

КАЗАК ССР ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ
Х А Б А Р Л А Р Ы

—◆—
ИЗВЕСТИЯ

АКАДЕМИИ НАУК КАЗАХСКОЙ ССР
—◆—

СЕРИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ

№ 3

Издательство «НАУКА» Казахской ССР

АЛМА - АТА • 1980

УДК 550.344(083.73) (235.216—17)

М. С. ХАЙДАРОВ, В. И. ХАЛТУРИН**СЕЙСМИЧЕСКАЯ КОДА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ****Представления о природе коды и свойствах кода-волн**

Все чаще внимание исследователей привлекают так называемые кода-волны, или кода, — нерегулярные сейсмические волны. Они формируют хвостовую часть сейсмограммы — тот ее участок, на котором уже прошли все детерминированные (объемные и поверхностные) волны.

В литературе, посвященной кода-волнам, рассматриваются две количественные теоретические модели формирования хвостовой части сейсмограммы. Первая — это модель однократного рассеяния; кода рассматривается как суперпозиция волн, рассеянных назад от дискретных рассеивающих источников — неоднородностей [1, 2, 8]. Вторая модель — диффузионная; кода представляется как результат процесса диффузии сейсмической энергии [1, 2, 4, 5, 8]. Обе модели приводят к однотипному решению вида:

$$A(t) \sim t^{-\nu} \exp(-\pi f t / Q), \quad (1)$$

где $A(t)$ — амплитуда кода-волн на сейсмограмме; t — текущее время, отсчитываемое от момента возникновения землетрясения; f — частота; Q — добротность среды; ν — показатель степени функции геометрического расхождения.

Экспериментально установлено [3, 6, 8, 9, 10, 15], что огибающая коды имеет ряд замечательных свойств. Амплитудный уровень огибающей кода-волн, а также ее форма являются хорошим инструментом для изучения некоторых характеристик как очага землетрясения, так и среды. Это качество коды обеспечивается ее универсальными свойствами. Во-первых, это стабильность формы огибающей в пределах обширного региона, ее независимость (в фиксированном частотном интервале) от взаимного расположения очага и станции (а следовательно, от эпитрального расстояния), от энергии источника и от глубины очага.

Во-вторых, это пропорциональность уровня коды интегральной интенсивности очагового излучения (в регистрируемом диапазоне частот). В-третьих, это статистический механизм формирования коды, обеспечивающей эффективное осреднение диаграммы направленности и свойств среды.

Участие в коде множества лучей (приходящих в пункт наблюдения под разными углами и вышедших из источника под разными углами) обеспечивает эффективное осреднение.

Все это делает оценку интенсивности очагового излучения, выполненную по уровню коды на одной станции, не менее, а, вероятно, более представительной, чем оценка ее по амплитудам прямых волн по сети станций.

Аппаратура, материалы. Обработаны записи более 60 землетрясений, зарегистрированных стандартной аппаратурой различного типа, установленной на ЦСС «Алма-Ата» — СКД ($T_0=25$ сек), СКМ-III ($T_0=1,5$ сек), СКМ-III «Пик» ($T_0=1$ сек). В основном это записи слабых и умеренных ($M=3-5$) землетрясений Северного Тянь-Шаня и некоторых более сильных — Алтая, Кокшаала, Центрального и Южного Тянь-Шаня, Памира. Станция «Алма-Ата» расположена на осадочной толще в пределах города. Магнитуды землетрясений менялись от 3 до 6 и в отдельных случаях доходили до 7. Величины энергетического класса (K) были взяты по данным региональной сети сейсмических станций, а значения m и $M_{\text{ЛН}}$ — из Оперативного бюллетеня ЕССН.

Методика построения огибающей коды по сейсмограмме описана, например, в работах [9, 10, 15]. Пример индивидуальной огибающей одного землетрясения по записям стандартной аппаратуры различного типа показан на рисунке 1, а. На рисунке 1, б показаны периоды, наблюдаемые в коде для того же землетрясения.

Сводная огибающая коды

Сводная огибающая коды представляет собой результат осреднения формы многих индивидуальных огибающих. Каждая индивидуальная огибающая имеет продолжительность в зависимости от энергии землетрясения и чувствительности регистрирующей аппаратуры. Другими словами, мы имеем набор огибающих различной продолжительности, которые должны быть совмещены определенным способом для построения сводной огибающей во всем интервале времени прослеживания коды.

Построение сводной огибающей проводилось следующим образом. Все индивидуальные огибающие были предварительно подразделены на группы с интервалами прослеживания коды по оси времен (сек): 20—300, 140—4000, 700—10 000 (для записей СКД) и 40—400, 200—2000 (для записей СКМ-III). Для каждой группы составлялась

собственная сводная огибающая, для чего на кальку наносилась самая продолжительная огибающая. При этом желательно, чтобы она была и достаточно гладкой. Следующая огибающая совмещалась с ней наилучшим образом, так, чтобы совпадали оси вре-

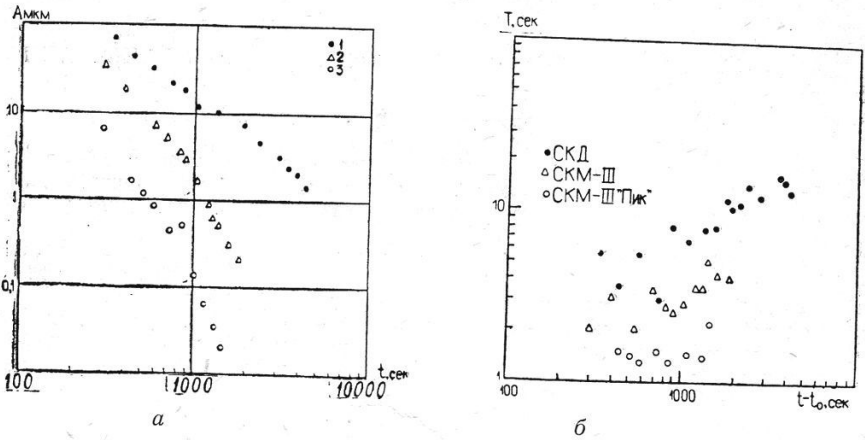


Рис. 1. Землетрясение 8 октября 1978 года; огибающие коды, записанные тремя типами аппаратуры (а): 1 — СКД, 2 — СКМ-III, 3 — СКМ-III «Пик»; зависимость периодов в коде от времени (вдоль сейсмограммы) по записям приборов трех типов (б)

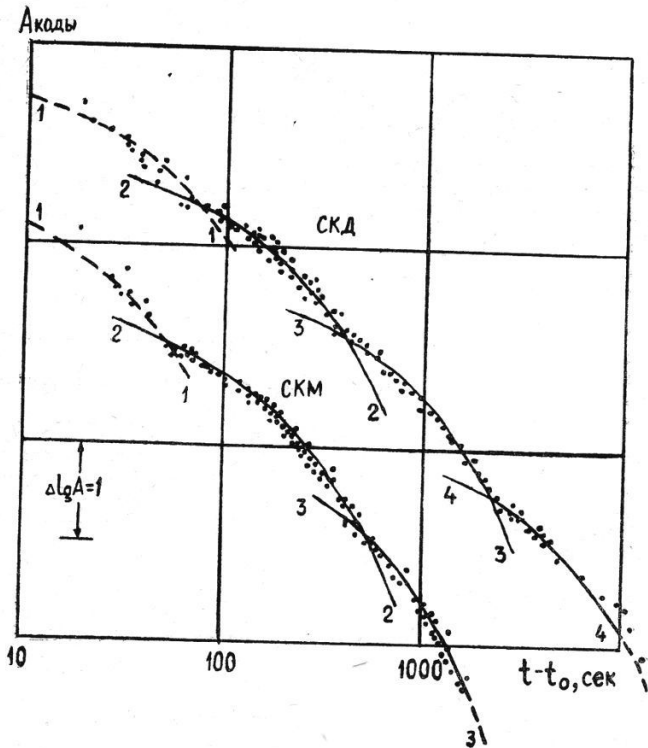


Рис. 2. Сводные огибающие коды землетрясений Северного Тянь-Шаня по записям различных приборов станции «Алма-Ата». Пунктиром обозначены теоретические кривые вида (1), аппроксимирующие различные участки сводной огибающей

мен. Таким образом, на кальке накапливались поочередно все индивидуальные огибающие данной группы. Конечным этапом работы являлось наилучшее совмещение огибающих групп между собой. Таким путем мы получили сводные огибающие по записям СКД продолжительностью до 10 000 сек и по сейсмограммам СКМ-III — до 2000 сек. На рисунке 2 показаны сводные огибающие по записям СКМ-III и СКД (станция

«Алма-Ата»). Максимальный разброс по амплитуде, за исключением начальной части, составил 0,1 единицы логарифма для обеих кривых.

Оказалось невозможным аппроксимировать сводную огибающую одной кривой вида (1) с одним значением добротности. Но сводная огибающая хорошо аппроксимировалась, как и в работах [9, 15], несколькими теоретическими кривыми вида (1), каждая из которых имеет свое значение параметра Q . На рисунке 2 они показаны прерывистыми линиями, а в таблице 1 приведены данные об интервале прослеживания каждой из ветвей и параметр Q — добротность, определенная для каждой теоретической кривой при двух допущениях о значении параметра ν . Средний период $T_{ср}$ для каждой ветви определялся по гистограмме распределения периодов.

Рассмотрим надежность выделения отдельных ветвей. Наиболее неустойчивой по записям и тех и других приборов является первая ветвь, так как она формируется в сравнительно малых объемах, не перекрывающихся для разных землетрясений. Кроме того, эта ветвь построена по малому числу данных, так как для ее построения необходимы достаточно сильные и близкие землетрясения.

Таблица 1

Значения параметров $T_{ср}$ и Q для различных ветвей коды на записях приборов СКМ и СКД

№ ветви	Интервал прослеживания, сек	$T_{ср}$, сек	Q	
			при $\nu=0,5$	при $\nu=0,75$
СКМ-III				
1	20—90	0,8	90	100
2	90—380	1,4	320	370
3	380—1000	1,8	700	780
СКД				
1	20—75	1,0	130	170
2	75—400	2,4	200	220
3	400—2200	5,6	350	430
4	2200—8000	13,0	740	830

Вторая ветвь существенно более устойчива, но и для нее характерен повышенный разброс, особенно в диапазоне 100—200 сек, что, по-видимому, связано со спецификой геологического строения нашего района.

Наиболее устойчива третья ветвь, для нее характерны наименьший разброс и высокая сходимость данных разных землетрясений.

Четвертая ветвь наблюдается только по записям СКД. Надежность ее аппроксимации относительно невелика.

Периоды, наблюдаемые в коде. Записи одного и того же землетрясения различными типами аппаратуры, конечно, резко отличны. Особенно хорошо демонстрируют это различие огибающие коды.

На рисунке 1, а огибающие коды землетрясения, происшедшего 8 октября 1978 года ($M=6,0$), по записям различных типов стандартной аппаратуры показаны с сохранением абсолютного уровня: СКД — наибольший уровень, СКМ-III — средний, СКМ-III «Пик» — наименьший. Как и следовало ожидать, уровень огибающей зависит от ширины полосы пропускания аппаратуры, т. е. от положения ее низкочастотного среза.

Крайние кривые на рисунке 1, а непараллельны — разность уровней между ними возрастает от одного порядка при 300 сек до двух порядков при 1000 сек.

На рисунке 1, б приведена зависимость периода в коде от текущего времени для упомянутого землетрясения, которая также позволяет подчеркнуть влияние типа аппаратуры. Наиболее значительный рост периодов наблюдается для СКД.

Связь уровня коды с интенсивностью очагового излучения.

Применение коды для магнитудной и энергетической классификации землетрясений

Энергия, излученная очагом, — важнейшая характеристика землетрясения. Быстрое и точное определение ее необходимо при массовой обработке записей землетрясений.

В работах [6, 10] описан способ определения энергии очага, основанный на фундаментальном свойстве коды — постоянстве уровня и формы огибающей, независимо от расстояния. Мы провели аналогичную калибровку.

Прежде всего надо было выяснить корреляционную связь между амплитудным уровнем коды и энергией очага землетрясения. Мы выбрали амплитуды коды на фиксированных временах ($t_c=100$ сек для СКМ-III, $t_c=1000$ сек для СКД) и привели их в соответствие с энергетическими классами и магнитудами землетрясений, записанных

на сейсмограммах станции «Алма-Ата». Выборка была произведена для нескольких десятков землетрясений. Прямые, осредняющие облако точек, имеют следующий вид (рис. 3) для записей СКМ-III и СКД соответственно:

$$\lg 2A_{100} = -0,24 + 0,58(K-10);$$

$$\lg 2A_{1000} = -5,3 + 1,05 M$$

для диапазонов $K=7-13$ и $M=3-6$.

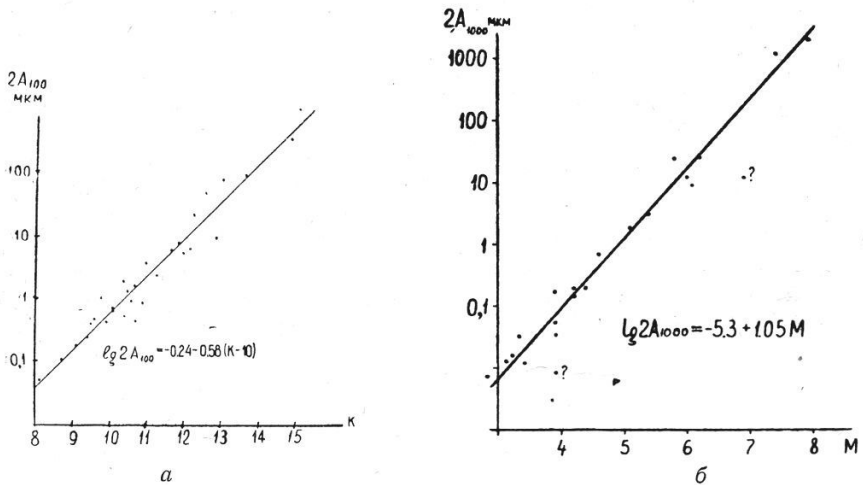


Рис. 3. Зависимость амплитудного уровня коды: при $t_c=100$ сек от энергетического класса по записям СКМ-III (а); при $t_c=1000$ сек от магнитуды по записям СКД (б)

Номограмма. На основании приведенных материалов мы построили номограммы (рис. 4) для магнитудной и энергетической классификаций землетрясений. Номограммы построены для определения энергетического класса (см. рис. 4, а) по записям СКМ-III и магнитуд (см. рис. 4, б) по записям СКД, где форма кривых повторяет форму сводных огибающих, а расстановка их определяется корреляционными соотношениями.

Для практического пользования номограммой достаточно построить огибающую коды землетрясения (в большинстве случаев достаточно 3—5 точек) в масштабах, указанных на номограмме, и положить ее на последнюю с соблюдением уровня амплитуд.

Средняя форма огибающей по СКД была получена нами при таком положении, что с расстоянием увеличивалась и магнитуда записываемых землетрясений. Мы видели (см. рис. 1, б), что на записях СКД с ростом магнитуды землетрясения периоды в коде тоже увеличиваются. Надо полагать, что в случае, например, близкого сильного или далекого слабого землетрясения форма кривой на номограмме и форма наблюдаемой (искомой) огибающей не будет совпадать достаточно хорошо. Но для первого приближения это небольшой недостаток, тем более, что на практике такие случаи будут редкими.

Полученные зависимости отражают только часть возможного применения кода-волн для определения динамических характеристик очага. Дальнейшим шагом в магнитудной классификации может быть приложение коды в задаче определения очагового спектра, сейсмического момента, длительности очагового излучения, сброса напряжений по записям коды станциями ЧИСС (частотно-избирательная сейсмическая станция).

Станционные поправки. Мы построили номограммы для опорной станции «Алма-Ата». Как упоминалось выше, статистический механизм формирования коды предполагает такое фундаментальное свойство, как единство формы и амплитудного уровня огибающей коды в пределах обширного региона. Если сеть станций оборудована стандартной аппаратурой, то нет необходимости строить номограммы для каждой станции. Однако на практике уровни коды одного землетрясения на различных станциях неодинаковы вследствие разных станционных условий. В таких случаях достаточно ввести поправку на станционные условия, приведя тем самым амплитуды на какой-либо станции к амплитуде на опорной станции.

Пример оценки параметров среды по огибающим сейсмической коды

Согласно теоретическим представлениям, хвостовая часть сейсмограммы сформирована рассеянными сейсмическими волнами [1, 2, 8, 13]. Через некоторое время, соответствующее выходу огибающей на асимптоту, вся среда (достаточно большой объем)

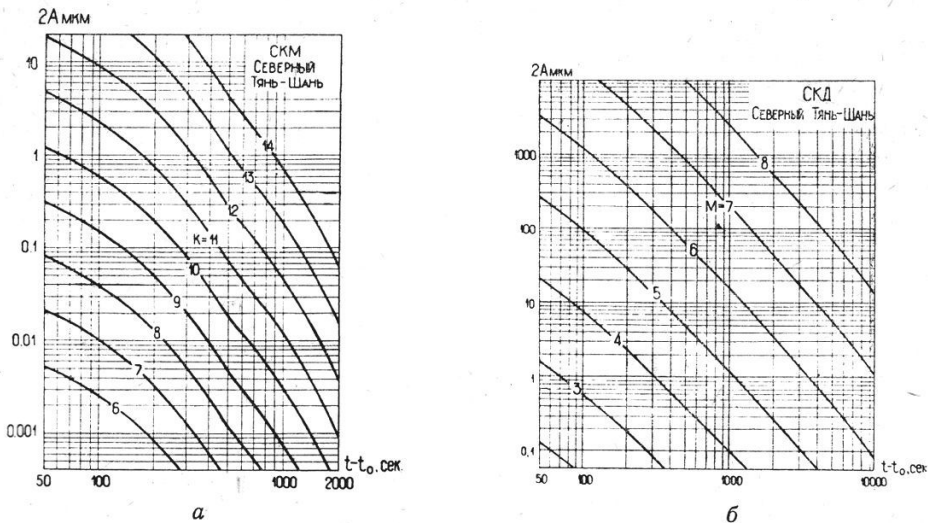


Рис. 4. Номограмма (станция «Алма-Ата») для определения энергетического класса K по записям СКМ-III (а); магнитуды по записям СКД (б).

оказывается «заполненной» рассеянной сейсмической энергией, претерпевшей многократные акты рассеяния. Такая сейсмическая энергия, естественно, несет в себе информацию об осредненных рассеивающих и поглощающих свойствах среды.

В формуле (1) поглощение энергии колебаний учитывается множителем вида $\exp(-\pi t/Q)$. В этом выражении все величины известны, кроме параметра Q — добротности среды. Сравнивая наблюдаемые амплитудные огибающие с теоретическими, можем определить параметр Q .

Методика определения значения добротности основывается на том, что по виду экспериментальной кривой $A(t)$ можно определить параметр QT . Зная средние значения периода T для каждой ветви, можно оценить величину Q . Мы определяли параметр QT графически, пользуясь палеткой, предложенной Т. Г. Раутиан, и аппроксимируя отрезок экспериментальной кривой теоретической кривой вида (1) при заданном значении параметра v .

Представленные на рисунке 2 сводные огибающие, как указывалось выше, не могут быть аппроксимированы одной теоретической кривой, но они хорошо описываются несколькими теоретическими кривыми, каждая из которых имеет свое значение Q . Некоторые исследователи объясняют возникновение трех ветвей на сводной огибающей тем, что по мере распространения в пространстве сейсмические лучи захватывают все более глубокие слои. Естественно, можно ожидать, что на более поздних временах будут приходить волны, проникшие в глубокие высокочастотные слои. Мы разделили наши сводные огибающие на несколько ветвей и для каждой из них определили параметр Q .

В таблице 1 приведены значения величины Q при двух значениях показателя функции расхождения $v=0,5$ и $v=0,75$.

Величины добротности, полученные нами для первой ветви, примерно в два раза меньше значений, полученных в работе [11], но последние были определены для более высокочастотного диапазона (2,7—22,0 Гц), что согласуется с тенденцией роста Q с частотой, отмечаемой рядом авторов [14]. Повышение значений добротности для последних ветвей наших сводных огибающих можно объяснить тем, что на более поздних временах на сейсмограмму приходят волны, проникшие, по-видимому, в более глубокие высокочастотные слои мантии, на что указывалось в работе [10] и др.

Перспективы дальнейшего применения кода-волн для практических задач сейсмологии. Результаты, полученные выше (связь амплитудного уровня коды с энергией очага, оценки добротности), — это только часть возможного применения коды для практических целей. Более интересными и необходимыми представляются возможности применения коды в задаче определения очагового спектра, сейсмического момента, длительности очагового излучения, сброса напряжений по записям коды станциями ЧИСС.

Сравнение сводных огибающих коды разных регионов

Сравнение сводных огибающих коды разных регионов может дать дополнительную информацию о физических свойствах их сред. Мы провели такое сопоставление по сводным огибающим коды короткопериодных приборов.

При обзоре теоретических представлений о природе коды мы показали, что аналитические выражения, описывающие закон спадания амплитуд коды со временем, будут состоять из произведения степенной функции, ответственной за геометрическое рас-

хождение амплитуд, на экспоненту, обусловленную поглощением. Говорили, что на больших временах (при $t \gg Q/\pi f$) поглощение будет доминировать. Таким образом, форма кривой на больших временах будет зависеть только от произведения QT , где Q — добротность среды, T — период, наблюдаемый в коде.

Для каждой ветви сводной огибающей мы имели фиксированную величину среднего значения периода $T_{\text{ср}}$. Тогда можно полагать, что форма кривой зависит в данном случае только от величины Q .

Рассмотрим таблицу 2. В ней представлены данные о добротности по регионам для каждой ветви.

Таблица 2
Величины добротности Q , определенные для трех ветвей, огибающих коды (прибор СКМ-III)

Регион	Номер ветви		
	1	2	3
Кавказ	70	140	290
Гиндукуш	—	260	590
Хребет Петра I	60	210	500
Ферганская впадина	79	220	500
Южный Тянь-Шань	50	250	410
Срединный Тянь-Шань	90	290	530
Северный Тянь-Шань	100	370	780
Алтай—Саяны	120	500	800

Значения Q для первой ветви не будем брать во внимание, так как она формируется в малых объемах земной коры, не перекрывающихся для разных регионов.

По значениям добротности для второй ветви регионы можно разделить на две группы — четыре верхних региона назовем первой, а четыре нижних — второй группой.

Средняя величина Q для первой группы равна 210, а для второй — 350. Предполагается, что причиной этих различий может быть геологический возраст складчатости. Все регионы (см. табл. 2) расположены в пределах Альпийского Средиземноморского пояса. Однако по возрасту доальпийской складчатости регионы, входящие в первую группу, относятся к герцинской, а регионы второй группы — к каледонской складчатости.

Выше интерпретировали вторую ветвь как рассеяние в коре и верхах мантии. Данные о возрасте регионов и величинах их добротности наводят на мысль о том, что относительно поздняя по возрасту складчатость является более нарушенной и неоднородной по физическим свойствам. И, наоборот, чем старше возраст складчатости региона, тем (относительно) более консолидирована его среда, т. е. количество рассеивающих неоднородностей относительно мало.

Практически слабо различающиеся значения добротности для третьей ветви свидетельствуют в пользу нашего предположения о том, что она сформирована рассеянными волнами в мантии.

Интересно также то, что наименьшие и наибольшие значения добротности относятся к данным по Кавказу и Алтаю — Саянам соответственно, причем как по второй, так и по третьей ветвям.

Нельзя не отметить невысокую точность определения величин Q , так как относительно большая погрешность вошла в расчеты при использовании значений среднего периода. Этого недостатка можно избежать при работе с записями частотно-избирательной сейсмической станции.

Конечно, результаты приведенного анализа далеки от однозначности, но при более корректном подходе (применение ЧИСС-записей) методика может быть использована для изучения диссипативных свойств среды.

Выводы

Дан краткий обзор теоретических представлений о природе кода-волн и о результатах экспериментальных исследований.

По записям землетрясений Северного Тянь-Шаня и сопредельных территорий на сейсмических станциях северо-тяньшаньской сети получены сводные огибающие коды короткопериодной и длиннопериодной аппаратуры.

Представлены первые результаты по изучению свойств кода-волн данного региона в диапазоне времен и магнитуд (энергетических классов) соответственно для записей СКД и СКМ (сек): 50—10 000, 50—2000; $M=3-7$, $K=8-14$.

Проведена магнитудная калибровка записей землетрясений применительно к данной сети и даны номограммы для практического применения.

Проиллюстрировано применение кода-волн для изучения диссипативных свойств среды.

Сопоставлены величины добротности, полученные при помощи кода-волн, для разных регионов.

Освещены перспективы дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Aki K., Chouet B.* Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering effects. — *J. Geophys. Res.*, 1975, 80, No. 23.
2. *Раутиан Т. Г.* Роль очага и среды в формировании сейсмических колебаний. — В кн.: Исследования по физике землетрясений. М., «Наука», 1976.
3. *Раутиан Т. Г., Халтурин В. И.* Спектральные свойства коды местных землетрясений как инструмент изучения очагового излучения. — *ДАН СССР*, 1976, т. 226, № 3.
4. *Wesley I. P.* Diffusion of seismic energy in the near range. — *J. Geophys. Res.*, 1965, 70.
5. *Berkhemer H.* A possible scattering mechanism for lunar seismic waves. — *Z. für Geoph.*, 1970, 36.
6. *Нерсесов И. Л., Копничев Ю. Ф., Востриков Г. А.* Магнитудная калибровка землетрясений по кода-волнам на расстояниях до 3000 км. — *ДАН СССР*, 1975, т. 222, № 1.
7. *Востриков Г. А.* Определение сейсмического момента местных землетрясений по характеристикам коды. — *Известия АН СССР. Физ. Земли*, 1975, № 11.
8. *Копничев Ю. Ф.* Сейсмические кода-волны. М., «Наука», 1978.
9. *Пустовитенко Б. Г., Раутиан Т. Г.* Применение сейсмической коды к исследованию затухания сейсмических волн в Крымском регионе. — *«Геофиз. сб. АН УССР»*, 1977, вып. 78.
10. *Закиров М. С., Раутиан Т. Г., Халтурин В. И.* Магнитудная классификация землетрясений Узбекистана по уровню хвостовой части сейсмограммы. — *«Узб. геол. журнал»*, 1978, № 1.
11. *Халтурин В. И.* Поглощение сейсмических волн в земной коре Северного Тянь-Шаня. — В кн.: Экспериментальная сейсмология. М., «Наука», 1971.
12. *Халтурин В. И.* Соотношения между магнитудными определениями, ожидаемые и наблюдаемые. — В кн.: Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М., «Наука», 1974, т. 1.
13. *Rautian T. G., Khalturin V. I.* The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum. — *BSSA*, v. 68, No. 4, 1978.
14. *Винник Л. П., Лукк А. А.* Горизонтальные неоднородности верхней мантии в районах платформенной активизации Центральной Азии. — *Известия АН СССР. Физ. Земли*, 1975, № 7.
15. *Закиров М. С., Халтурин В. И.* Влияние региона очага и региона наблюдения на форму огибающих кода-волн. — *«Узб. геол. журнал»*, 1977, № 5.

*Институт сейсмологии АН КазССР,
г. Алма-Ата*