

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ТРУДЫ ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ЗЕМЛИ ИМ. О.Ю. ШМИДТА

КОЛЕБАНИЯ ГРУНТА И СЕЙСМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ
СЕЙСМОЛОГИИ

ВЫПУСК 23



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА
1982

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ОЧАГОВЫЕ СПЕКТРЫ

Из опыта сейсмологии известно, что землетрясения с одинаковыми магнитудами могут производить разный макросейсмический эффект. Расчет макросейсмического поля по обычным формулам [1] дает лишь приближенную оценку. Отклонения наблюдаемых баллов от вычисленных из магнитуды по формулам обычно связывают с вариациями поглощения, с влиянием разломов, которые пересекает сейсмическая радиация, с различиями рельефа местности и грунтовых условий. Эти факторы и рассматриваются в первую очередь. Их влияние можно считать довольно хорошо изученным.

Существует еще один фактор — спектральный состав сейсмического излучения, специфический для каждого отдельного землетрясения. Естественно, что два землетрясения с одинаковыми магнитудами, различающиеся интенсивностью высокочастотного излучения, дадут при прочих равных условиях неодинаковый эффект: более высокочастотное землетрясение произведет более сильные разрушения. Чтобы изучить эту зависимость по наблюдениям, нужно параметризовать как макросейсмические, так и спектральные данные. В настоящей работе предлагается такая параметризация и проводится корреляция макросейсмической интенсивности с магнитудой, сейсмической энергией и с несколькими параметрами очаговых спектров.

П а р а м е т р и з а ц и я м а к р о с е й с м и к и. В каталогах и сводках землетрясений макросейсмика описывается исходными макросейсмическими сведениями (оценками интенсивности в конкретных пунктах) и значением сейсмической интенсивности в эпицентре I_0 . Для корреляции со спектральными параметрами очага необходимо описать макросейсмический эффект одним числом, которое отражало бы влияние самого очага, роль же таких факторов, как глубина очага, эпицентрального расстояние, особенности распространения волн на трассе, грунтовые условия, была бы минимизирована. Значение балла в эпицентре I_0 в качестве такой характеристики не годится. Площадь, охватываемая изосейстой какого-либо фиксированного балла, тоже зависит от глубины очага и вообще может быть надежно определена лишь для землетрясений с очень полными макросейсмическими данными.

Предлагается ввести макросейсмическую магнитуду Y , определяя ее на основании совокупности всех имеющихся макросейсмических данных. Определим макросейсмическую магнитуду как величину балла, приведенного к фиксированному расстоянию и усредненного по всем имеющимся пунктам. Для построения шкалы Y нужна калибровочная кривая, описывающая стандартное затухание балла с расстоянием для данного региона и нужно выбрать опорное расстояние R_0 , к которому приводятся все оценки I .

Калибровочная кривая должна быть построена по наблюдениям в данном регионе. Чтобы исключить влияние глубины очага, расстояние должно быть гипоцентрального. Как правило, зависимость балла от расстояния предполагается в виде степенной функции

$$I = bM - \nu \lg R + C. \quad (1)$$

В Новом каталоге [1] дается значение $\nu = 3,5$ для Средней Азии.

Мы построили кривую затухания интенсивности сотрясений заново, не исходя из априорной формулы, чисто эмпирически. Для этого были взяты опубликованные в ежегодниках "Землетрясения в СССР" данные о величинах сотрясений и эпицентральных расстояниях землетрясений Средней Азии и Северного Тянь-Шаня. Гипоцентральные расстояния вычислялись на основании опубликованных там же данных о глубинах очагов. Иногда пересчет затруднялся тем, что в сборниках приводились различные глубины для одного и того же землетрясения — в зависимости от того, определялись они по данным местных сетей станций, удаленных станций ЕССН или по макросейсмическим данным. В таких спорных случаях мы отдавали предпочтение "макросейсмическим" глубинам, а при их отсутствии — оценкам местных сетей.

За период 1971—1977 гг. в Средней Азии произошло несколько сильных землетрясений, для которых опубликованы весьма подробные макросейсмические сведения вплоть до расстояний 1000 км. Графики затухания, полученные по таким землетрясениям, и были положены в основу построения сводного графика и осредняющей его кривой. На рис. 1—3 даны примеры индивидуальных графиков. Опорными были землетрясения Газли, главный толчок Маркансу (рис. 1) и еще несколько более слабых землетрясений, хорошо выявивших форму графика затухания на малых расстояниях (рис. 3, а, б, г, о, п, с). На всех графиках рис. 1—3 показана также кривая, осредняющая сводный график, и проведены (пунктиром) границы полосы, включающей 95% точек. Ширина полосы получается равной примерно ± 1 балл.

Если аппроксимировать график прямой линией, игнорируя ее искривление, то наклон будет соответствовать $\nu = 3,5$, полностью согласуясь со стандартным значением этого параметра для Средней Азии, согласно работе [1]. Однако отличие формы эмпирического графика от прямой видно отчетливо. При расстояниях до 50 км затухание сравнительно большое. Далее при 50—200 км виден участок выполаживания, после чего крутизна графика вновь постепенно нарастает и форма его приблизительно экспоненциальна. Заметим, что форма осредняющей кривой затухания балла очень похожа на калибровочные кривые, полученные по инструментальным данным и положенные в основу магнитудной шкалы Рихтера M_L [2] и амплитудной номограммы шкалы энергетических классов K для Средней Азии [3] и Кавказа [4]. По макросейсмическим данным аналогичный эффект был отмечен Эргином [5]. Он обнаружил для ряда землетрясений в Турции выполаживание графика затухания балла с расстоянием. Пологий участок находился вблизи отметки 100 км. В качестве возможного объяснения Эргин предложил появление на этих расстояниях дополнительной энергии, которую приносят волны, отраженные под критическим углом от какой-либо сильной границы: подошвы осадков, гранитного слоя или границы Мохо. По нашему мнению [3], всплеск или малое затухание амплитуд вблизи отметки 100 км связаны с появлением волн, отраженных под критическими углами от подошвы земной коры. По-видимому, такая форма затухания амплитуд и макросейсмической интенсивности вообще является широко распространенной, типичной по крайней мере для континентальных районов.

Опорное расстояние R_0 шкалы макросейсмических магнитуд мы рассматриваем лишь как элемент формализации. При выборе R_0 мы стремились сделать его большим, нежели погрешность определения координат эпицентра и глубины очага, и в то же время не слишком большим, иначе макросейсмическая магнитуда стала бы принимать для сравнительно слабых землетрясений отрицательные значения. Величина $R_0 = 30$ км оказалась удобной: при этом численные значения Y получаются примерно равными магнитуде M_{LH} землетрясения. Конечно, при сильных землетрясениях с магнитудами, равными 7 и более, размеры очагов будут близкими к 30 км или даже большими. В этих случаях определение Y нужно проводить главным образом по наблюдениям на больших расстояниях, и тогда протяженность очага практически не скажется на результатах оценки Y .

Практическое определение макросейсмической магнитуды. Итак, макросейсмическая магнитуда Y есть, по определению, величина сотрясения в баллах шкалы MSK, приведенная к расстоянию $R_0 = 30$ км,

$$Y = I(R) - \alpha(R) \quad (2)$$

и осредненная по совокупности всех имеющихся данных $I(R)$. Калибровочная кривая $\alpha(R)$ в численном виде приводится в табл. 1. Практически удобно находить Y графически, по палетке. Она представляет собой калибровочную кривую и две пунктирных линии, ограничивающих полосу разброса, и две стрелки: указывающую на $R = 30$ км (на оси абсцисс) и отмечающую на оси ординат уровень кривой при 30 км. Для определения Y все имеющиеся данные $I(R)$ наносят на график на прозрачной бумаге и накладывают его на палетку. Перемещением графика вверх-вниз добиваются наилучшего совмещения точек с полосой между двумя пунктирными линиями.

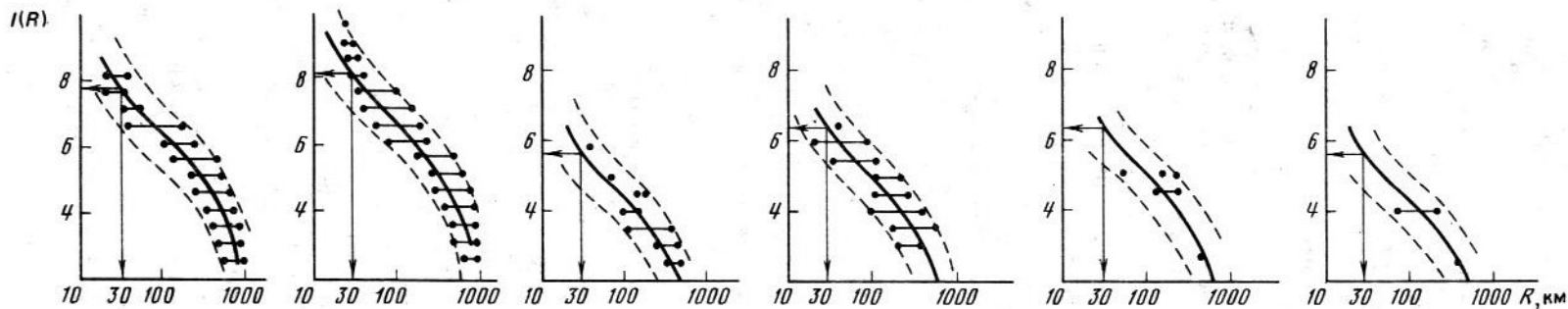
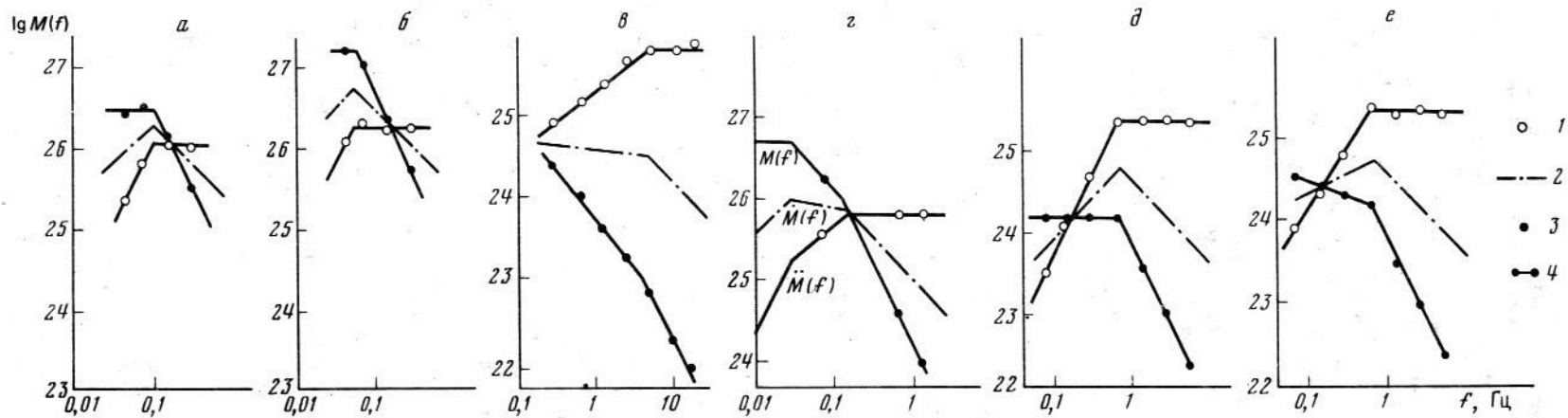


Рис. 1. Сопоставление очаговых спектров (вверху) и макросейсмических данных (внизу) для сильных землетрясений Газли и Маркансу
a — 8 апреля 1976 г., 02–40, $M = 7,0$; *б* — 17 мая 1976 г., 02–58, $M = 7,2$; *в* — 14 июля 1977 г., 05–49, $M = 5,4$; *г* — 11 августа 1974 г., 01–13, $M = 7,3$; *д* — 11 августа 1974 г., 20–05, $M = 5,8$; *е* — 11 августа 1974 г., 21–21, $M = 6,3$; обозначения вверху: 1 — спектры ускорения $\dot{M}(f)$, $\text{дин} \cdot \text{см}/\text{с}^2$; 2 — спектры скорости $\dot{M}(f)$, $\text{дин} \cdot \text{см}/\text{с}$; 3 — спектры смещения $M(f)$, $\text{дин} \cdot \text{см}$; 4 — крайние расстояния, на которых наблюдался данный балл, промежуточные точки заменены горизонтальной линией; сплошная кривая — осредненное затухание сотрясения с гипоцентрального расстоянием; пунктирные линии ограничивают полосу шириной ± 1 балл; стрелки указывают значения $R = 30$ км и $I(30 \text{ км}) = Y$

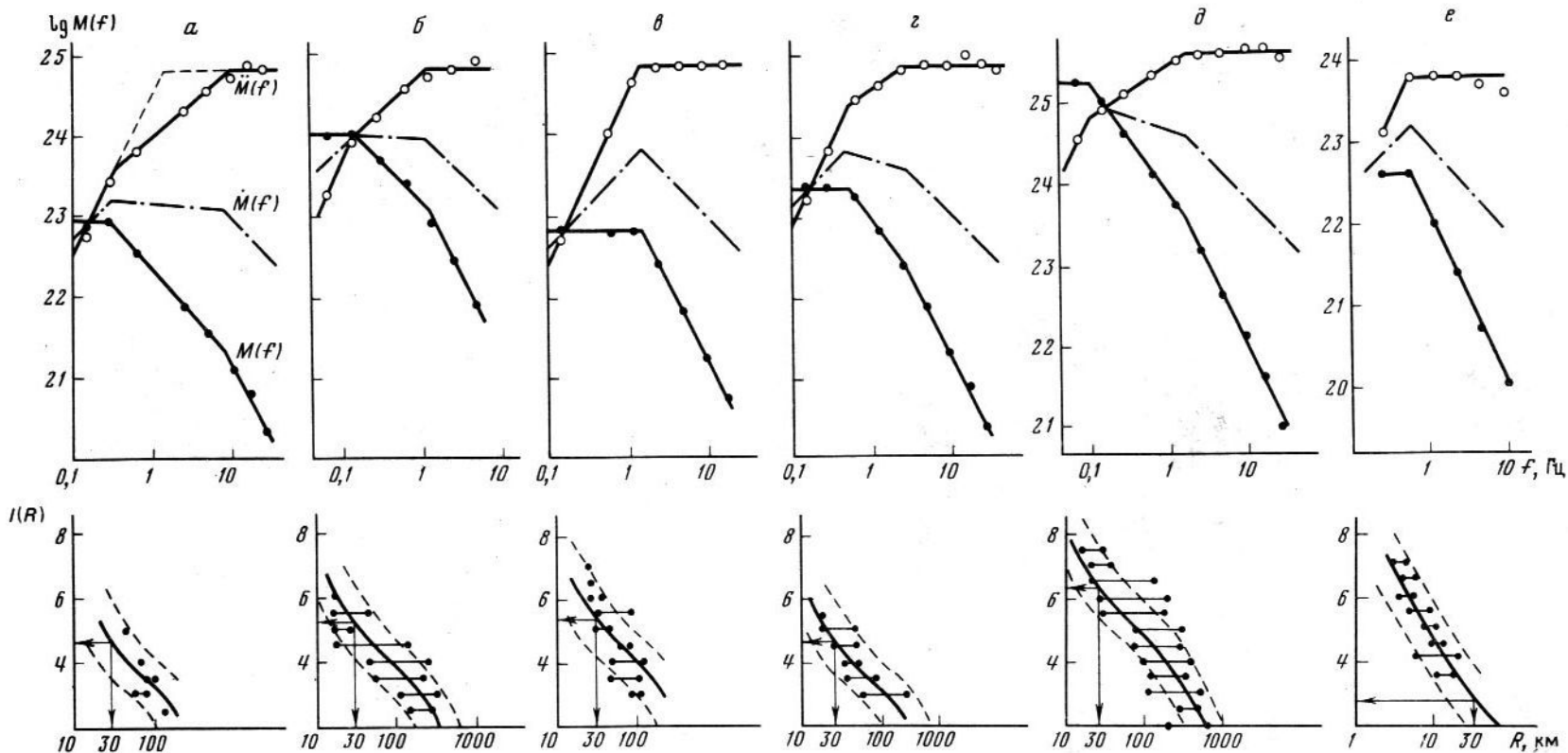


Рис. 2. То же для землетрясений Таджикистана
a – 23 мая 1972 г., 18–17, Ховалинг, глубина 40 км, $m^{СКМ} = 4,8$; *б* – 17 марта 1972 г., 09–17, $M = 5,0$, Ленинабад; *в* – 22 января 1974 г., 06–08, $m^{СКМ} = 4,8$, Ферганская долина; *г* – 31 июля 1975 г., 11–07, $M = 4,7$, Исфара; *д* – 31 января 1977 г., 14–26, $M = 6,3$, Исфара–Баткен; *е* – 17 июня 1976 г., 22–47, $M = 3,9$, глубина 3 км, Султанабад

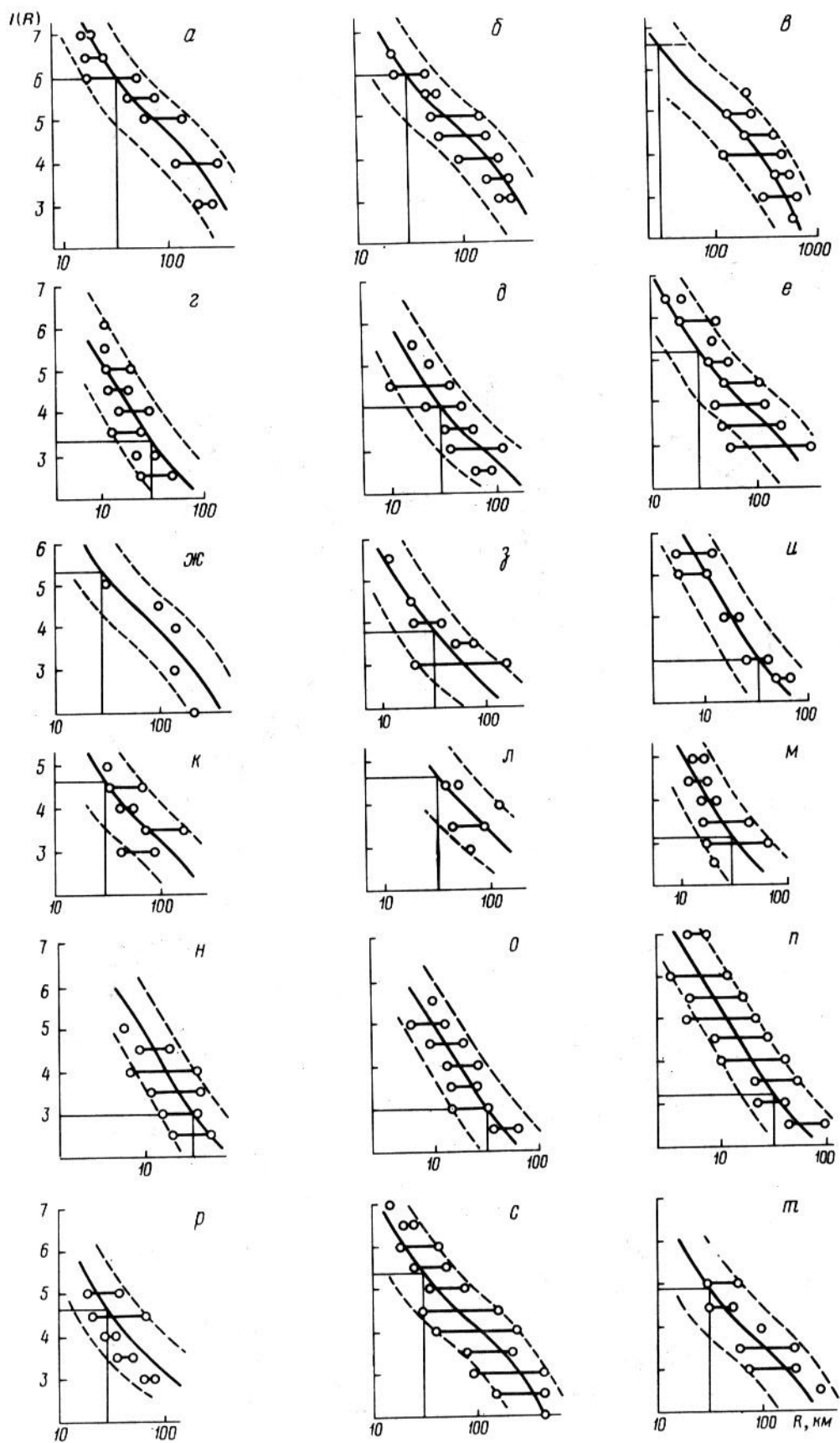


Таблица 1

Численные значения калибровочной функции

R , км	$\lg R$	$\alpha(R)$, балл	R , км	$\lg R$	$\alpha(R)$, балл
4	0,60	3,6	60	1,78	-0,9
7	0,85	2,5	100	2,00	-1,4
10	1,00	1,9	160	2,20	-1,9
16	1,20	0,9	250	2,40	-2,4
20	1,30	0,6	400	2,60	-3,4
30	1,48	0,0	600	2,78	-4,5
40	1,60	-0,4	1000	3,00	-5,8

Тогда горизонтальная стрелка укажет на оси ординат значение Y . На рис. 1–3 везде графики показаны на фоне такой палетки. Видно, что оценки Y получаются устойчиво, даже при малом числе данных (см., например, рис. 1, δ , e ; рис. 2, a ; рис. 3, $ж$, $з$, $к$, $л$). Действительная погрешность, конечно, зависит и от надежности исходных данных, от степени объективности оценки балльности, а также и от локальных вариаций затухания в разных частях района. В табл. 2 приводятся значения Y , а также магнитуды и другие параметры ряда землетрясений Средней Азии.

Корреляция макросейсмике с инструментальными параметрами очага. Сопоставим теперь оценки макросейсмической магнитуды с несколькими инструментальными характеристиками очага. Возьмем прежде всего традиционные характеристики: магнитуды M_{LH} и $m_{СКМ}$. Кроме того, используем параметры, получаемые из очаговых спектров. Смысл и методика получения очаговых спектров обсуждаются в работах [6–9]. Мы используем три варианта очаговых спектров: спектр смещения $M(f)$ дин · см, спектр скорости $\dot{M}(f)$ дин · см/с и спектр ускорения $\ddot{M}(f)$ дин · см/с². Максимум спектра смещения есть сейсмический момент M_0 , максимум спектра скорости M_1 и спектра ускорения — M_2 . На рис. 1, 2 сверху приведены очаговые спектры землетрясений, для которых внизу дается индивидуальный график $I(R)$. Кроме того, мы используем также параметр сейсмической энергии E , вычисленный из очагового спектра.

На рис. 4 приводятся графики корреляции всех этих шести параметров с макросейсмической магнитудой. Прямые аппроксимирующие линии соответствуют уравнениям ортогональной регрессии

$$Y = 1,15 M_{LH} - 0,9; \quad (3)$$

$$Y = 0,81 (\lg M_0 - 20) + 2,15; \quad (4)$$

$$Y = 1,83 m_{СКМ} - 4,58; \quad (5)$$

$$Y = \lg M_1 - 19,0; \quad (6)$$

$$Y = 2,20 (\lg M_2 - 25) + 5,0; \quad (7)$$

$$Y = 0,73 \lg E - 9,45. \quad (8)$$

Эти формулы не претендуют на окончательность: при их получении использовано сравнительно мало данных землетрясений. Но уже сейчас можно отметить несколько интересных моментов. Так, макросейсмический эффект согласно (3) возрастает слабее, чем это принято считать: в [1] коэффициент b при магнитуде предлагается равным 1,5. Ограниченность нашей выборки данных не позволяет быть полностью уверенными в этом результате, и в будущем его желательно уточнить. Отметим, однако же, что близкие значения коэффициента при магнитуде получались и в других работах: 1,15 в [10] для Кубы и 1,12 в [11] для Дальнего Востока. Коэффициент при сейсмической энергии оказался заметно меньше единицы. По-видимому, при

Рис. 3. Затухание сотрясений с расстоянием для землетрясений Средней Азии

a — Джамбульское 10 мая 1971 г., 14–51, $M = 5,7$; b — Байсунтауское 18 ноября 1971 г., 07–27, $M = 5,3$; e — Северный Афганистан (коровое) 24 июня 1972 г., 15–29, $M = 6,3$; z — Пянджское 19 февраля 1974 г., 21–30, $M = 3,5$; δ — Ошское 11 ноября 1975 г., 03–53, $m_{СКМ} = 4,9$; e — Ошское 20 февраля 1974 г., 11–43, $M = 4,9$; $ж$ — хр. Петра I 13 января 1971 г., 21–52, $M = 4,8$; $з$ — хр. Петра I 10 февраля 1971 г., 23–31, $M = 4,5$; u — Каратегинский хр. 1 октября 1971 г., 16–27, $M = 4,6$; $к$ — Ферганский хр. 17 февраля 1971 г., 10–27, $M = 4,5$; $л$ — Ферганский хр. 29 апреля 1971 г., 11–34, $M = 4,3$; $м$ — Пархарское 25 мая 1972 г., 21–22; $н$ — 14 февраля 1977 г., 21–12, Таджикская депрессия, $K = 11$; o — Таджикская депрессия 19 декабря 1977 г., 00–23, $m_{СКМ} = 4,8$; p — Таджикская депрессия 8 марта 1977 г., 15–48; p — Чирчикское 15 марта 1977 г., 14–07, $M = 3,9$; c — Чирчикское 6 декабря 1977 г., 05–15, $M = 4,9$; $т$ — Ура-Тюбинское 20 декабря 1977 г., 07–27, $m_{СКМ} = 4,9$

Таблица 2

Макросейсмические магнитуды Y и инструментальные характеристики очагов

Район	Дата	ч мин	Y	M_{LH}	m_{CK}	m_{CKM}	$\lg M_0$	$\lg M_1$	$\lg M_2$	$\lg E$	$\eta \sigma$
Газли	17.V 76	02-58	8,0	7,2	7,0	6,5	27,2	26,7	26,3	23,65	90
Газли	8.IV 76	02-40	7,5	7,0	7,0	6,6	26,5	26,25	26,05	22,9	80
Дараут Курган	1.IX 78	19-48	6,7	6,8	6,7	6,4	26,7	25,8	25,9	22,4	150
Жаланаш—Тюп	24.III 78	21-05	6,7	6,6	—	6,3	25,65	25,7	26,2	22,6	300
Маркансу	11.VIII 74	01-13	6,5	7,3	6,9	6,4	26,7	26,0	25,8	22,85	45
Маркансу	11.VIII 74	21-21	5,5	6,3	6,6	6,0	24,6	24,8	25,3	20,75	15
Исфара—Баткен	31.I 77	14-26	6,4	6,3	6,3	6,2	25,5	25,0	25,6	21,35	25
Газли	14.VII 77	05-49	5,8	5,4	6,1	5,8	24,4	24,6	25,8	21,75	700
Маркансу	11.VIII 74	20-05	6,5	5,8	6,2	5,8	24,2	24,8	25,4	20,8	130
Ленинабад	17.III 72	09-17	5,5	5,0	—	5,4	24,0	24,0	24,8	19,65	14
Западный Тянь-Шань	11.I 74	22-44	5,0	4,6	—	5,1	22,95	23,4	24,6	18,7	18
Западный Тянь-Шань	6.XII 77	05-15	5,5	4,9	—	5,3	23,8	24,2	25,2	20,15	70
Фергана	22.I 74	06-08	5,3	—	—	4,8	22,8	23,8	24,8	19,3	100
Ленинабад	20.XII 77	07-27	5,0	—	—	4,9	23,5	23,8	24,9	19,55	35
Хаит	2.VII 75	14-43	4,0	—	—	4,7	—	—	24,6	—	—
Нуратау	24.II 74	06-21	4,5	—	—	4,7	22,5	23,5	24,7	19,1	130
Исфара	31.VII 75	11-07	4,5	4,7	—	5,1	23,35	23,8	24,85	19,5	45
Ленинабад	16.I 76	10-44	4,5	5,0	—	5,1	—	23,35	24,4	18,65	5,5
Ховалинг	23.V 72	18-17	4,5	—	—	4,8	22,9	23,25	24,8	18,95	17
Хаит	10.VII 76	10-21	4,2	4,9	—	5,4	23,2	23,95	25,2	19,7	80
Западный Тянь-Шань	9.I 72	02-55	3,7	—	—	—	21,7	22,8	24,05	17,7	30
Оби-Гарм	8.XII 74	06-51	3,0	—	—	—	—	23,2	24,4	—	—

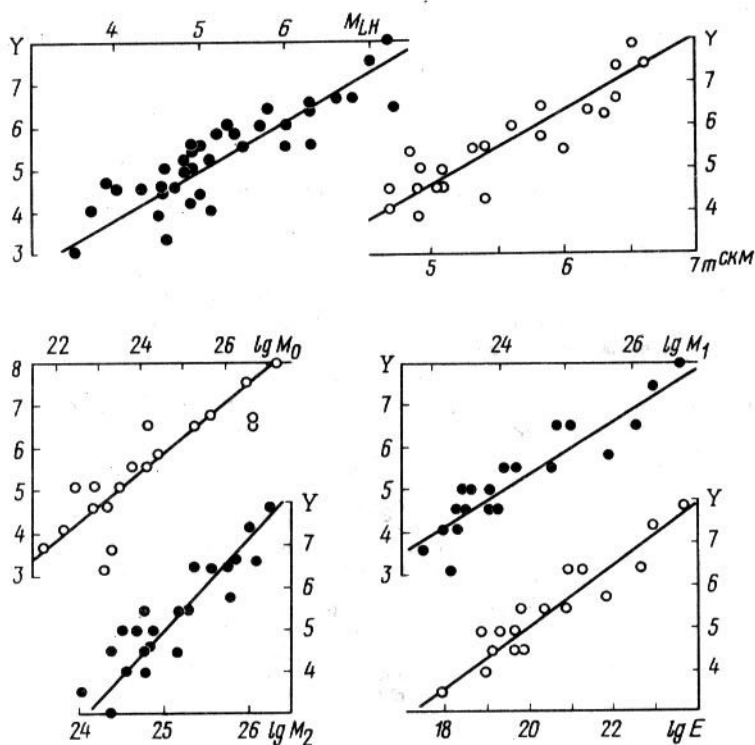


Рис. 4. Графики корреляции макросейсмической магнитуды Y со спектральными параметрами M_0 , M_1 , M_2 с энергией E , вычисленной по спектру и с магнитудами M_{LH} и m^{CKM} ; прямые линии соответствуют корреляционным уравнениям (3)–(8)

оценке добротности по макросейсмическим данным следует учитывать этот коэффициент.

Посмотрим теперь, каковы характеристики разброса данных относительно уравнений (3)–(8). Обычно в качестве меры тесноты связи рассматривают коэффициент корреляции ρ . В нашем случае он достаточно высок: от 0,87 до 0,93. Величина ρ зависит не только от абсолютных отклонений наблюдавшихся значений от корреляционной зависимости, но и от диапазона изменения сравниваемых величин. Но если смотреть на уравнения (3)–(8) как на способ оценить макросейсмический эффект землетрясения по заданным параметрам, то нас будут интересовать стандартные отклонения σ_Y балла. Значения их, а также значения ρ получились следующими (табл. 3).

Наибольшая теснота связи оказалась не для максимума спектра ускорений M_2 , а для сейсмической энергии и для максимума спектра скорости. Погрешность в оценке макросейсмического эффекта по этим заданным параметрам составляет менее 0,5 балла, тогда как для M_2 — почти 0,6, т.е. столько же, сколько и для магнитуд.

В ы ы ы. Из рассмотренных данных видно, что макросейсмическая интенсивность (балльность) затухает с расстоянием по более сложному закону, чем простая степенная функция, используемая обычно для описания макросейсмического поля. Форма эмпирического графика $I(R)$ согласуется с формой амплитудных кривых $A(R)$, получаемых по инструментальным наблюдениям. Она указывает на то, что при малых расстояниях (до 50–100 км) максимум интенсивности связан с волнами, распространяющимися в верхних горизонтах коры, где поглощение и рассеяние велико, а при больших расстояниях — с волнами, идущими в более глубоких, добротных слоях коры и, возможно, в литосфере ниже границы Мохо.

Используя среднюю кривую $I(R)$ для данного региона, можно оценить для каждого землетрясения макросейсмическую магнитуду Y , характеризующую макросейсмическое проявление землетрясения в целом, не зависящую от глубины очага. Сопоставление ее с различными очаговыми параметрами показало, что наиболее тесно связаны с Y величина сейсмической энергии и максимум очагового спектра скорости.

Полученные корреляционные соотношения Y со спектральными параметрами могут быть полезными при сейсмическом районировании. Как известно, сейсмо-

Таблица 3

Характеристики рассеяния σ_U и ρ

Используемый параметр	M_0	M_{LH}	m_{CKM}	M_2	M_1	E
σ_U балла	0,70	0,60	0,63	0,59	0,48	0,45
ρ	0,88	0,87	0,89	0,90	0,92	0,93

активные зоны различаются между собой по спектральным особенностям излучения: в одних зонах возникают более высокочастотные, в других более низкочастотные землетрясения, чем в среднем по региону. Следовательно, при одинаковых магнитудах землетрясения этих зон будут различаться по сейсмическому эффекту. Накопление данных об очаговых спектрах и изучение закономерностей их пространственного распределения будет способствовать уточнению прогноза макросейсмического эффекта (опорного балла) для землетрясения заданной магнитуды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кондорская Н.В., Шебалин Н.В.* Опорные землетрясения и уравнения макросейсмического поля. — В кн.: Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977, с. 20—31.
2. *Richter C.F.* An instrumental magnitude scale. — Bull. Seism. Soc. Am., 1935, vol. 25, N 1, p. 1—32.
3. *Раутиан Т.Г.* Энергия землетрясений. — В кн.: Методы детального изучения сейсмичности. М.: Изд-во АН СССР, 1960. (Тр. ГеоФИАН; № 9, с. 75—114).
4. *Джибладзе Э.А., Дарахвелидзе Л.К., Табуцадзе Ц.А.* Затухание сейсмических волн Кавказа. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, № 1, с. 93—95.
5. *Ergin K.* On the intensity-distance relations for earthquakes in Turkey. — В кн.: Тр. X Генеральной Ассамблеи ЕСК, Ленинград, 3—11 сент. 1968. М.: Сов. Геофиз. ком. АН СССР, 1970, т. II, с. 34—69.
6. *Rautian T.G., Khalturin V.I.* The use of the coda for determination of the earthquake source spectrum. — Bull. Seism. Soc. Am., 1978, vol. 68, N 4, p. 923—948.
7. *Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С.* Изучение условий в очаговых зонах по сейсмической коде. — В кн.: Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980, с. 224—256.
8. *Раутиан Т.Г., Халтурин В.И.* и др. Очаговые спектры землетрясений и их определение по ЧИСС-спектрам коды. — В кн.: Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981, с. 88—121.
9. *Раутиан Т.Г.* Спектры ускорений очагового излучения и их определение по сейсмической коде. — В кн.: Эффект сильных землетрясений: Вопр. инж. сейсмологии, вып. 22. М.: Наука, 1982.
10. *Альварес Л., Раутиан Т.Г., Чуй Т., Шебалин Н.В.* Особенности макросейсмического поля и оценка возможных макросейсмических эффектов на площадке. — В кн.: Вопросы сейсмичности малоактивных сейсмических зон (Центральная Куба). М.: ИФЗ АН СССР, 1982.
11. *Левый Н.В., Леонов Н.Н.* Соотношения между балльностью, магнитудой и площадью внутри изосейст. — В кн.: Сейсмическое райбнирование Курильских островов, Приморья и Приамурья. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1977, с. 51—54.