных по ст. ПТР. Неидентичность записей S -волны на двух горизонтальных компонентах ст. ПТР уже отмечалась [7]. Мы провели дополнительное исследование по данным этой станции, используя записи S -волн на канале С5С-ИСО. Параметры обработанных толчков сведены в табл. 2. Горизонтальные направления смещения в более быстрой S -волне отображены на рис. 1. Там же под № 8 нанесена поляризация записи 44 — единственной вполне пригодной для этого среди приведенных в [7]. Следует отметить, что толчки №№ 1, 4 и 3 — подкорковые, и угол выхода для них невелик за счет искривления лучей. Несмотря на некоторую упорядоченность, в целом четкой картины нет. Похоже, что к северо-востоку от ПТР проходит граница блоков с разным характером анизотропии. Эта идея поддерживается тем фактом, что для толчка № 6 с малым углом выхода наблюдается скорее эллиптическая, чем линейная поляризация, хотя в модели однородно-анизотропной среды следует ожидать в этом случае четкой линейной поляризации вблизи вступления S .

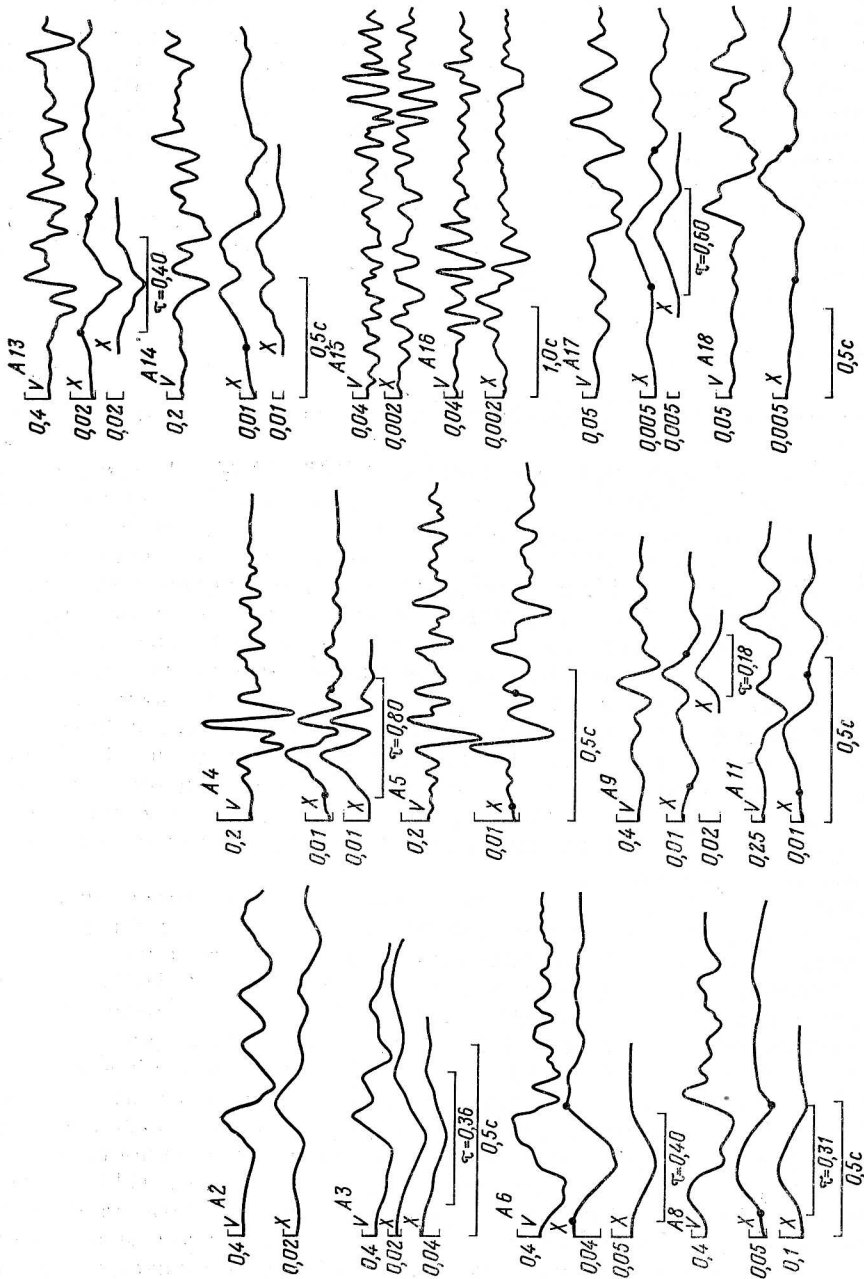


Рис. 3. Исходные велосигнары (V , см/с), функции смещения, восстановленные спектральным методом, и оценки импульсов смещения (X , см) для землетрясений ст. ШКТ. τ — длительность импульса, с. Точками помечены начало и конец участков записей, для которых ниже приведены траектории частиц грунта. Индексы записей соответствуют записям в табл. 1

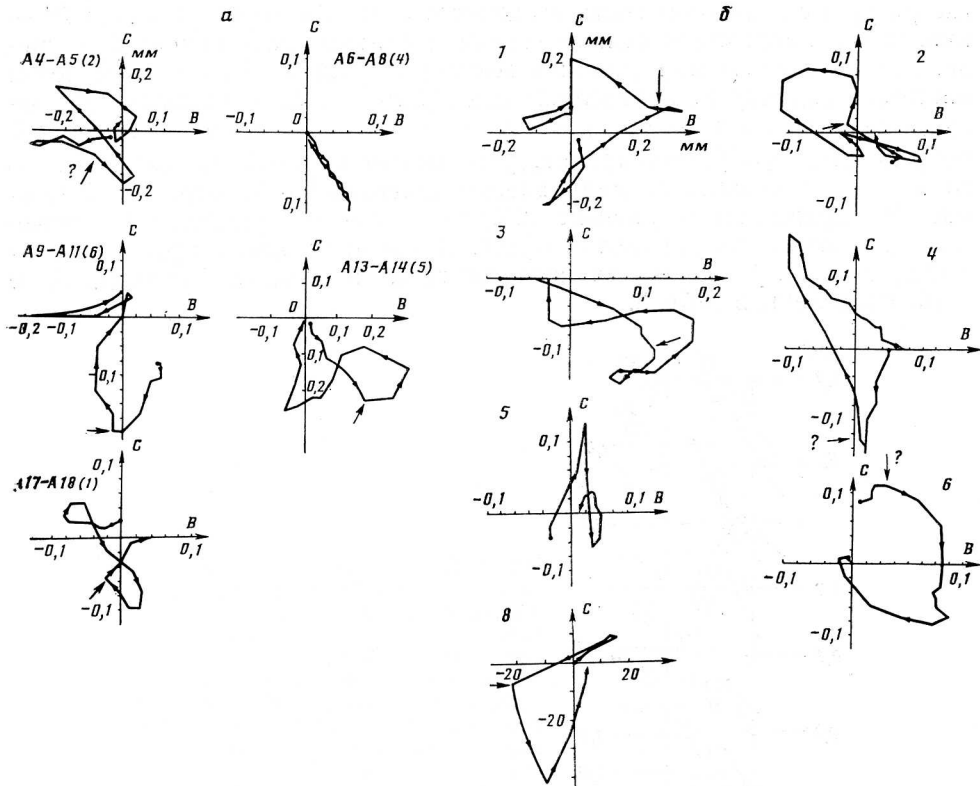


Рис. 4. Траектории частиц грунта в горизонтальной плоскости: а — на ст. ШКТ; б — на ст. ПТР. Номера графиков соответствуют номерам записей землетрясений в табл. 1 для ст. ШКТ и табл. 2 для ст. ПТР. Стрелкой помечен ориентировочный момент вступления более медленной волны

Ясно, что для решения вопроса о характере анизотропии среды под ст. ШКТ и ПТР требуется привлечение более обширного материала. Но уже сегодня можно считать весьма вероятным, что среда под этими станциями, а скорее всего и для других мест островной дуги, обладает заметной анизотропией. В этих условиях форма импульса S -волны даже при благоприятных условиях регистрации (близвертикальный луч) может быть заметно искажена средой. При этом, во-первых, почти всегда отсутствует корреляция формы волны S на двух горизонтальных компонентах, а во-вторых, предположительно однополярный импульс, излученный очагом, искажается по форме и, в частности, может терять свой характерный однополярный вид. В то же время в случае P -волн на ст. ПТР при углах выхода до 40° в большинстве случаев наблюдаются четкие однополярные импульсы. Это различие важно в методическом отношении.

Расчет оценок сейсмических моментов. Для расчета сейсмических моментов M_0 изученных землетрясений определяли площадь импульсов смещения по программе 2, попутно определяли длительность. Значение M_0 для источника, расположенного в коре или в мантии, определяли путем обращения соответствующих формул [1]:

$$S_0 = \frac{R^S M_0}{4\pi \rho_K c_K^3 r},$$

$$S_0 = \frac{R^S M_0}{4\pi \rho_K^{1/2} c_K^{1/2} \rho_M^{3/2} c_M^{3/2} r},$$

где ρ_k , ρ_m и c_k , c_m — плотность и скорость S -волн в коре и мантии; R^s — диаграмма направленности; r — гипоцентрального расстояние; S_0 — уровень спектра смещения (полный вектор) импульса S -волн на нулевой частоте. Величину S_0 определили как $S_1 k_1 k_2$, где S_1 — площадь импульса на записи сейсмографа, $k_1=0,5$ — поправка за влияние свободной поверхности, $k_2=\sqrt{2}$ — поправка, учитывающая проектирование полного вектора смещения на направление колебаний сейсмографа. Значение R^s принималось равным $(2/5)^{0,5}$ — среднеквадратическому значению диаграммы по фокальной сфере. Принимали $\rho_k=2,7$; $\rho_m=3,3$; $c_k=3,5$; $c_m=4,7$. Поправка за поглощение не вводилась. Значения S_0 и $\lg M_0$ приведены в табл. 3.

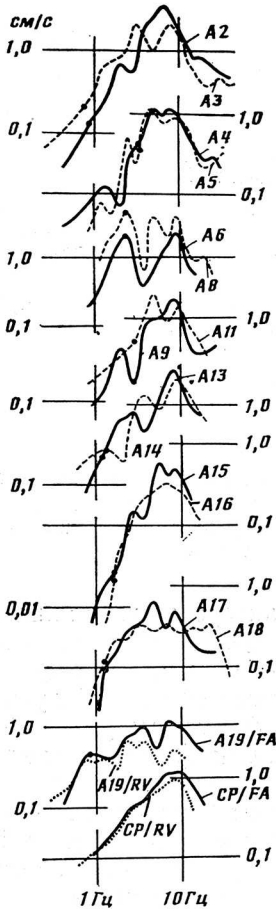


Рис. 5. Спектры Фурье ускорения для записей ст. ШКТ. Сплошной линией показаны спектры на канале восток—запад; штриховой — на канале север—юг для этой же записи. Индекс записи соответствует индексу в табл. 1. Левая часть графика спектра построена по значениям несглаженного амплитудного спектра Фурье; правая — сглаженный спектр по логарифмической сетке частот. Точкой помечено место сопряжений обоих участков спектра. На самом нижнем графике сплошной линией проведена осредненная форма спектра ускорения (CP/FA). Там же точками дана осредненная по всем записям форма спектра реакции по скорости (CP/RV). На втором снизу графике можно сопоставить спектры FA и RV для единичной записи

Спектры Фурье и спектры реакции. Для обработанных записей S -волн на ст. ШКТ были построены амплитудные спектры Фурье (для ускорений) и спектры реакции (скорости) (рис. 5). Графики спектров Фурье (без поправок за поглощение) состоят из двух участков: левый представляет значения несглаженного спектра Фурье, а правый — сглаженного по логарифмической сетке частот, с шириной полосы 0,1 декады. Относительная ширина полосы на уровне -3 дБ $\delta f/f_0=0,23$, где f_0 — осевая частота полосы, δf — полуширина полосы. Шаг сетки также составлял 0,1 декады. Левый и правый участки состыкованы в точке, помеченной кружком. Положение стыка участков определяется условием, что в пределы окна сглаживания попадают всего 2—3 точки спектра. Внизу приведена осредненная форма спектра ускорения, с частотой $f_{\max} \approx 8$ Гц.

Как известно, имеется определенная аналогия в форме и уровне спектров Фурье по ускорению и спектров реакций по скорости. Поэтому на рис. 5 мы приводим спектры реакций только для одной записи, для иллюстрации, а также форму осредненного спектра реакции по всем записям. Спектр реакции рассчитывался для 5% затухания. Сетка частот (собственных периодов осцилляторов) выбиралась, как и для сглаженных спектров Фурье, с шагом в 0,1 декады (0,100; 0,126; 0,158; 0,200; ... Гц).

Анализ записи Петропавловского землетрясения 1971 г. На ст. ПТР каналом С5С-ИСО-2 была получена весьма ценная запись землетрясения 25.XI.1971 г. с $M_{LH}=7,2$ ($M_w \approx 7,6$) на гипоцентральной дистанции около 120 км [8]. Одна трасса этой записи (север — юг) была опубликована в этой статье вместе с ее спектром Фурье. Представляло большой интерес определить максимальное ускорение по этой записи.

Оказалось, однако, что под действием сотрясений около 6 баллов и при больших амплитудах гальванометра самописец ИСО-2 не смог обеспечить вполне удовлетворительной записи. Были выявлены два рода дефектов записи. Дефекты первого рода были связаны с недостаточной яркостью «зайчика», что вело к потере небольших участков записи в области максимальных амплитуд. Возникшие разрывы довольно уверенно заполняются интерполяцией в случае трассы север — юг, но на трассе восток — запад полностью потеряно около 0,5 с записи (из 20—30 с сильных колебаний). Другой род дефектов связан с неоднократными приостановками устройства протяжки пленки на время 0,1—0,2 с. Такие приостановки идентифицируются как ступеньки на трассе основной записи и одновременно как засвеченные точки на записи меток времени, причем сами метки в этих случаях укорочены. Наличие подобных ступенек на записи велосиграфа практически исключает возможность надежного восстановления функции ускорения. Более того, стало ясно, что за счет ступенек и приостановок возникают определенные искажения в спектрах Фурье. Эти искажения, однако, не слишком велики в силу интегрального характера спектра.

На рис. 6, а, б приведены спектры Фурье и спектры реакции для трасс север — юг и восток — запад. Потерянный участок записи восток — запад произвольно гладко проинтерполирован. Степень надежности спектров по обоим компонентам сопоставима. Способ отображения спектров Фурье аналогичен рис. 5: несглаженный спектр на низких частотах и сглаженный по логарифмической сетке — на высоких.

Обработка записи землетрясения 06.XII.1978 г. На Южных Курилах. Это сильное землетрясение было записано стандартным акселерографом ССРЗ, запись ранее не публиковалась. На рис. 7 приводятся графики восстановленного ускорения и скорости, на рис. 6, в, г — спектры Фурье и спектры реакции, все для горизонтальных компонент. Параметры записей приведены в табл. 2.

Обсуждение и выводы

Опробование ряда компонент пакета программ для цифровой обработки сейсмических записей можно считать успешным. Пакет, по-видимому, может быть применен для систематического анализа записей сильных движений установками С5С-ИСО, на станциях ЕССН. В качестве стандартных элементов такого анализа можно предложить: расчет ускорения, скорости, смещения (при фильтрации частот ниже 0,2—0,3 Гц), определение максимального ускорения, расчет несглаженного и сглаженного по логарифмической сетке спектра Фурье; расчет спектра реакции по скорости с затуханием 5%. Пакет программ полностью приспособлен также для обработки записей акселерографов и сейсмографов с механической, оптической и гальванометрической регистраци-

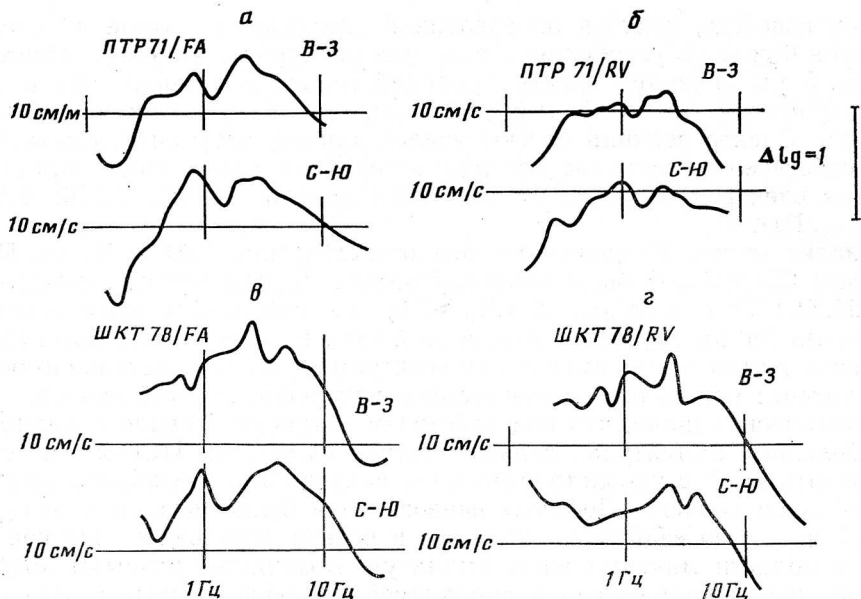


Рис. 6. Спектры Фурье ускорения (FA) и спектры реакции по скорости (RV) для записей двух сильных землетрясений 24.XI.1971 г. на ст. ПТР: а — FA, б — RV; и 06.XII.1978 г. на ст. ШКТ: в — FA, г — RV

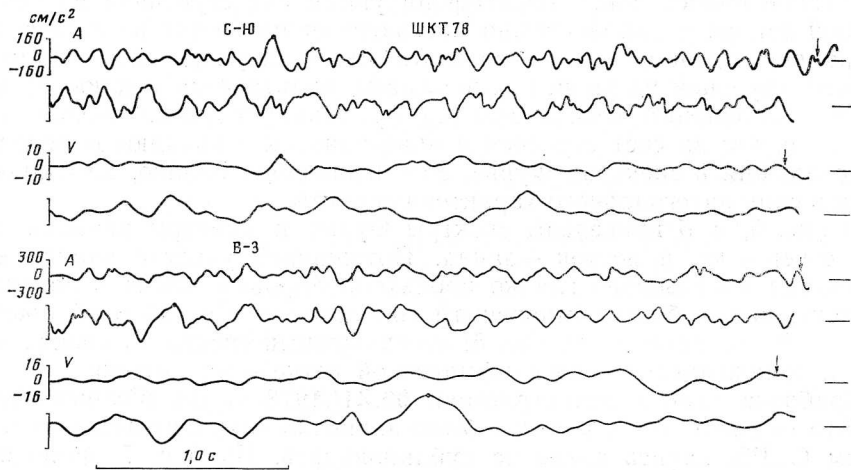


Рис. 7. Графики восстановленного ускорения (A) и скорости (V) землетрясения 06.XII.1978 г. ст. ШКТ. Графики разделены на части и изображены с небольшим перекрытием. Точками обозначены пиковые значения

ей; но опыт анализа таких записей сильных движений пока невелик. В настоящее время пакет реализован на Фортране в ОС РАФОС для ЭВМ СМ-3. Для массового счета весьма желателен его перенос на более мощную ЭВМ.

В работе получен также ряд результатов сейсмологического характера. Определена типичная форма спектра Фурье ускорения и спектра реакции для записей на ст. ШКТ, для мантийных толчков средней силы (3—5 баллов, $M_{LH}=5-6$, $r=50-100$ км). Ее можно считать первой оценкой формы спектра для скального грунта на Южных Курилах. Изучены инженерно-сейсмологические параметры записей двух сильных землетрясений с $M \approx 7,6$ вблизи очага. Получены данные для корреляций магнитуда — сейсмический момент и характерное время — сейсми-

ческий момент для Южных Курил. Показано вероятное наличие анизотропии среды под ст. ШКТ и ПТР по данным о поляризациях S -волн, откуда следуют методические выводы относительно использования этих волн при изучении очагов землетрясений. Эти выводы сводятся к пессимистической оценке возможности надежного восстановления импульса S -волн, излученного очагом землетрясения на глубине 50—100 км, по записи этого землетрясения вблизи эпицентра. Это заметно ухудшает возможности расчета (не оценки) сейсмического момента и детального изучения очагового процесса подобных толчков по записям в эпицентральной зоне. С другой стороны, очевидна возможность детального изучения анизотропии среды с использованием цифровых или оцифрованных записей S -волн. В оригинальных работах [10, 11] для поляризационного анализа применялись непосредственно цифровые отсчеты велосиграфов. По нашему опыту, использование восстановленного смещения (с коррекцией фаз) заметно улучшает разрешенность поляризационных диаграмм и делает более надежным выделение вступления более медленной волны.

Наконец, если влияние анизотропии на форму импульсов S -волн систематически столь же велико, как это кажется по нашим ограниченным данным, встает вопрос о надежности определения механизма очага с использованием S -волн в подобных условиях (мантийные толчки в островной дуге, данные близких короткопериодных станций).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. I. М.: Мир, 1983. 520 с.
2. Гусев А. А., Гусева Е. М. Деконволюция сейсмических записей (вопросы методики и некоторые результаты)//Физика сейсмических волн и внутреннее строение Земли. М.: Наука, 1983. С. 15—26.
3. Гусев А. А., Гусева Е. М. Восстановление импульсов объемных волн по сейсмограммам в интерактивном режиме//Вулканоология и сейсмология. 1986. № 5. С. 54—63.
4. Зобин В. М., Федотов С. А., Гордеев Е. И. и др. Сильные землетрясения на Камчатке и Командорских островах в 1961—1986 гг.//Вулканоология и сейсмология. 1988. № 1. С. 24—40.
5. Клаербут Джон Ф. Теоретические основы обработки геофизической информации. М.: Недра, 1981. 304 с.
6. Москвина А. Г. Форма P -волны при глубоких землетрясениях//Физика сейсмических волн и внутреннее строение земли. М.: Наука, 1983. С. 55—65.
7. Штейнберг В. В. Исследование спектров близких землетрясений для прогноза сейсмического воздействия//Колебания земных плотин. М.: Наука, 1967. С. 123—150.
8. Штейнберг В. В., Фремд В. М., Феофилактов В. Д. Колебания грунта при сильных землетрясениях на Камчатке в 1971 г.//Сильные камчатские землетрясения 1971 г. Владивосток: Наука, 1975. С. 7—14.
9. Beaudet P. R., Wolfson S. J. Digital filter for response spectra//Bull. Seism. Soc. Amer. 1970. V. 60. No. 3. P. 1001—1014.
10. Booth D. C., Crampin S. Shear-wave polarization of curved wave front at an isotropic free surface//Geophys. J. R. astr. Soc. 1985. V. 83. P. 31—45.
11. Crampin S., Evans R. Analysis of records of local earthquakes. Turkish Dilatancy Projects (TDP1, TDP2)//Geophys. J. R. astr. Soc. 1985. V. 83. P. 31—45.

Институт вулканологии
ДВО АН СССР

Поступила в редакцию
20.IV.1988

Институт морской геологии и геофизики
ДВО АН СССР