

УДК 550.343.4

Л. АЛЬВАРЕС, В. И. БУНЭ

СЕЙСМИЧЕСКАЯ СОТРЯСАЕМОСТЬ ВОСТОЧНОЙ КУБЫ

Описана методика расчетов сейсмической сотрясаемости, в основе которой лежит представление о постоянстве сейсмического режима в пределах каждой зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), выделенной по комплексу геолого-геофизических данных. Предложена программа для расчетов на ЭВМ сейсмической сотрясаемости, по которой проведены расчеты сейсмической сотрясаемости Восточной Кубы. Расчетные и наблюдаемые данные по г. Сантьяго-де-Куба для землетрясений с интенсивностью 7, 8 и 9 баллов находятся в хорошем соответствии.

В юго-восточной части о-ва Куба расположен город Сантьяго-де-Куба, который за последние 500 лет 19 раз испытал сотрясения интенсивностью 7—9 баллов [1]. Средние периоды повторения землетрясений с $M \geq 7$ в этом районе оцениваются в 80—100 лет [2]. В настоящей работе представлены результаты расчетов сейсмической сотрясаемости Восточной Кубы.

Методика расчетов сейсмической сотрясаемости. В основе расчетов сейсмической сотрясаемости лежит известная формула [3—5]

$$B_I = \iiint_V N_z(M_I) dx dy dz. \quad (1)$$

Здесь B_I — сотрясаемость, т. е. средняя частота повторения в данном пункте сотрясений интенсивностью $\geq I$, $N_z(M_I)$ — отнесенное к единице времени и объема суммарное число очагов землетрясений в объеме $dx dy dz$, которые в данном пункте (точке на карте) вызовут сотрясения с интенсивностью I и выше.

Интеграл в формуле (1) может быть заменен суммированием и в большинстве случаев третья координата (глубина) может считаться параметром. Таким образом, из формулы (1) получим суммирование по площадкам ΔS_j :

$$B_I = \sum_j N_z(M_I)_j \Delta S_j. \quad (2)$$

Для расчета сотрясаемости обычно используются карты A_{10} , $K_{\max}$, а формула (2) преобразуется в формулу, зависящую от $K_{\max}$, A_{10} , γ и параметров уравнения макросейсмического поля [3—5]. Для построения долговременной карты A_{10} ($A_{M=3,5}$) в районе Восточной Кубы нет необходимых данных, поэтому была использована несколько иная методика. Вначале выделяются зоны наиболее вероятного возникновения очагов землетрясений — зоны ВОЗ. Предполагается, что в пределах каждой зоны ВОЗ параметры графиков повторяемости землетрясений $M_{\max}$, a , b и параметры моделей изосейст постоянны. Вероятность возникновения очагов землетрясений в любой точке зоны ВОЗ одинакова и постепенно очаги землетрясений заполняют весь объем зоны. В этом случае карта сейсми-

ческой активности (A_{10}) совпадает с картой зон ВОЗ и значения параметров графиков повторяемости в каждой точке зоны одинаковы. Зоны ВОЗ могут выделяться различными методами с использованием сейсмологических, геологических и геофизических материалов [5].

Графики повторяемости землетрясений. Закон повторяемости землетрясений выбираем в виде

$$N_*(M) = 10^{a-b(M-M_0)}, \quad M_{\min} \leq M \leq M_{\max}, \quad (3)$$

$$N_*(M) = 0, \quad M > M_{\max},$$

где $N_*(M)dM$ — количество землетрясений в интервале от M до $M+dM$ в пространстве V , нормированное во времени (год).

График распределенной повторяемости землетрясений строится по количеству землетрясений внутри интервалов $(M_i - \Delta M_i/2, M_i + \Delta M_i/2)$

$$N_i(M_i) = \int_{M_i - \Delta M_i/2}^{M_i + \Delta M_i/2} N_*(M) dM = 10^{a-b(M_i-M_0)} F(b; \Delta M_i), \quad (4)$$

где

$$F(b; \Delta M_i) = [10^{b\Delta M_i/2} - 10^{-b\Delta M_i/2}] b \ln 10. \quad (5)$$

Сейсмическая активность для $M=5$ и площади S_0 может быть рассчитана как

$$A^* = N(M=5) |_{\Delta M=0,5; S_0} = 10^{a-b(5-M_0)} F(b; 0,5) S_0/S, \quad (6)$$

где S — площадь зоны ВОЗ, для которой рассчитаны параметры a и b .

Функцию $F(b; \Delta M_i)$ можно в первом приближении заменить на ΔM_i . Тогда на графике распределенной повторяемости наносятся точки $[N_i(M_i)/\Delta M_i, M_i]$.

График накопленной повторяемости строится для суммарного числа землетрясений от $M_i - \Delta M_i/2$ (первый интервал) до максимальной магнитуды

$$\begin{aligned} N_{\Sigma_i}(M_i) &= \sum_{k \geq i} N_k(M_k) = \sum_{k \geq i} \int_{M_k - \Delta M_k/2}^{M_k + \Delta M_k/2} N_*(M) dM = \int_{M_i - \Delta M_i/2}^{M_{\max} + \Delta M_{\max}} N_*(M) dM = \\ &= 10^{a-b(M_i-M_0)} \frac{10^{b\Delta M_i/2}}{b \ln 10} [1 - 10^{-b(M_{\max} - M_i + \Delta M_{\max} + \Delta M_i/2)}]. \end{aligned} \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), график накопленной повторяемости в полулогарифмическом масштабе является не прямой линией, а кривой с асимптотой

$$a + \lg[10^{b\Delta M_i/2}/b \ln 10] - b(M_i - M_0), \quad (8)$$

которая изгибается вниз по мере приближения к значению $M_{\max} + \Delta M_{\max}$.

Для оценки параметров a и b графика повторяемости написана программа, которая в первом приближении при $F(b; \Delta M_i) = \Delta M_i$ рассчитывает параметры a и b в формуле (4). После получения параметра b оценивается значение функции $F(b; \Delta M_i)$ и переопределяются параметры a и b формулы (4); по заданным значениям $M_{\max}$ и $\Delta M_{\max}$ программа рассчитывает теоретические значения $N_{\Sigma}(M_i)$ по формуле (7).

Модели изосейст. Предполагается эллиптическая модель изосейст. Она определяется параметрическими уравнениями эллипса и уравнением макросейсмического поля.

На рис. 1 представлена схема модели. Здесь Δ — эпицентральное расстояние, α — угол между направлением на рассматриваемую точку и осью x , ось x совпадает с простиранием зоны ВОЗ, a^* — большая полуось, b^* — малая полуось эллипса.

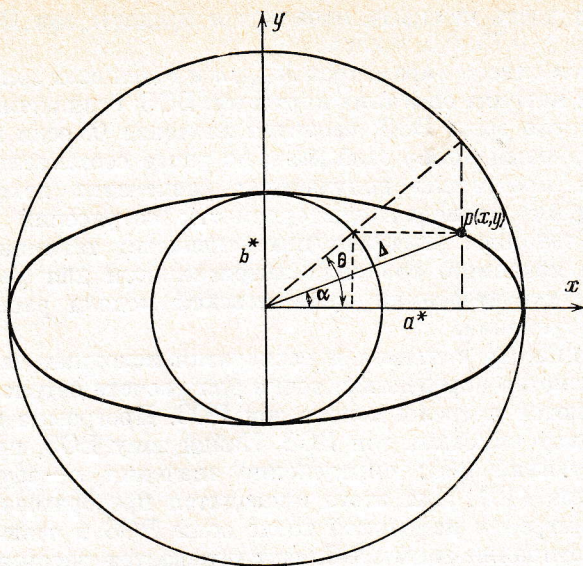


Рис. 1. Основные характеристики модели изосейст

Из рисунка следует, что вдоль изосейсты в зависимости от α

$$\Delta = a^* \left| \frac{\cos \theta}{\cos \alpha} \right| = b^* \left| \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right|, \quad (9)$$

где

$$\theta = \arctg[(a^*/b^*) \tg \alpha].$$

Эти уравнения определяют форму изосейст через параметр a^*/b^* . Затухание интенсивности с увеличением гипоцентрального расстояния определяется уравнением макросейсмического поля типа Ковеслигети

$$I = bM - k \lg r - pr + d, \quad (10)$$

где r — эффективное гипоцентрального расстояния. Возможны разные способы задания интенсивности на изосейсте по (10). Использовано три варианта:

$$r = \sqrt{a^{*2} + h^2}, \quad r = \sqrt{\bar{\Delta}^2 + h^2}, \quad r = \sqrt{b^{*2} + h^2}.$$

Они соответствуют случаям, когда спад интенсивности с расстоянием по (10) задавался вдоль большой оси a^* , вдоль среднего радиуса $\bar{\Delta}$ или вдоль малой оси b^* эллипса. Таким образом можно учесть разные варианты затухания сейсмической интенсивности при одном уравнении макросейсмического поля. Средний радиус $\bar{\Delta}$ определяется как функция параметров a^* и b^* с помощью эллиптического интеграла первого рода. Для практических расчетов задаются: отношение a^*/b^* , Az — угол простирания зоны ВОЗ (оси x) с направлением запад — восток, параметры уравнения (10), способ определения эффективного радиуса r и значение глубин очагов землетрясений h .

Программа SACUDIDA. Для расчета сотрясаемости написана программа SACUDIDA. Исходными данными для расчетов являются: карта региона с зонами ВОЗ; параметры графиков повторяемости и модели изосейст для каждой зоны ВОЗ.

Эти данные вводятся следующим образом: карта региона разделяется на элементарные квадраты определенных размеров. Рассчитываются нормирующие факторы для каждого элементарного квадрата в зависимости

от того, какая часть квадрата попадает в пределы зон ВОЗ; рассматриваются случаи: 1; 0,75; 0,5; 0,25; 0.

Составляется список параметров $M_{\max}$, a и b для всех зон ВОЗ.

Образуется матрица описания карты зон ВОЗ; если элементарный квадрат находится вне зоны ВОЗ, вводится значение 0, если в зоне ВОЗ, то вводится порядковый номер этой зоны из ранее составленного списка.

На выходе программы получаются: распечатка исходных данных; таблицы средних периодов повторяемости сотрясений интенсивности $I \geq I_k$, где I_k — заданное значение интенсивности; таблицы вероятностей превышения заданного значения интенсивности для разных периодов ожидания при использовании пуассоновской модели распределения повторяемости сотрясений.

Работа начинается с чтения и распечатки исходных данных. Следующим шагом является определение точки для расчета сотрясаемости. После этого определяются пределы поиска зон ВОЗ. Программа начинает обрабатывать матрицу описания зон ВОЗ. Найдя зону ВОЗ, программа переходит на следующий шаг: определение значения r — эффективного радиуса в формуле (10). Для этого проводится преобразование координат в систему с центром в найденной точке зоны ВОЗ и осью x , направленной вдоль простирания зоны ВОЗ, рассчитывается расстояние Δ и с помощью формулы (9) определяется значение a^* . При необходимости рассчитываются b^* или Δ и для соответствующего случая находится r . Затем по формуле (10) для заданного I определяется M_I . Если $M_I \leq M_{\max} + \Delta M_{\max}$ для заданной зоны ВОЗ, вычисляется значение $N_z(M_I)$. Таким образом проводятся расчеты для всех зон ВОЗ. Когда заканчивается процесс поиска зон ВОЗ, запоминается значение периода сотрясаемости заданного балла $T_I = B_I^{-1}$ для этой расчетной точки и начинаются расчеты для другой точки. После окончания расчетов распечатывается массив средних периодов сотрясаемости и начинаются расчеты вероятности превышения значения I для разных периодов ожиданий. Полученные значения вероятности выводятся на печать и программа продолжает цикл с другим значением I_k .

Проверка программы. Для отладки программы была рассчитана сейсмическая сотрясаемость для двух районов СССР — Крыма и Молдавии. Исходными данными были зоны ВОЗ и параметры a , b , $M_{\max}$, взятые из [5], и модели изосейст: круговая по [6] для Крыма и эллиптическая, полученная путем переработки модели Раду и Апопей [7] для Вранчских землетрясений. Расчеты по программе SACUDIDA хорошо согласуются с расчетами сотрясаемости в [4, 5] и с данными по ощущавшимся землетрясениям в Крыму и Молдавии.

Сейсмическая сотрясаемость Восточной Кубы. Зоны ВОЗ. Восточная Куба находится на границе Северо-Американской плиты с Карибской. Сейсмичность региона тесно связана с движением плит. На рис. 2 показана карта инструментально зарегистрированных эпицентров землетрясений. Как видно из рисунка, можно грубо выделить две главные зоны ВОЗ. Одна (А, Б, В, Г) расположена на севере глубоководного желоба Каймана, а другая (Д, Е) — на юге этого желоба. Анализ карты эпицентров с более точными определениями координат (1950–1981 гг.) совместно с данными о глубине морского дна и изостатических аномалиях гравитационного поля [8] позволил условно выделить шесть зон ВОЗ для этого региона. На рис. 2 показаны карта эпицентров за 1901–1981 гг. и выделенные зоны ВОЗ.

Модели изосейст. В [2] было установлено, что макросейсмическое поле землетрясений Карибского региона в среднем удовлетворительно описывается формулой, полученной для Камчатки [9]:

$$I = 1,5M - 2,63 \lg r - 0,0087r + 2,5. \quad (11)$$

Экспериментальные карты изосейст были сопоставлены с теоретиче-

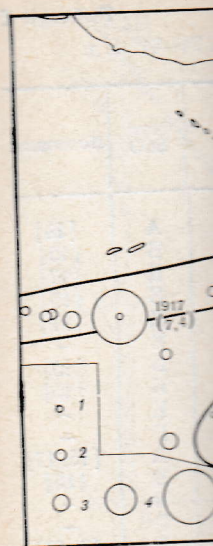


Рис. 2. Карта эпицентров землетрясений. Буквы — магнитуда. Буквы — магнитуда.

скими моделями. В [2] было установлено, что макросейсмическое поле землетрясений Карибского региона в среднем удовлетворительно описывается формулой, полученной для Камчатки [9]:

В список вошли два землетрясения ($M=7,8$) и 2 действующих сейсмограмм дается среднего. Однако изучаемом рттенсивность может думать, можно, южн

¹ Экспериментальный институт геофизики и геохимии

ВОЗ; рассматри-

он ВОЗ.

ментарный квад-
в зоне ВОЗ, то
ного списка.

ходных данных;
интенсивности
ы вероятностей
разных периодов
спределения по-

данных. Следую-
саемости. После
начинает обра-
программа пере-
эффективного ра-
вание координат
ю x , направле-
вание Δ и с по-
бходимости рас-
одится r . Затем
 $M_s \leq M_{\max} + \Delta M_{\max}$
Таким образом
вается процесс
емости заданно-
ся расчеты для
я массив сред-
ности непревы-
енные значения
цикл с другим

ла рассчитана
а и Молдавии.
 $M_{\max}$, взятые из
эллиптическая,
для Вранчских
согласуются с
внимся земле-

ВОЗ. Восточная
с Карибской.
рис. 2 показав-
землетрясе-
главные зоны
одного желоба
карты эпицен-
1 гг.) совмести-
номалиях гра-
зон ВОЗ для
1901–1981 гг.

мическое поле
тельно описы-

(11)

с теоретиче-

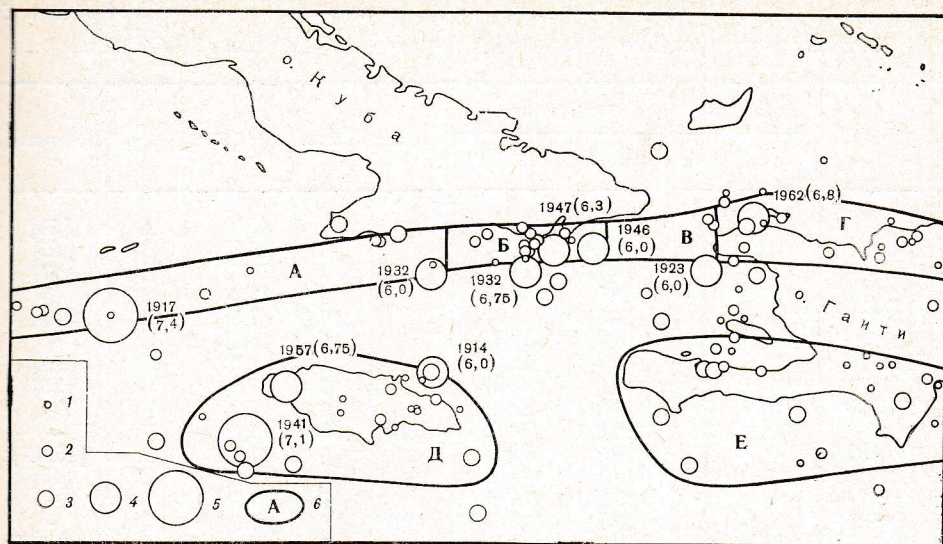


Рис. 2. Карта эпицентров за 1901–1981 гг. Для землетрясений с $M \geq 6$ указаны год и магнитуда. Буквами А, Б, В, Г, Д обозначены зоны ВОЗ. 1 – $M \leq 4$; 2 – $4 \leq M < 5$; 3 – $5 \leq M < 6$; 4 – $6 \leq M < 7$; 5 – $7 \leq M < 8$; 6 – зоны ВОЗ

скими моделями¹. Как результат этих сопоставлений были установлены следующие закономерности: для всех зон ВОЗ справедлива формула (14); способы определения эффективного радиуса следующие: $r = \sqrt{a^2 + h^2}$ для зон А, В, С и $r = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$ для зоны Г; для зон Е и Д из-за отсутствия достаточно уверенных данных предлагается круговая модель изосейст, для зон А и В – отношение $a^*/b^* = 1,6$, для зоны В – 1,1 и для зоны Г – 2,4.

Сейсмический режим. Для изучения сейсмического режима был составлен Каталог землетрясений для района $17-24^\circ$ с.ш. и $71-81^\circ$ з.д. за период 1500–1980 гг. Исходными данными для этого явились международные сводки землетрясений [10–12], каталог Гутенберга – Рихтера [13] и работа [14].

Макросейсмические данные неравноценны для различных участков региона. Существуют зоны с очень детальными материалами, такие, как район г. Сантьяго-де-Куба [15, 16] и о-в Ямайка [17]. Для о-ва Гаити имеются данные лишь для сравнительно более сильных землетрясений², а для морских регионов имеются данные только для самых сильных землетрясений. Магнитуды этих землетрясений были определены с учетом особенностей макросейсмического поля, установленных для разных зон ВОЗ.

В список самых сильных землетрясений региона (табл. 1) не включены два землетрясения, которые были учтены в работе [2]: 14.VI 1899 г. ($M=7,8$) и 21.VI 1900 г. ($M=7,9$). Нет сомнений, что эти землетрясения действительно произошли в указанное время. В [18] на основании сейсмограмм дается переоценка их магнитуд: $M_s=7,8$ для первого и 7,6 для второго. Однако нет уверенности, что землетрясения произошли именно в изучаемом регионе. Землетрясение 1899 г. ощущалось на Ямайке с интенсивностью 4 балла [17] и не ощущалось на Кубе и Гаити. Это позволяет думать, что эпицентр находился примерно в 400 км от Ямайки, возможно, южнее о-ва Большого Каймана, вне анализируемого региона. Это

¹ Экспериментальные карты изосейст были любезно предоставлены Т. Чуй из Института геофизики и астрономии АН Кубы.

² Данные для острова Гаити были любезно предоставлены Т. Чуй из Института геофизики и астрономии АН Кубы.

Сильные землетрясения ($M_{LH} \geq 6,6$) в регионе 16–24° с. ш., 71–81° з. д.

Таблица 1

Дата	Время		Координаты		h , км	I_{max}	M_{LH}	Зона ВОЗ	Источник
	ч	мин	φ° , N	λ° , W					
1551			(19,9)	(76,6) ¹		8	(7,0)	А	[16]
VIII 1578			(19,9)	(76,0)		8	(6,75)	Б	[15]
1667			(17,8)	(77,0)		8	(6,75)	Д	[17]
11.II 1678	14	30	(19,9)	(76,0)		8	(6,75)	Б	[15]
7.VI 1692	16	40	(17,8)	(76,8)		10	(7,5)	Д	[17]
16.IX 1751 ²	03	00	(18,6)	(72,3)		9	(6,8)	Е	—
11.VII 1760			(19,9)	(76,0)		8	(6,75)	Б	[15]
12.VI 1766	04	45	(19,9)	(76,1)		9	(7,5)	Б	[15]
4.VI 1770 ²	00	15	(18,6)	(72,6)		9	(7,5)	Е	—
7.V 1842 ²	22	25	(20,0)	(72,2)	(60)	10	(8,2)	Г	—
7.VII 1852 ²	12	25	(19,3)	(79,5)		5	(7,7)	А	[15, 17]
20.VIII 1852	13	36	(19,9)	(75,9)		9	(7,3)	Б	[15]
23.IX 1887 ²	11	55	(19,7)	(73,8)		9	(7,9)	В	—
29.XII 1897 ²	11	32	(20,1)	(71,4)	(50)	9	(7,5)	Г	—
14.I 1907	20	29	(18,4)	(76,8)		9	6,6	Д	[2, 17]
20.II 1917	19	29	19,0	80,0		6	7,4	А	[11, 13]
3.II 1932	06	16	19,7	75,5		8	6,75	Б	[11, 13]
7.IV 1941	23	29	17,75	78,5		6	7,1	Д	[13]
2.III 1957	00	27	18,35	78,11	0	8	6,75	Д	[14]
20.IV 1962	05	47	20,6	72,2	25	7	6,8	Г	[10]

¹ В скобках указаны координаты и магнитуды, определенные по макросейсмическим данным.

² Данные, любезно предоставленные Т. Чуй из Института геофизики и астрономии АН Кубы.

Исходные данные для построения графиков распределенной и накопленной повторяемости

Таблица 2

Зона ВОЗ		Магнитуда							
		4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Весь район	N	13	8	10	5	3	3	7	2
	T	20	20	50	60	70	80	380	380
А+Б+В+Г	N	7	5	6	3	2	2	5	2
	T	20	20	50	60	70	80	380	380
А+В ¹	N	2	2	4	2	—	1	2	1
	T	20	20	50	60	—	80	380	380
Б ²	N	3	10	4	1	1	5	2	—
	T	20	80	80	80	80	430	430	—
Г ²	N	2	1	1	—	1	—	1	1
	T	20	20	50	—	70	—	430	480
Д+Е	N	6	3	4	2	1	1	2	—
	T	20	20	50	60	70	80	380	—
Д	N	3	9	2	2	2	2	1	—
	T	20	80	80	80	380	380	380	—
Е	N	3	2	3	1	2	1	1	—
	T	20	20	50	60	380	380	430	—

Примечание. N — количество землетрясений, T — срок представительности. Буквы соответствуют зонам ВОЗ на рис. 4.

¹ В этой зоне $M_{max} = 7,75 \pm 0,25$, поэтому последний интервал соответствует магнитуде 7,875 и имеет ширину 0,25. Для построения графика повторяемости были перераспределены землетрясения в интервалах магнитуд в 6, 6,5 и 7 в два интервала длиной 0,75 и центрами в 6,125 и 6,875.

² Для построения графика повторяемости были перераспределены землетрясения в интервалах 5,5, 6, 6,5 и 7 в два интервала длиной 1 и центрами в 5,75 и 6,75.

$N/\Delta M$

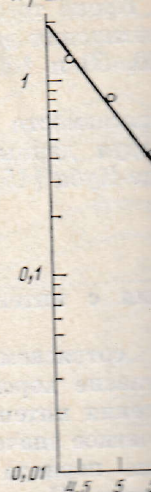


Рис. 3. Граф...

согласуется с те...

[19]. Землетряс...

гиона, в [20] э...

в [19] даются л...

$\pm 20^\circ$. Отсутств...

правильном по...

не в пределах а...

В табл. 2 пр...

фиков повтор...

В зонах А и В...

нены и предп...

подзонах (А и...

для которой до...

режима.

Все магнитуд...

землетрясений...

считаны в M_{LH}

полученной в Г

Определени...

ную задачу — с...

них нетinstr...

шен формальн...

0,25 единиц б...

шего в прошл...

и Е — $7,5 \pm 0,25$

Графики ра...

всех зон ВОЗ

ведены в табл.

Расчет сотр...

ный координат...

мером $0,2 \times 0,2$

в зависимости

расчета сотряс...

Таблица 1

71–81° з. д.

Зона ВОЗ	Источник
А	[16]
Б	[15]
Д	[17]
Б	[15]
Д	[17]
Е	—
Б	[15]
Б	[15]
Е	—
Г	—
А	[15, 17]
Б	[15]
В	—
Г	—
Д	[2, 17]
А	[11, 13]
Б	[11, 13]
Д	[13]
Д	[14]
Г	[10]

макросейсмическим

и астрономии

Таблица 2

енной

7,5	8
7	2
380	380
5	2
380	380
2	1
380	380
2	—
430	—
1	1
430	480
2	—
380	—
1	—
380	—
1	—
430	—

ти. Буквы соответ-

ствует магнитуде

перераспределены

и 0,75 и центрами

трясения в интер-

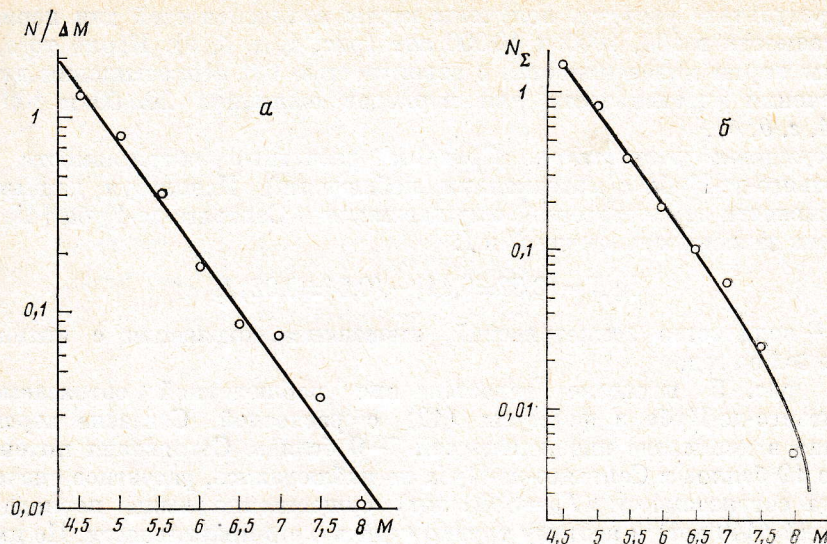


Рис. 3. Графики распределенной (а) и накопленной (б) повторяемости землетрясений для всего района

согласуется с тем, что возможные ошибки в координатах составляют $\pm 10^\circ$ [19]. Землетрясение 1900 г. не ощущалось на островах Карибского региона, в [20] эпицентр этого землетрясения помещен в район Гондураса, в [19] даются возможные ошибки определения эпицентра, достигающие $\pm 20^\circ$. Отсутствие макросейсмических данных не позволяет судить о его правильном положении и можно только гарантировать, что оно произошло не в пределах анализируемого региона.

В табл. 2 представлены данные, использованные для построения графиков повторяемости землетрясений всего региона и различных зон ВОЗ. В зонах А и В зарегистрировано мало землетрясений, поэтому они объединены и предполагается, что параметры сейсмического режима в обеих подзонах (А и В) одинаковы. Их разъединяет довольно активная зона Б, для которой достаточно данных для оценок параметров сейсмического режима.

Все магнитуды в табл. 1 соответствуют M_{LN} . В тех случаях, когда для землетрясений имелись только определения магнитуд m_{pv} , они были пересчитаны в M_{LN} по формуле

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

полученной в [2] для Карибского региона.

Определение максимальной магнитуды представляет собой очень трудную задачу — самые сильные землетрясения произошли до XX в. и для них нет инструментальных определений M ; поэтому вопрос об $M_{\max}$ решен формально. Для каждой зоны за $M_{\max}$ принимались значения, на 0,1–0,25 единиц большие магнитуды максимального землетрясения, возникшего в прошлом. Для зоны А и В принято $M_{\max} = 7,75 \pm 0,25$; для зон Б, Д и Е — $7,5 \pm 0,25$ и для зоны Г — $8,0 \pm 0,25$.

Графики распределенной и накопленной повторяемости землетрясений всех зон ВОЗ построены для района (рис. 3) и параметры графиков приведены в табл. 3.

Расчет сотрясаемости. Подготовка исходных данных. Район, ограниченный координатами 17–21,4° с.ш. и 71–81° з.д., разделен на квадраты размером $0,2 \times 0,2^\circ$. Нормирующий фактор для каждого квадрата рассчитан в зависимости от площади зон ВОЗ. Сводка данных, использованных для расчета сотрясаемости, представлена в табл. 4.

В результате расчетов получены карты интенсивностей для периодов сотрясаемости в 100, 1000 и 10 000 лет (рис. 4, а, б, в). Кроме того, построены карты интенсивностей с вероятностью 0,9 непревышения данного значения интенсивности для периодов ожиданий 20, 50 и 100 лет (рис. 4, г, д, е).

Обсуждение результатов. Сравним расчетные сотрясаемости для г. Сантьяго-де-Куба с материалами наблюдений. Используя данные по интенсивности землетрясений, ощущавшихся в Сантьяго-де-Куба [15, 16], получена зависимость между N и I :

$$\lg N = (2,52 \pm 0,11) - (0,54 \pm 0,02)I, \quad (12)$$

где N — количество землетрясений, вызвавших сотрясения с интенсивностью $\geq I$ за год.

На рис. 5 показано сопоставление наблюдаемой сотрясаемости г. Сантьяго-де-Куба и формулы (12) с расчетной. Согласие хорошее, особенно в диапазоне интенсивностей 7–9 баллов. Сотрясения интенсивностью 10 баллов в Сантьяго-де-Куба не наблюдались, расчетное значение периода сотрясаемости ($T_{10}=3650$ лет) существенно выше периода наблюдений (440 лет) и поэтому трудно судить о его правильности. По имеющимся данным, периоды повторения 5–6-балльных землетрясений меньше расчетных. На результаты расчетов могут влиять разные факторы. Для зоны ВОЗ Б непосредственно к югу от Сантьяго-де-Куба при расчетах

Таблица 3

Параметры графиков повторяемости региона

Зона ВОЗ	Площадь, тыс. км ²	a ($M_0=0$)	A_5^* ($S_0=1000$ км ²)	b	$\sigma_{\lg[N/F(b; \Delta M)]}$	$\rho[M, \lg(N/F(b; \Delta M))]$
Весь район	150,1	2,69	0,0023	0,57	0,09	0,99
А+Б+В+Г	57,5	2,16	0,0035	0,51	0,08	0,99
А+В	33,1	1,83	0,0029	0,51	—	—
Б	8,0	1,88	0,012	0,52	0,07	0,99
Г	16,5	1,53	0,0029	0,51	—	—
Д+Е	92,6	2,38	0,0016	0,58	0,07	0,99
Д	39,1	2,05	0,0018	0,58	—	—
Е	52,9	2,02	0,0013	0,58	—	—

Примечание. Для зон А+В, Г, Д и Е оценены параметры a при фиксированных значениях b из-за недостатка данных для оценки обоих параметров; σ — дисперсия, ρ — коэффициент корреляции.

Таблица 4

Исходные данные для расчета сотрясаемости

Зона	a	b	$M_{\max}$	h , км	Az	a^*/b^*	Способ определения
А+В	1,83	0,51	$7,75 \pm 0,25$	30	8 (А) 0 (В)	1,6	$r = \sqrt{a^{*2} + h^2}$
Б	1,88	0,52	$7,5 \pm 0,25$	30	2	1,1	$r = \sqrt{a^{*2} + h^2}$
Г	1,53	0,51	$8,0 \pm 0,25$	50	0	2,4	$r = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$
Д	2,05	0,58	$7,5 \pm 0,25$	30		1	
Е	2,02	0,58	$7,5 \pm 0,25$	30		1	

Примечание. Az — угол между простиранием зоны ВОЗ и направлением запад-восток. В случае зоны А+В этот угол разный для участков А и В. В скобках указаны соответствующие участки.

и сотрясаемости
огласие хорошее,
ясения интенсив-
счетное значение
ше периода на-
ьности. По имею-
трясений меньше
е факторы. Для
ба при расчетах

Таблица 3

$\sigma_{\text{lg}}[N/F(b; \Delta M)]$	$\sigma[M, \lg(N/F(b; \Delta M))]$
0.99	0.99
0.98	0.99
—	—
0.97	0.99
—	—
0.97	0.99
—	—
—	—

фиксированных значе-
дисперсия, ρ — коэффи-

Таблица 4

a^*/b^*	Способ определения
1,6	$r = \sqrt{a^{*2} + h^2}$
1,1	$r = \sqrt{a^{*2} + h^2}$
2,4	$r = \sqrt{\Delta^2 + h^2}$
1	
1	

лением запад-восток.
ках указаны соответ-

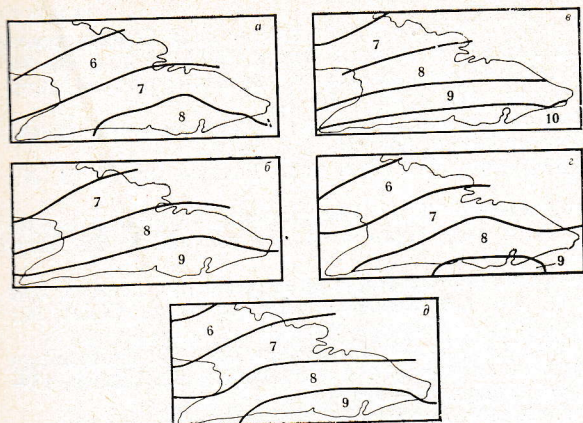


Рис. 4

Рис. 4. Карта интенсивностей I и более для периодов повторяемости 100 (а), 1000 (б) и 10 000 (в) лет и карты непревышения интенсивностей I с вероятностью 0,9 для периодов ожидания 20 (г), 50 (д) и 100 (е) лет

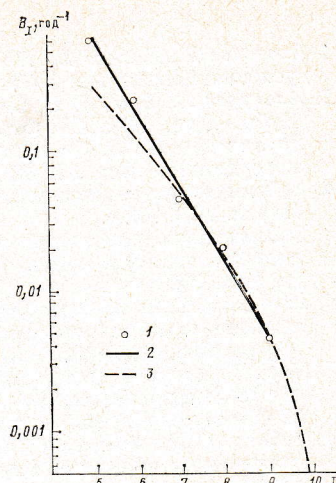


Рис. 5

Рис. 5. Сопоставление наблюдаемой сотрясаемости с расчетной для г. Сантьяго-де-Куба: 1 — средние периоды по данным наблюдений, 2 — аппроксимация по формуле (12), 3 — расчетная сотрясаемость по программе

была использована глубина $h=30$ км, не учитывались землетрясения с $h<30$ км, которые могут вызывать сотрясения интенсивностью 5–6 баллов при меньших значениях M и соответственно повысить их повторяемость. Не учитывались также возможные местные зоны ВОЗ, которые могли вызывать сотрясения в 5–6 баллов в городе. Очаги в зоне ВОЗ учитывались только на расстоянии до 500 км от Сантьяго-де-Куба; эта зона протягивается далее на восток и на расстоянии 675 км от города возможны землетрясения, вызывающие в нем сотрясения интенсивностью 5–6 баллов. После учета этих соображений расчетная сотрясаемость для $I \geq 5$ и ≥ 6 должна повыситься.

Интервалы между землетрясениями с $I \geq 7$ и ≥ 8 подчиняются экспоненциальному закону распределения, что соответствует пуассоновской модели распределения сотрясений. Вероятность того, что за время t не произойдет ни одного события интенсивностью $\geq I$, равна по этой модели

$$p_{n, \infty I}(t) = e^{-t/T_I}, \quad (13)$$

где T_I — период сотрясаемости с интенсивностью $\geq I$.

По формуле (13) вероятность того, что за время t не произойдет ни одного события с интенсивностью I , равна приблизительно 0,9 при $t = 0,1T_I$. Таким образом, карты интенсивности с вероятностью 0,9 непревышения данного значения для периодов ожиданий 20, 50 и 100 лет должны соответствовать картам интенсивностей для периодов сотрясаемости 200, 500 и 1000 лет соответственно. Совпадающие карта для периодов сотрясаемости 1000 лет и карта непревышения с вероятностью 0,9 для периода в 100 лет, показаны на рис. 4, б.

Следует подчеркнуть, что полученные оценки сотрясаемости Восточной Кубы сопоставлены с наблюдаемыми данными только для Сантьяго-де-Куба.

В дальнейшем необходимо улучшить методику выделения зон ВОЗ этого региона, а также уточнить параметры их сейсмического режима и провести исследование изменения карт сотрясаемости в зависимости от точности данных, используемых при расчетах.

Литература

1. Альварес У., Бланко П., Медведев С. В., Мендес Л., Штейнберг В. В. Сейсмические условия Сантьяго-де-Куба.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1973, № 5, с. 81–86.
2. Альварес Л., Бунэ В. И. Оценка сейсмической опасности для юго-восточной части Кубы.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1977, № 10, с. 54–67.
3. Ризниченко Ю. В. От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1965, № 11, с. 1–12.
4. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР/Отв. ред.: Ризниченко Ю. В. М.: Наука, 1979. 192 с.
5. Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г./Отв. ред.: Бунэ В. И., Горшков Г. П. М.: Наука, 1980. 302 с.
6. Шебалин Н. В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании.— В кн.: Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968, с. 95–111.
7. Radu C., Aporei I. Macroseismic field of the Romanian earthquakes.— In: Proceedings of the Symposium on the analysis of seismicity and on seismic risk, Liblice, 17–22 October, 1977. Prague: Academia, 1978, p. 193–208.
8. Адаев А. И., Ушаков С. А. Гравиметрическая карта остаточных топографо-изостатических аномалий Карибского моря. Масштаб 1:4 000 000. М.: Изд-во МГУ, 1974.
9. Федотов С. А., Шумилина Л. Г. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, № 9, с. 3–15.
10. Preliminary determination of epicenters, monthly listing, Rockville, U.S. Depart. of Interior, National Earthquake Information Service, 1967–1981.
11. International seismological summary 1912–1963. Kew Observatory, Richmond, Surrey, 1918–1970.
12. Regional catalogue of earthquakes (Years 1964–1980). International Seismological Centre, Edinburgh, Scotland, 1966–1982.
13. Gutenberg B., Richter Ch. F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton University Press, 1954. 310 p.
14. Sykes L. R., Ewing M. The seismicity of the Caribbean region.— J. Geophys. Res., 1965, v. 70, № 20, p. 5065–5074.
15. Chuy T., Pino O. Datos macrosísmicos de los terremotos en la provincia Santiago de Cuba.— Inv. Sismológicas en Cuba, 1982, № 2, p. 44–136.
16. Chuy T., Gonzalez B., Alvarez L. Sobre la peligrosidad sísmica en Cuba.— Inv. Sismológicas en Cuba, 1983, № 4, p. 84–123.
17. Tomblin J. M., Robson G. R. A catalogue of felt earthquakes for Jamaica with references to other islands in the Greater Antilles 1524–1971.— Mines and Geol. Div., Jamaica, 1977, Spec. Pub., № 2. 243 p.
18. Abe K., Noguchi S. Determination of magnitude for large shallow earthquakes 1898–1917.— Phys. Earth and Planet. Inter., 1983, v. 32, № 1, p. 45–59.
19. Gutenberg B. Great earthquakes 1896–1903.— Trans. Amer. Geophys. Union, 1956, v. 37, № 5, p. 608–614.
20. British association for the advancement of science. Portsmouth meeting, 1911. Sixteenth report on seismological investigations. XII. Seismic activity, 1898–1903, inclusive. London, 1911, p. 26–36.

Академия наук Кубы
Институт геофизики
и астрономии

Академия наук СССР
Институт физики Земли
им. О. Ю. Шмидта

Поступила в редакцию
27.IX.1984

ФИЗИКА
ЗЕМЛИ
№ 10 · 1985

УДК 550.34.01

ПРИМЕНЕ
К АНАЛИЗУ
ГО

Постро
вая устан
ственные
ниях.

Развитие
ханических с
ниях и temper
ных исследов
соких термод
ляется все бо
и прочность
тическое обо
линейной об
высоких гидр
упругие сред
целей напряж
дого тела.

Наследств
Л. Большев
тие при реп
компонентов
использовани
описания св
ровка матем
раметров и л
1. Мето
взаимосвязи
истории нап
следственно

Здесь t — дл
вой части (

где $0 \leq \alpha \leq$