

Л. АЛЬВАРЕС, В. И. БУНЭ

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КУБЫ

Дана характеристика сейсмичности северной части Карибской островной дуги. Оценена вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 7$ на юго-восточном побережье о. Кубы.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее сейсмоопасным районом Кубы является ее восточная часть, расположенная вблизи северного крыла сейсмического пояса Карибской островной дуги. За четыре века здесь было несколько сильных землетрясений, а в Сантьяго-де-Куба (второй по величине город республики) повреждения оказались значительными [1]. На всей остальной территории острова известно только два сравнительно сильных землетрясения: 25 января 1880 г. к западу от Гаваны интенсивностью VII—VIII баллов [2] и 15 августа 1939 г. в центральной части острова, вблизи г. Кайбарьен, с магнитудой $M=5,3-5,9$ [3]. Этих данных и приведенных в [4] недостаточно для оценки сейсмической опасности всех районов Кубы, поэтому более детально анализируется материал, относящийся только к восточной части острова.

В работе приведены основные фактические данные (каталог сильных землетрясений, карта эпицентров и др.), сведения о зависимости между интенсивностью сотрясений и магнитудой землетрясений, характеристика сейсмического режима; сделана оценка вероятности землетрясений с $M \geq 7$ вблизи юго-восточного берега Кубы.

Изучению сейсмичности Кубы и всего Карибского бассейна посвящен ряд работ [1, 4–8]. Основные особенности геологического строения и тектоники этого региона описаны [9, 10].

СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРИБСКОЙ ДУГИ

В каталог (табл. 1) включены разрушительные землетрясения (интенсивностью VIII баллов и более), происходившие в XVI–XIX вв., и землетрясения с магнитудой $M \geq 7$, начиная с 1899 г.

Макросейсмические данные взяты из разных источников, они указаны в каталоге. Оценка максимальной интенсивности принята по данным литературы [1, 11–15, 17], а в некоторых случаях сделана авторами на основании макросейсмических описаний [14, 16, 18].

Данные о координатах гипоцентров взяты из каталогов Гутенберга — Рихтера [3] (1904–1952 гг.), Ротэ [19] (1953–1963 гг.), Дуда [20] (1899–1903 гг.) и МСЦ [21] (1964–1972 гг.). С помощью каталога [20] были пополнены сведения о сильных землетрясениях (1904–1917 гг.), отсутствующие в каталоге [3]. Значения магнитуд (M_{LN}) за 1899–1952 гг. взяты из [3, 20], за 1953–1967 гг. — из каталога Голубевой [22].

и за 1968–1974 гг. авторами принято среднее значение из определений M_{LN} на станциях MOS, PAS, BRK и др.

Следует отметить, что каталог исторических данных о землетрясениях не является полным прежде всего потому, что сведения о сильных землетрясениях в предшествующие века разные для разных участков Карибской дуги. Например, первые землетрясения, о которых имеются данные, произошли на о. Гаити в 1564 г., на о. Куба в 1578 г., на о. Пуэрто-Рико в 1824 г., на о. Ямайка в 1687 г. и на Малых Антильских островах в 1690 г. В то же время у нас нет никаких данных о землетрясениях на о. Каймана, хотя трудно допустить, что в этом районе до XX в. не было сильных землетрясений.

На рис. 1 показана карта эпицентров сильных землетрясений с $M \geq 6,0$ для всего срока инструментальных наблюдений.

Для восьмибалльного землетрясения 1907 г. на о. Ямайка (табл. 1, № 33) инструментальных определений координат нет. Магнитуду $M_s = 5,9$ удалось оценить по длительности записи на станции Гамбург. Станция была оборудована приборами Вихерта. Для оценки M_s использована формула, предложенная в [23]

$$M_s = (2,40 \pm 0,05) \lg t + (1,60 \pm 0,10), \quad (1)$$

где t — время от момента вступления волны P до уменьшения колебаний на уровне микросейсм.

Для 13 землетрясений 1910–1929 гг. по бюллетеням станций Оттава, Беркли, Гамбург, Гёттинген и др. определены значения M_s по формуле (1) и по поверхностным волнам (M_{LN}). Оказалось, что все полученные значения M_s меньше M в [3] на $0,6 \pm 0,7$. Для семи землетрясений M_s определены по данным двух и более станций. Эти значения оказались меньше соответствующих оценок M в [3] на $0,7 \pm 0,8$. Оценки M_{LN} этих же землетрясений также получились меньше, чем в [3], на $0,6 \pm 0,9$. Таким образом оценка для землетрясения 1907 может быть принята как $5,9 + (0,7 \pm 0,8)$.

ИНТЕНСИВНОСТЬ СОТЯСЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАГНИТУДЫ И ЭПИЦЕНТРАЛЬНОГО РАССТОЯНИЯ

Для изучения зависимости между интенсивностью и магнитудой использованы данные о землетрясениях всей дуги, потому что данных о сейсмичности только ее северной части недостаточно.

В табл. 2 приведены основные сведения о землетрясениях (время, координаты, магнитуда, глубина очага и район) и макросейсмические данные (максимальная интенсивность и радиус пятибалльной изосейсты).

В Карибском регионе макросейсмических данных мало, поэтому новых соотношений между интенсивностью и магнитудой не искали, а просто сопоставили имеющиеся данные (рис. 2) с радиусами изосейст по Шебалину [24] для глубин $h = 20, 80$ км и Федотову [25] для $h = 50$ км.

Радиусы изосейст по Шебалину [24] определяются по формуле

$$I_s = 1,5M - 3,5 \lg \sqrt{\Delta_s^2 + h^2} + 3,0, \quad (2)$$

а по Федотову [25]

$$I_s = 1,5M - 2,63 \lg \sqrt{\Delta_s^2 + h^2} - 0,0087 \sqrt{\Delta_s^2 + h^2} + 2,5. \quad (3)$$

Причинами большого разброса данных на рис. 2 могут быть трудности в определении I (например, в г. Порт-оф-Спейн на о. Тринидад систематически завышается интенсивность) и неточности в определении координат эпицентров и магнитуды землетрясений (например, координаты землетрясения № 5 в табл. 2 по данным [3] и [17] различны и только данные о координатах в [17] позволяют удовлетворительно интерпретировать макросейсмические данные).

Таблица 1

Каталог сильных землетрясений

№ п/п	Год	Месяц	Число	Момент возникновения			Координаты эпицентра		Глубина очага, км	М	Максимальная интенсивность, место и литература
				час	мин	сек	φ°N	λ°W			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1564	IV	20								IX о. Гаити [18]
2	1578	-	-								VIII Куба [1]
3	1673	-	-								VIII о. Гаити [18]
4	1678	II	11								VIII Куба [1]
5	1684	-	-								IX о. Гаити [18]
6	1687	II	17								IX Ямайка [16]
7	1690	IV	05								IX Малые Антильские о-ва [17]
8	1691	-	-								IX о. Гаити [18]
9	1692	VI	07								IX Ямайка [16]
10	1751	X	18								IX о. Гаити [18]
11	1751	XI	21								IX-X То же
12	1760	VII	17								VIII Куба [1]
13	1766	VI	17								IX То же
14	1770	VI	3								IX-X о. Гаити [18]
15	1771	VIII	3								VIII Ямайка [16]
16	1812	XI	11								IX Ямайка [16]
17	1824	IV	20								VIII Виргинские о-ва [17]
18	1826	IX	18								VIII Куба [1]
19	1833	II	08								VIII Малые Антильские о-ва [17]
20	1842	V	07								IX-X о. Гаити [18]
21	1843	II	08								IX Малые Антильские о-ва [17]
22	1847	VIII	15								VIII То же
23	1849	IV	19								VIII То же
24	1852	IV	08								IX Куба [1]
25	1860	IV	08								VIII о. Гаити [18]
26	1867	XI	18								VIII Виргинские о-ва [15]

Таблица 1 (окончание)

№ п/п	Год	Месяц	Число	Момент возникновения			Координаты эпицентра		Глубина очага, км	M	Максимальная интенсивность, место и литература
				час	мин	сек	φ°N	λ°W			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
27	1887	IX	23								IX о. Ганги [18]
28	1897	IV	29							(7,5) (6,5-7)	IX Малые Антильские о-ва [17]
29	1897	XII	29							(7,5)	VIII-IX о. Ганги [18]
30	1899	VI	14				18	77	n	7,8	
31	1900	VI	21	11	09	30	20	80	n	7,9	
32	1906	XII	03	22	59,4		15	61	100	7,5	V Гайана [17]
33	1907	I	14							5,9	VIII Ямайка [16]
34	1910	I	1	11	020		16,5	84	60	7,1	VIII о. Ганги [18]
35	1911	X	06	10	16,2		19	70,5		7,0	
36	1912	IV	09	08	32	29	19	85		7,3	
37	1914	X	03	17	22,2		16	61	100	7,4	V Малые Антильские о-ва [17]
38	1916	IV	24	04	26,7		18,5	68	80	7,0	V Пуэрто-Рико [17]
39	1917	II	20	19	29,8		19,5	78,5		7,4	
40	1917	VII	27	01	01,3		19	67,5	50	7,0	V о. Ганги [14]
41	1918	X	11	14	14		18,5	67,5		7,5	VIII Пуэрто-Рико [11]
42	1932	II	03	06	15		19,5	75,5		6,75	VIII Куба [1]
43	1941	IV	07	23	29		17,75	78,5		7,1	
44	1943	VII	29	03	01		19,25	67,4		7,75	VI-VII Пуэрто-Рико - о. Ганги [14]
45	1946	VIII	04	17	51		19,25	69		8,1	X о. Ганги [12]
46	1946	VIII	08	13	28		19,5	69,5	50	7,6	
47	1946	X	04	14	45		18,75	68,5	40	7	
48	1948	IV	21	20	22		19,25	69,25		7,3	V-VI о. Ганги [14]
49	1953	V	31	19	58		19,7	70,1	0	6,9	V-VI То же
50	1969	XII	25	21	32		15,8	59,6	1	7,2	VI Малые Антильские о-ва [14]
51	1974	X	08	09	50		17,2	62,0	27	7,3	VIII Малые Антильские о-ва [13]

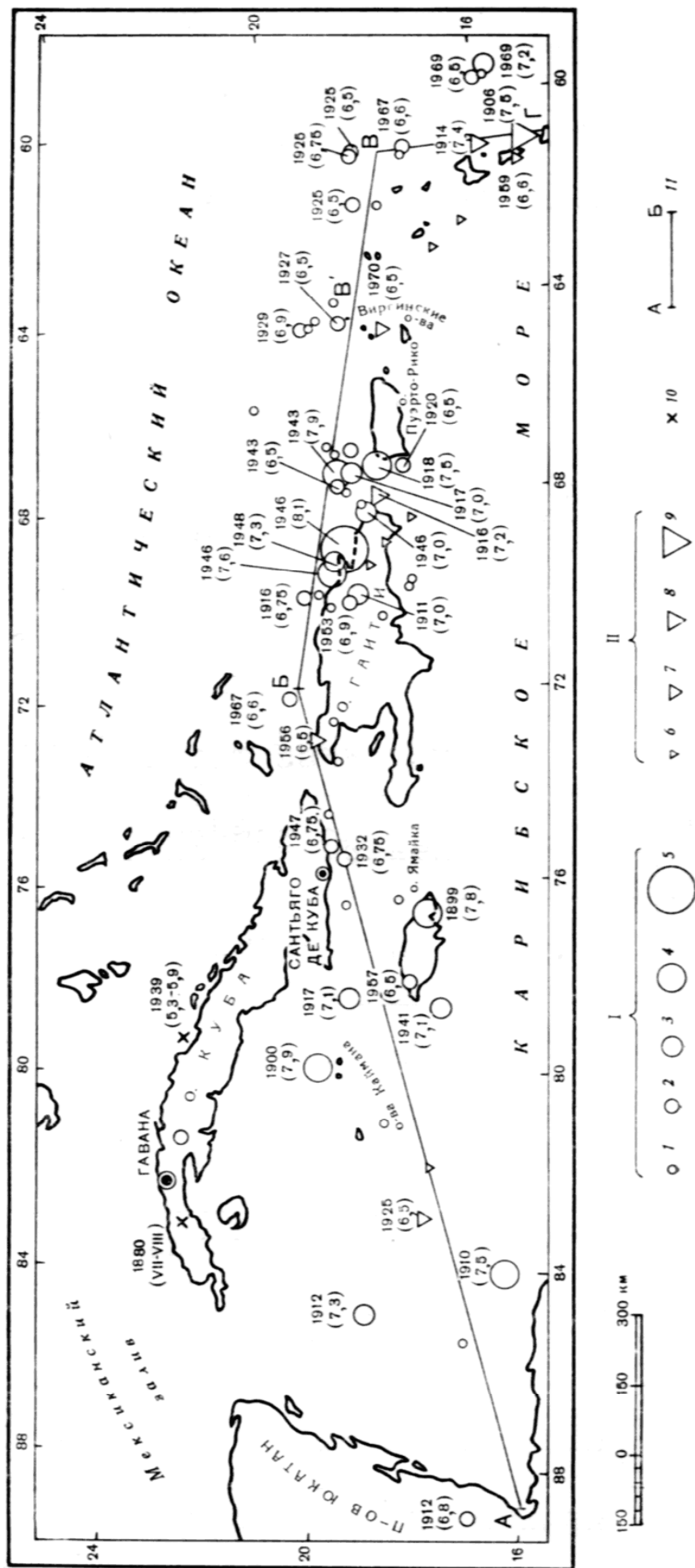


Рис. 1. Карта эпицентров сильных землетрясений северной части Карибского региона.

Для землетрясений с $M \geq 6.5$ и VII—VIII-балльных на Кубе указаны год и магнитуда или балльность. 1—5 — неглубокие землетрясения ($h \leq 70$ км); 1 — $6.5 \leq M < 7$; 2 — $6 < M < 6.5$; 3 — $7 \leq M < 7.5$; 4 — $7.5 \leq M < 8$; 5 — $M \geq 8$; 6—9 — глубокие землетрясения ($70 < h < 200$ км); 6 — $6 < M < 6.5$; 7 — $6.5 \leq M < 7$; 8 — $7 \leq M < 7.5$; 9 — $7.5 \leq M < 8$; 10 — сильные землетрясения на Кубе; 11 — по линии АВВГ построены пространственно-временные графики (рис. 5 и 6)

Таблица 2

Данные о сильных землетрясениях, использованные при оценке радиуса
V-балльной изосейсты от M (рис. 2)

№ п/п	Дата	$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ W$	M и литература	Глубина очага, км	I_{max}	r_s , км	Район
1	23.I 1910	12	60,5	7,1 [16]	100	V	150	Малые Антильские о-ва
2	3.X 1914	16	61	7,4 [16]	100	V	220	То же
3	24.II 1918	12	62	6,25 [16]		VIII	150	»
4	11.X 1918	18,5	67,5	7,5 [16]		VIII		Пуэрто-Рико
5	11.V 1922	11,8	60,5	6 [16]		V	250	Малые Антильские о-ва
6	8.VIII 1923	10,5	63,5	6,5 [16]	110	V	210	Венесуэла
7	1.II 1926	10,5	63,5	6,5 [16]	100	V	200	»
8	27.IX 1928	12	60	6,5 [16]		VII	220	Малые Антильские о-ва
9	3.II 1932	19,5	75,5	6,75 [16]		VIII	180	Куба
10	6.VII 1940	13	61,25	6,5 [16]	160	VI	110	Малые Антильские о-ва
11	4.VIII 1946	19,75	74,75	8,1 [16]		X	250	о. Гаити
12	7.VIII 1947	19,75	75,25	6,5 [16]	50	VII	120	Куба
13	4.XII 1954	10,9	61,4	6,3 [20]	50	VIII	240	Тринидад
14	4.X 1957	10,9	62,8	6,7 [20]	32	VIII	150	Венесуэла
15	30.VII 1967	10,68	67,40	6,4 [20]	26	VII	90	»
16	20.IX 1968	10,76	62,7	6,8 [*]	103	VIII	300	»
17	8.X 1974	17,2	60	7,3 [*]	27	VIII	200	Малые Антильские о-ва

[*] Средние определения по данным [14, 29, 30].

Как видно из рис. 2, совпадение фактических данных с радиусами изосейст по Федотову [25] удовлетворительно.

Следует подчеркнуть, что это совпадение касается не только радиуса пятибалльной изосейсты, вообще изосейсты Федотова [25] хорошо совпа-

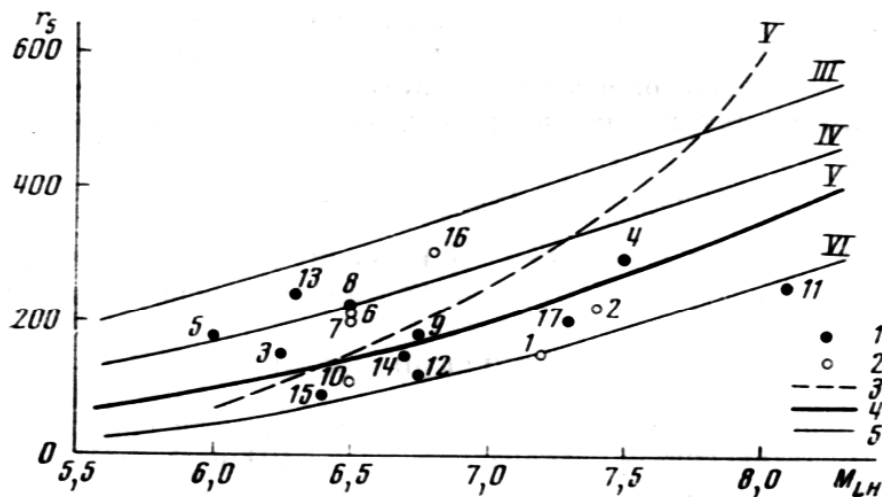


Рис. 2. Зависимость радиуса пятибалльных изосейст землетрясений Карибской дуги от M .

Экспериментальные данные: 1 — неглубокие землетрясения ($h \leq 70$ км); 2 — глубокие землетрясения ($h > 70$ км); номера относятся к табл. 2; 3 — зависимость r_s от M по Шебалину [24]; 4 — то же по Федотову [25]; 5 — зависимость r_s , r_4 и r_6 от M по [25]

дают с экспериментальными данными для Карибского региона. Эти изосейсты использовались в дальнейшем для оценки магнитуд землетрясений, о которых имеются только макросейсмические данные.

РАЗМЕРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Келлехер [8] считает, что размеры очагов и площади девятибалльной изосейсты примерно соответствуют друг другу, но для районов, где макросейсмических данных мало, как, например, в Карибском регионе, эта методика оценки размеров очагов неприменима.

Шебалиным [26] получено соотношение между максимальной протяженностью очагов и магнитудой землетрясения

$$\lg l_{x_{\max}} (\text{км}) \approx 0,55M - 2,0. \quad (4)$$

Однако в [27] им было получено другое соотношение

$$\lg l_x (\text{км}) \approx 0,7M - 2,8, \quad (5)$$

которое противоречит имеющимся данным по Карибскому региону, так как в пределы очага попадают точки с интенсивностью до V баллов и ниже. Первое соотношение Шебалина [26] совпадает с критерием Келлехера [8] с хорошим приближением (для Карибского региона). Эти совпадения были проверены на картах изосейст землетрясений: 11 X 1918, $M=7,5$ (11); 21 V 1946, $M=7,0$ (17); 4 VII 1946, $M=8,1$ (12) и 8 X 1974, $M=7,3$ [13].

На основании этого можно считать, что первое соотношение Шебалина [26] позволяет приблизительно оценить размеры очагов с известными магнитудами в Карибском регионе.

КОРРЕЛЯЦИЯ МАГНИТУД M_{LN} И m_{pv}

Для построения графика повторяемости землетрясений с $h \leq 70$ км все определения магнитуд надо отнести к одной системе — M_{LN} . Следуя рекомендации [28] о необходимости исследования региональных особенностей соотношений между M_{LN} и m_{pv} , было изучено корреляционное соотношение M_{LN} и m_{pv} для всей Карибской дуги.

Данные о магнитудах m_{pv} взяты из каталогов [21], а о магнитудах M_{LN} — из [7, 29–31]. Из работы [7] взяты только данные, соответствующие 1964 г., — времени начала работы МСЦ в Эдинбурге [21]. Для корреляции использованы определения магнитуд M_{LN} и m_{pv} для 64 землетрясений. По методу наименьших квадратов получено уравнение регрессии

$$M_{LN} = (1,51 \pm 0,1) m_{pv} - (2,79 \pm 0,05). \quad (6)$$

Эта оценка близка к оценке [28] и значительно отличается от оценки [32] (рис. 3). Причины этих расхождений хорошо известны [28].

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Для построения графиков повторяемости землетрясений использованы каталоги Гутенберга — Рихтера [3], Ротэ [19] и Дуда [20], где имеются определения магнитуд M для сильных землетрясений (1897–1965 гг.) и каталоги МСЦ [21], в которых определены магнитуды m_{pv} по короткопериодным приборам (1964–1972 г.).

Сейсмический режим изучен: а) для северной дуги в целом, б) к западу от 64° з. д., в) к западу от 72° з. д. Все районы расположены к северу от 15° с. ш.; их пределы взяты в соответствии с [33].

В табл. 3 показано распределение числа землетрясений с магнитудой $M \geq 6$ и $M = 5,3–5,9$ за 1897–1972 гг. за интервалы времени в 10–13 лет. В табл. 4 приведены данные о числе слабых землетрясений за последние девять лет (1964–1972 гг.).

Как видно из табл. 3 и 4, число глубоких землетрясений ($h > 70$ км) очень невелико, особенно для района к западу от 72° з. д., который нас

Таблица 3

Распределение числа N сильных землетрясений за интервалы времени 10–13 лет

Годы	М											
	5,3—5,9		6		6,5		7		7,5		8	
	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.
а. Вся северная часть Карибской дуги (рис. 1)												
1897—1909	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	2	—
1910—1919	—	—	2	—	2	—	4	1	2	1	—	—
1920—1929	3	—	2	—	5	1	—	—	1	—	—	—
1930—1939	19	—	3	1	1	—	—	—	—	—	—	—
1940—1949	15	—	2	—	2	—	2	—	3	—	1	—
1950—1959	4	3	4	1	1	2	1	1	—	—	—	—
1960—1972	5	2	7	3	6	1	1	—	—	—	—	—
ΣN	43	5	16	5	15	4	8	2	6	2	3	—
Срок пред- ставит., год	43		43		53		63		76		76	
б. Часть Карибской дуги к западу от 64° з. д.												
1897—1909	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—
1910—1919	—	—	2	—	2	—	4	1	2	—	—	—
1920—1929	3	—	2	—	2	1	—	—	1	—	—	—
1930—1939	17	—	3	—	1	—	—	—	—	—	—	—
1940—1949	13	—	2	—	2	—	2	—	3	—	1	—
1950—1959	4	1	4	1	1	1	1	1	—	—	—	—
1960—1972	1	2	1	1	2	—	—	—	—	—	—	—
ΣN	35	3	10	2	8	2	7	2	6	—	3	—
Срок пред- ставит., год	43		43		53		63		76		76	
в. Часть Карибской дуги к западу от 72° з. д.												
1897—1909	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1910—1919	—	—	1	—	—	—	2	—	1	—	—	—
1920—1929	1	—	1	—	—	1	—	—	—	—	—	—
1930—1939	13	—	1	—	1	—	—	—	—	—	—	—
1940—1949	9	—	1	—	1	—	1	—	—	—	—	—
1950—1959	1	—	1	—	1	1	—	1	—	—	—	—
1960—1972	4	—	1	—	1	—	—	1	—	—	—	—
ΣN	27	—	4	—	4	2	3	2	1	—	2	—
Срок пред- ставит., год	43		43		53		63		76		76	

Примечание. Горизонтальными линиями в пределах граф $M=5,3-5,9$; 6; 6,5; 7 отделены представительные данные от непредставительных.

больше всего интересует (два землетрясения с $M=7$ и два с $M=6,5$, нет толчков с $M=6$; 5,5; 5,0 и только пять с $M=4,5$). По этим данным нельзя строить график повторяемости.

Сроки представительности данных о землетрясениях с $h \leq 70$ км для разных магнитуд различны. Для слабых землетрясений ($m_{pe}=4,5-5,5$) представительные данные имеются только за девять лет (1964–1972), для землетрясений с магнитудой $M=6$ — за 43 года (1930–1972) и для землетрясений с $M=7,5-8$ — за 76 лет (1897–1972).

Таблица 4

Распределение чисел землетрясений за 1964–1972 гг.

Год	m_{pv}									
	4,5		5		5,5		6		6,5	
	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.

а. Вся северная часть Карибской дуги

1964	14	3	5	3	3	2	—	—	—	—
1965	13	5	12	4	4	—	1	—	—	—
1966	55	17	54	8	13	1	—	—	—	—
1967	62	7	31	4	9	1	3	—	—	—
1968	10	6	3	—	—	1	—	—	—	—
1969	49	6	28	—	9	—	1	—	1	—
1970	33	4	11	—	1	—	—	1	—	—
1971	12	6	6	1	1	—	—	—	—	—
1972	16	—	2	—	—	—	—	—	—	—
ΣN	264	54	152	20	40	5	5	1	1	—

Год	m_{pv}						Год	m_{pv}					
	4,5		5		5,5			4,5		5		5,5	
	негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.		негл.	глуб.	негл.	глуб.	негл.	глуб.

б. Часть Карибской дуги к западу от 64° з. д.

1964	11	2	4	3	2	2
1965	5	4	3	3	2	—
1966	8	5	21	4	4	—
1967	20	5	9	3	4	1
1968	8	4	2	—	—	1
1969	9	3	4	—	—	—
1970	10	2	2	—	—	—
1971	11	4	5	1	1	—
1972	9	2	2	—	—	—
ΣN	91	31	52	14	13	4

в. Часть Карибской дуги к западу от 72° з. д.

1964	4	—	—	—	—	—
1965	—	—	—	—	—	—
1966	1	—	—	—	1	—
1967	3	1	—1	—	1	—
1968	4	1	—1	—	—	—
1969	—	1	—1	—	—	—
1970	1	1	—1	—	—	—
1971	2	1	1	—	—	—
1972	3	1	1	—	—	—
ΣN	18	6	6	—	2	—

При построении графиков повторяемости учитывались следующие обстоятельства.

а) в каталогах Гутенберга — Рихтера [3] и Ротэ [19] имеются землетрясения, отнесенные к интервалу d ($5,3 \leq M \leq 5,9$). Вероятно, можно допустить, что 2/7 общего числа землетрясений этого интервала попадают в интервал $M=6$ ($5,8 \leq M \leq 6,2$). При построении графика повторяемости эти землетрясения были добавлены к числу землетрясений в интервале $M=6$,

б) при объединении землетрясений в группы с шагом в 0,5 магнитуды следует учитывать корреляционное соотношение между m_{pv} и M_{LH} (6). С учетом этого уравнения число землетрясений в группе с шагом в 0,5 m_{pv} следует умножить на 5/8, чтобы получить соответствующее число землетрясений в группе с шагом 0,5 M_{LH} . Кроме того, соответственно сдвигаются центры групп.

Разброс точек на графиках повторяемости (рис. 4) довольно велик, особенно для района к западу от 72° з. д. Причиной этого разброса могут быть либо пропуски землетрясений, либо ошибки определения магнитуд. В дальнейшем следует вернуться еще раз к этому вопросу, так как он очень важен для оценки сейсмической опасности восточной части Кубы.

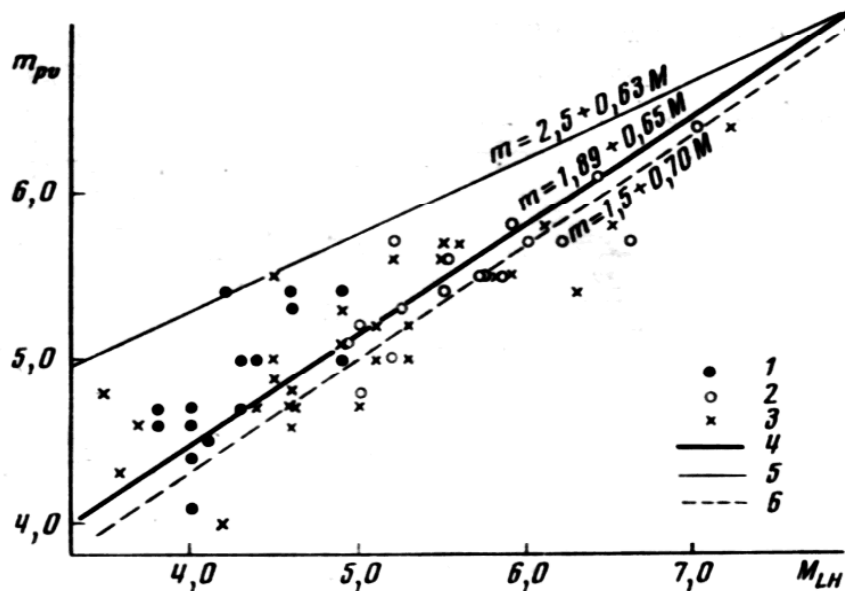


Рис. 3. Корреляция M_{LH} и m_{pr}^{sc} для землетрясений Карибской дуги ($h < 70$ км).

Значения m_{pr} по [21]: 1 — M_{LH} по [7] для 1964 г.; 2 — M_{LH} по [29, 30]; 3 — по NEIS [31]; 4 — полученная линия регрессии; 5 — то же по [32]; 6 — то же по [28]

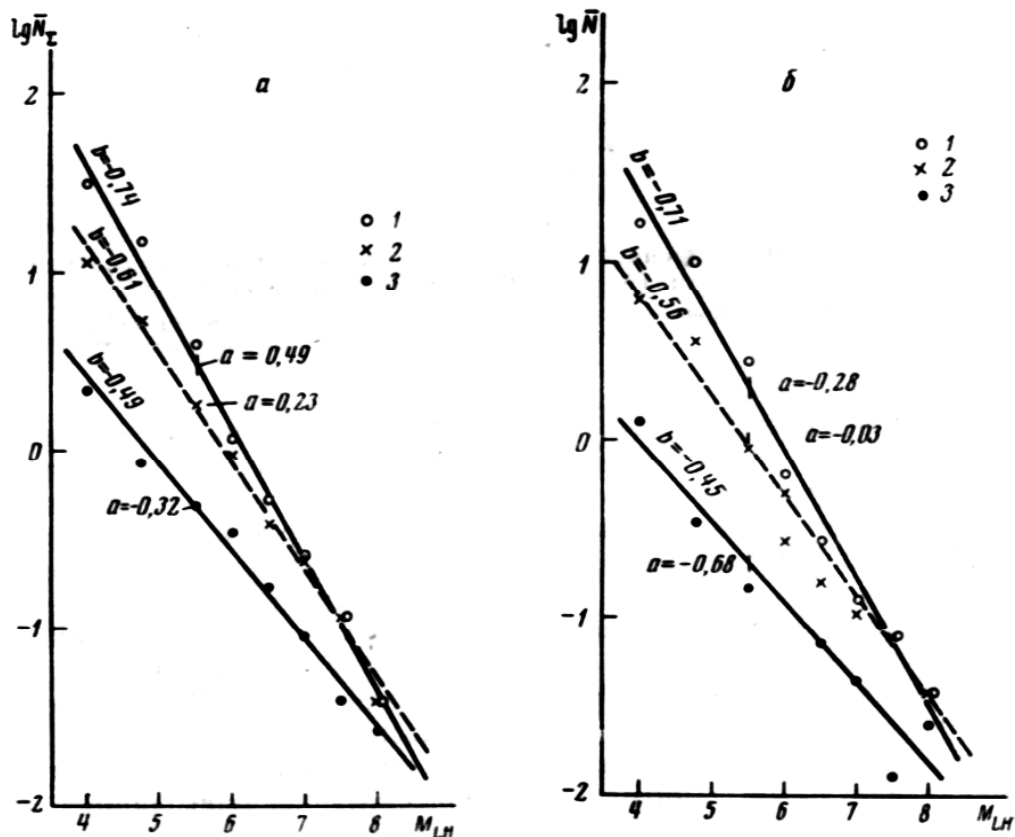


Рис. 4. Графики повторяемости неглубоких землетрясений различных участков Карибской дуги

а — накопление повторяемости, б — числа землетрясений в год, распределенные по интервалам $\Delta M = 0.5$; 1 — вся северная дуга; 2 — к западу от 64° з. д.; 3 — к западу от 72° з. д.

Из рис. 4 хорошо видно, что относительное число слабых землетрясений в западной части (к западу от 72°) существенно меньше, чем в ее восточной части, и этим объясняется уменьшение параметра b : для всей северной дуги -0.71 ; к западу от 64° з. д. -0.56 ; к западу от 72° -0.45 .

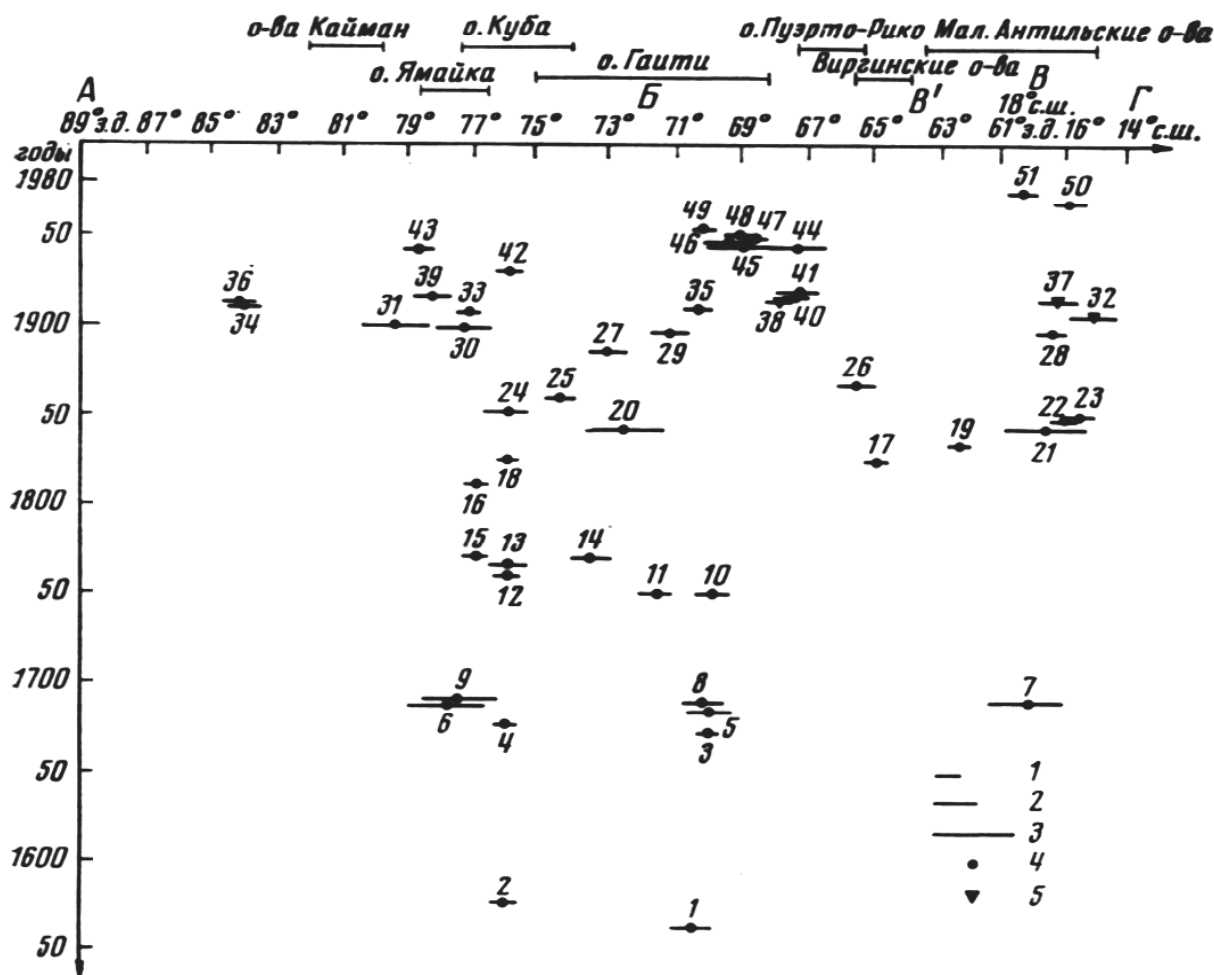


Рис. 5. Пространственно-временной график сильных землетрясений северной части Карибской дуги (А-Б-В-Г на рис. 1) за XVI-XX вв.

Протяженность очагов по Шебалину [26]. Номера соответствуют данным табл. 1. 1 — $M=7$; 2 — $M=7,5$; 3 — $M=8$; 4 — неглубокие землетрясения; 5 — глубокие землетрясения

Можно предположить, что это уменьшение объясняется систематическими пропусками слабых толчков. В связи с этим были рассмотрены сейсмические станции, использованные для определения координат землетрясений в этом районе. Оказалось, что землетрясения с магнитудой $m_{pe}=4,3$ хорошо записаны на станциях, расположенных на территории США, на расстояниях приблизительно до 25° , поэтому трудно допустить, что имеют место пропуски землетрясений с $m_{pe}=5,5$. Между тем в [21] имеется большое количество землетрясений с магнитудой $m_{pe}=5,5$ и выше, записанных только сетью станций университета Вест-Индии (Тринидад), расположенных на Малых Антильских островах. В тех случаях когда эти же землетрясения были зарегистрированы на других станциях, оценка магнитуды по данным Тринидада оказалась завышенной относительно средней оценки по многим станциям в [21].

Вопрос о расхождениях в оценках магнитуд требует специального исследования. Чтобы избавиться от влияния возможных ошибок в определении m_{pe} по данным сети станций Тринидада, район к востоку от 64° з. д. был исключен из последующего анализа.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ГРАФИКИ

При построении пространственно-временного графика (рис. 5) по данным табл. 1 учитывались размеры очагов землетрясений. Для исторических сильных землетрясений оценки магнитуды сделаны на основа-

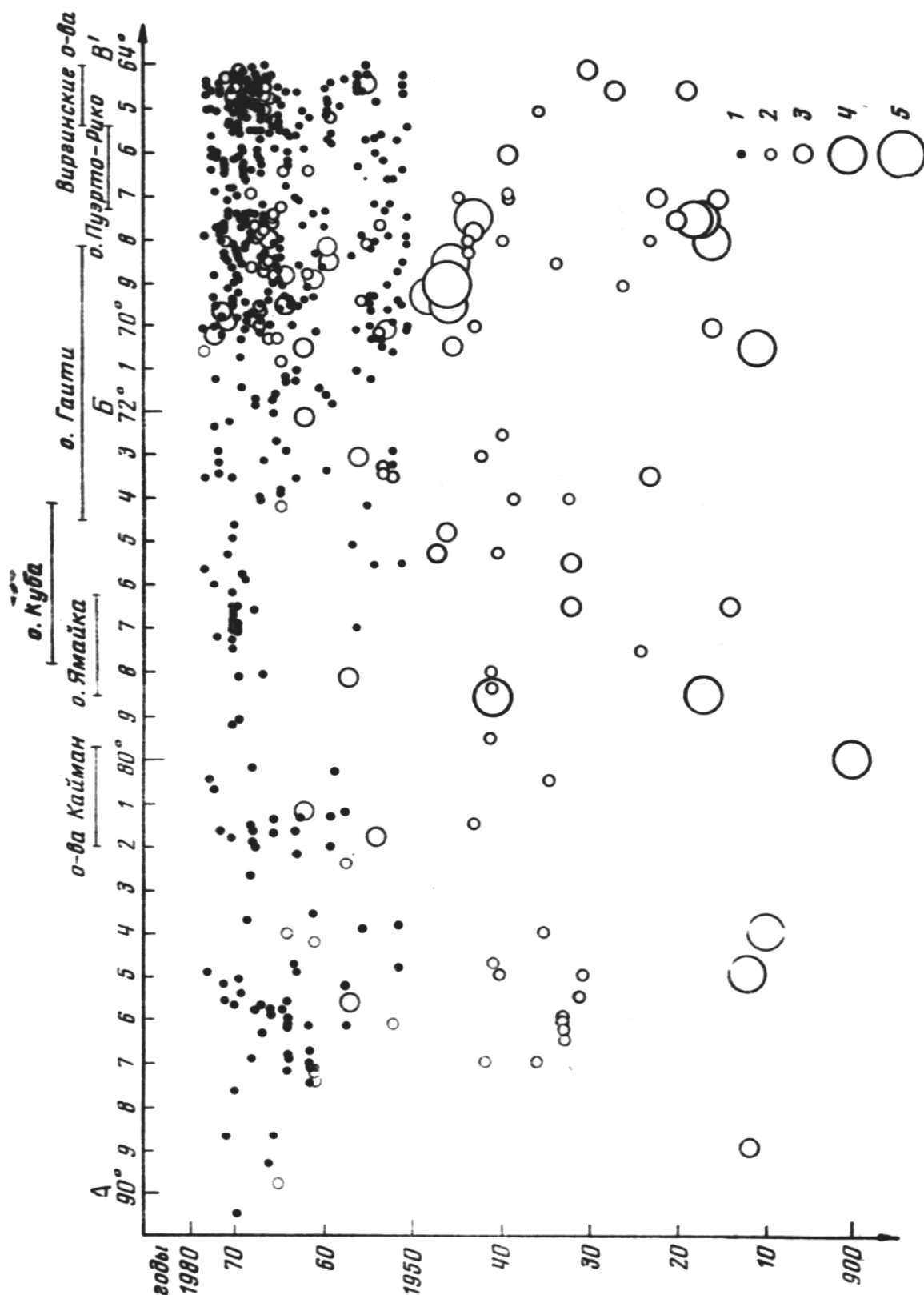


Рис. 6. Пространственно-временной график землетрясений участка региона к западу от 64° з.д. (участок А-Б-В на рис. 1) за XX в., составлен по данным [3, 7, 19-21].

1-5 — неглубокие землетрясения: 1 — $M < 5$; 2 — $5 \leq M < 6$; 3 — $6 \leq M < 7$; 4 — $7 \leq M < 8$; 5 — $M \geq 8$

нии зависимости радиусов изосейст от I по формуле (3) из [25]. Для оценки размеров очагов в зависимости от M использовано соотношение (4) из [26]. На графике видно, что существует тенденция миграции очагов сильных землетрясений с запада на восток. Трудно судить о деталях этого процесса особенно из-за отсутствия исторических данных к западу от Ямайки и на о. Пуэрто-Рико (до 1824 г.). На рис. 5 заметно стремление сильных землетрясений к группированию. Явные группы могут быть выделены в 1946–1948 гг. в районе Ганти — Пуэрто-Рико, в начале XX в. в районе Ямайки (рис. 5) и т. п.

На рис. 6 показан пространственно-временной график землетрясений для района к западу от 64° з. д. за XX в. без разделения очагов по глубине. Видно, что район между 64° з. д. и 72° з. д. более активен, чем район к западу от 72° з. д., а сейсмичность всего района примерно одинакова с 72° з. д. до 90° з. д. Поэтому, оценивая вероятность возникновения землетрясений с магнитудой 7 и выше для района 72° – 90° з. д., в целом можно оценить и вероятность сильного землетрясения на юге о. Кубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из приведенных данных о сейсмичности северной части Карибской островной дуги ясно, что возможно возникновение землетрясения с магнитудой $M \geq 7$ (и даже $M \geq 8$) на участке сейсмического пояса, расположенного в районе Кубы.

К западу от 72 до 90° з. д. землетрясения с магнитудой $M \geq 7$ могут возникать в среднем один раз за 11 лет (рис. 4). Сейсмичность этого района примерно одинакова (рис. 6), поэтому можно предполагать, что на $1/4$ – $1/5$ этого участка, расположенного непосредственно к югу от восточной части Кубы, землетрясения с $M \geq 7$ возможны один раз за 40–50 лет.

Обычно землетрясения с эпицентрами в пределах желоба Каймана между Кубой и Ямайкой вызывают сотрясения в VI баллов и более только на одном из островов — либо на Ямайке, либо на Кубе. Это объясняется тем, что очаги землетрясений располагаются на северном или южном разрывах, ограничивающих желоб Каймана. Поэтому вероятность возникновения землетрясений с магнитудой $M \geq 7$ на юге Кубы примерно в два раза меньше, т. е. один раз за 80–100 лет.

Землетрясения с интенсивностью VIII баллов в городе Сантьяго-де-Куба могут вызывать толчки с $M = 6\frac{3}{4}$, как это было 3 февраля 1932 г., поэтому в этом городе возможны восьмibalльные сотрясения один раз за 60–70 лет. Эти цифры соответствуют историческим данным: за 400 лет — семь землетрясений с интенсивностью VIII баллов и более (см. табл. 1).

Следует подчеркнуть, что этот вопрос требует дополнительных исследований, в частности необходимо улучшение точности определения координат очагов землетрясений и их механизма, чтобы более четко выявить пространственное расположение сейсмоактивной зоны на участке между о-вами Куба и Ямайка.

Подробный анализ приведенных выше материалов, вероятно, позволит построить первую карту сейсмического районирования восточной части о. Куба. Сейсмическое районирование всей остальной части острова трудно осуществить без проведения специальных наблюдений с помощью высокочувствительной сейсмической аппаратуры, которые позволили бы установить определенные связи сейсмичных зон с особенностями геологического строения и историей движения отдельных блоков земной коры.

Академия наук СССР
Институт физики Земли
им. О. Ю. Шмидта
Академия наук Кубы
Институт геофизики и астрономии

Поступила
25 IX 1976

Литература

1. Альварес У., Штейнберг В. В., Бланко Т. Т., Медведев С. В., Менендес Л. Сейсмические условия Сантьяго де Куба. Изв. АН СССР. Физика Земли, № 5, 1973.
2. Freeman J. R. Earthquake damage and earthquake insurance. McGraw Hill, New York — London, 1932.
3. Gutenberg B., Richter C. F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton University Press, 1954.
4. Альварес У., Менендес Л. Сейсмичность Кубы. Изв. АН СССР, Физика Земли, № 1, 1969.
5. Alvarez H. Some aspects of the earthquake occurrence to the southeast of Cuba. Phys. Earth and Planet. Inter., 9, No. 3, 1974.
6. Molnar P., Sykes L. R. Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanism and Seismicity. Bull. Geol. Soc. Amer., 80, No. 9, 1969.
7. Sykes L. R., Ewing M. The Seismicity of the Caribbean Region. J. Geophys. Res., 70, No. 20, 1965.
8. Kelleher J., Sykes L., Oliver L. Possible criteria for predicting earthquake locations and their application to major plate boundaries of the Pacific and the Caribbean. J. Geophys. Res., 78, No. 14, 1973.
9. Judoley C. M., Furrázola-Bermúdez G. Geología del área del Caribe y de la costa del Golfo de Mejico. Instituto Cubano del Libro, La Habana, 1971.
10. Хаин В. Е. Проблемы тектоники Мексикано-Карибского региона. Сб. «Тектоника, сейсмичность и геодинамика Юго-Восточного обрамления Тихого океана», «Советское радио», М., 1975.
11. Fielding H., Taber S. The Porto Rico earthquakes of october — november, 1918. Bull. Seismol. Soc. Amer., 9, No. 4, 1919.
12. Lynch J. J., Boole R. R. The Dominican earthquakes of August, 1946, Bull. Seismol. Soc. Amer., 38, No. 1, 1948.
13. Tomblin J. F., Aspinall W. P. Reconnaissance report of the Antigua, West Indies earthquake of October 8, 1974. Bull. Seismol. Soc. Amer., 65, No. 6, 1975.
14. Seismological Notes (1911–1972). Bull. Seismol. Soc. Amer., 1–63, 1911–1973.
15. Coffman J. L., von Hake C. A. (ed.) Earthquake history of the United States. U. S. Depart. of Commerec, NOAA, Boulder, Colorado, 1973.
16. Taber S. Jamaica Earthquakes on the Bartlett trough. Bull. Seismol. Soc. Amer., 10, No. 2, 1920.
17. Robson G. R. An earthquake catalogue for the Eastern Caribbean. Bull. Seismol. Soc. Amer., 54, No. 2, 1964.
18. Scherer J. Great earthquakes in the Island of Haiti. Bull. Seismol. Soc. Amer., 2, No. 1, 1912.
19. Rothe J. P. The Seismocity of the Earth 1953–1965. UNESCO, Belgium (Paris) 1969.
20. Duda S. J. Secular Seismic energy release in the Circum-Pacific Belt. Tectonophysics, 2, No. 5, 1965.
21. Regional Catalogue of Earthquakes (Years 1964–1972) International Seismological Centre, Edinburg, Scotland, 1969–1975.
22. Голубева Н. В. Каталог сильных землетрясений земного шара с 1953 по 1967 годы с $M \geq 6$. ВИНТИ, М., 1972.
23. Маламуд А. С. Использование длительности колебаний для энергетической классификации землетрясений. В кн.: «Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений». М., АН СССР, 1974.
24. Шебалин Н. В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. В кн.: «Сейсмическое районирование СССР», М., 1968.
25. Федотов С. А., Шумилина Л. С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки. Изв. АН СССР. Физика Земли, № 9, 1971.
26. Шебалин Н. В. Оценка размеров и положение очага Ташкентского землетрясения по макросейсмическим и инструментальным данным. Сб.: «Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года», ФАН, Ташкент, 1971.
27. Шебалин Н. В. Замечания о преобладающих периодах, спектре и очаге сильного землетрясения. Сб.: «Сейсмические исследования для строительства». М., «Наука», 1971.
28. Bune V. I., Golubeva N. V. Correlation of magnitudes M_{LH}^{USSR} and m_{pv}^{ISC} for earthquakes of Kamchatka, Kuril Isls and Japan. Pure and Appl. Geophys., 103, 1973/11.
29. Землетрясения в СССР 1962–1971. М., «Наука», 1964–1975.
30. Сейсмологический бюллетень сети опорных сейсмических станций СССР 1962–1970. АН СССР, М., 1962–1972.
31. Preliminary Determination of epicenters, Monthly Listing 1968–1972. U. S. Depart. of Interior, National Earthquake Information Service.
32. Пузгер Ч. Ф. Элементарная сейсмология. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
33. Flin E. A., Engdahl E. R., Hill A. R. Seismic and geographycal regionalization. Bull. Seismol. Soc. Amer., 64, No. 3, part 2, 1974.