

ACADEMIA DE CIENCIAS DE CUBA
INSTITUTO "ORDEN LENIN" DE FÍSICA DE LA TIERRA
O.Ya. Shmidt

Bajo derechos de autor

Alvarez Gómez José Leonardo

IN 550.34 (729.16)

SISMICIDAD DE CUBA ORIENTAL
01.04.12 - Geofísica

AUTORREFERAT
de la tesis para la obtención del grado científico
de candidato en ciencias físico-matemáticas

Moscú - 1985

El trabajo se desarrolló en el Instituto "Orden Lenin" de Física de la Tierra, O.Yu. Shmidt, de la Academia de Ciencias de la URSS y el Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba.

Tutor científico: doctor en ciencias físico-matemáticas
V.I.BUNE

Oponentes oficiales: doctor en ciencias técnicas
V.M.FREND
Candidato en ciencias físico-matemáticas
A.V.Suvilova

Organización oponente: Instituto de Geofísica y Geología de la Academia de Ciencias de la RSS de Moldavia.

La defensa de la tesis tendrá lugar el 22 de mayo de 1985 a las 10:00 en la sesión del Consejo Especializado de geofísica K.002.03.03 del Instituto de Física de la Tierra de la Academia de Ciencias de la URSS con dirección: Moscú, D-242, B.Gruzinskaya, 10.

Con la tesis puede familiarizarse en la biblioteca del IFT de la Academia de Ciencias de la URSS.

El autorreferat fue distribuido el 22 de abril de 1985

Su valoración del autorreferat, en dos ejemplares, le solicitamos la envíe al Secretario del Consejo Científico del IFT de la Academia de Ciencias de la URSS: 123810, Moscú, D-242, B.Gruzinskaya, 10.

Secretario Científico del
Consejo Especializado
Candidato en ciencias geol.min.

M.V. Nevskii

ACTUALIDAD DEL TEMA.— Cuba se encuentra en la placa Norteamericana, en la frontera con la placa del Caribe. La sismicidad de la porción suroriental de Cuba se explica por los procesos que ocurren en las fronteras de estas placas. Los terremotos fundamentales se concentran en una zona estrecha que pasa inmediatamente junto a la costa sur de Cuba Oriental. En las islas de Jamaica y La Española igualmente ocurren terremotos fuertes que provocan sacudidas en Cuba — Oriental. El territorio de Cuba Suroriental se caracteriza por una alta sismicidad. La ciudad de Santiago de Cuba, una de las primeras ciudades fundadas por los españoles en América, ha experimentado reiteradamente terremotos fuertes, entre ellos dos con intensidad de 9 grados. Al presente en esta región de Cuba se lleva a cabo una actividad constructiva intensa. Esto es lo que determina la importancia de realizar trabajos sobre el estudio de la sismicidad de Cuba Oriental.

Para la estimación de la peligrosidad sísmica son necesarios datos sobre la frecuencia de recurrencia de las sacudidas, sus probabilidades y sobre la sacudibilidad sísmica.

OBJETIVO DEL TRABAJO.— Cálculo de la sacudibilidad sísmica del territorio de Cuba Oriental y estimación de la estabilidad de los períodos de sacudibilidad ante las variaciones de los parámetros del régimen sísmico y del modelo de isosistas.

TAREAS FUNDAMENTALES.—

1. Análisis del campo macrosísmico de terremotos fuertes y débiles y selección de un modelo teórico de isosistas.
2. Confección de un catálogo de terremotos de la región de Cuba Oriental desde el siglo XVI hasta el presente.
3. Delimitación de zonas de origen de terremotos sobre la base del análisis de datos sísmológicos, geólogo-geofísicos y geomorfológicos, así como estimación de los parámetros del régimen sísmico y selección del modelo de isosistas para cada zona de origen de terremotos.

4. Desarrollo de un programa de computación para los cálculos de sacudibilidad y prueba del mismo en regiones bien estudiadas de la URSS.
5. Realización de los cálculos de sacudibilidad de Cuba Oriental, presentación de los resultados en forma de diferentes mapas.
6. Investigación de la estabilidad de los estimados de los períodos de sacudibilidad ante variaciones de los datos iniciales; $M_{\max}$, h (km), modelos de isosistas y pendiente del gráfico magnitud-frecuencia (parámetro b).

NOVEDAD CIENTÍFICA.— Por primera vez se ha utilizado un programa para los cálculos de sacudibilidad que considere un modelo elíptico de isosistas, y gráficos magnitud-frecuencia con una curvatura en la región de las magnitudes máximas. Para los cálculos se utiliza un mapa de las zonas de origen de terremotos con los parámetros del régimen sísmico y del modelo de isosistas característicos para cada una de ellas. Los resultados fueron representados en forma de los mapas habituales de sacudibilidad y mapas de intensidades que no pueden ser excedidos con probabilidad 0.9 para diferentes tiempos de espera. Fueron obtenidos los primeros mapas de sacudibilidad sísmica de Cuba Oriental, los cuales mejoran significativamente la concepción de la peligrosidad sísmica de este territorio. Fueron obtenidos los siguientes resultados concretos.

1. Fue propuesto un modelo teórico de isosistas elípticas y demostrada su utilidad para los cálculos de las isosistas de terremotos de las Antillas Mayores y de la zona de origen de terremotos de Vrancea, R.S. Rumanía.
2. Para los cálculos de sacudibilidad fue utilizado un gráfico ^{mag-} frecuencia acumulativo con una curvatura en la región de las magnitudes máximas, y se demostró que tiene una mejor correspondencia con los datos experimentales que la representación en forma de

línea recta.

3. Fue desarrollado un programa de computación para el cálculo de la sacudibilidad, el cual además de los mapas habituales de sacudibilidad, permite confeccionar mapas con estimados probabilísticos de las intensidades que no pueden ser excedidas en diferentes tiempos de espera.
4. Para el territorio de Cuba Oriental fue confeccionada una serie de diferentes tipos de mapas de sacudibilidad sísmica.

EL AUTOR DEFIENDE:

1. Modelos de isosistas elípticas, que determinados por la relación de los semiejes de las elipses y una ecuación de campo macro sísmico de tipo Kávesligethy.
2. Fórmulas para el cálculo de las frecuencias acumulativas de terremotos y sus correspondientes gráficos magnitud-frecuencia con una curvatura en la región de las magnitudes máximas.
3. Programa para el cálculo de la sacudibilidad que emplea los factores anteriormente mencionados. Se utilizan como datos iniciales el mapa de las zonas de origen de terremotos con los parámetros del régimen sísmico y del modelo de isosistas característicos para cada zona. El programa permite presentar los resultados de los cálculos en forma de los mapas habituales de sacudibilidad y de mapas con diferentes estimados de la peligrosidad sísmica.
4. Cálculos de la peligrosidad sísmica de Cuba Oriental, presentados en forma de mapas de sacudibilidad y mapas de intensidades que pueden ser excedidos con probabilidad 0.9 en tiempos de espera de 20, 50 y 100 años.
5. Estimaciones de los períodos medios de recurrencia de las sacudidas con intensidad 7-9 grados en la ciudad de Stgo. de Cuba.

VALOR PRACTICO Y APLICACION DEL TRABAJO

Fue obtenida una serie de mapas de vacuidad y de estimados probabilísticos de la peligrosidad sísmica para Cuba Oriental. Estos mapas pueden ser utilizados en la confección del mapa de regionalización sísmica. La elaboración de los datos en computadora se ejecutó con tres programas en lenguaje FORTRAN, correspondientes al modelo de focosistas, los gráficos magnitud-frecuencia y la estimación de la peligrosidad sísmica. Estos programas pueden ser utilizados para llevar a cabo cálculos similares para cualquier región.

MATERIALES UTILIZADOS

Se utilizaron los siguientes datos: a) Catálogos de terremotos internacionales y regionales (International Seismological Summary 1912-1963; International Seismological Centre 1964-1980; National Earthquake Information Service 1969-1981; Gutenberg et al., 1965) b) Datos macrosísmicos publicados (Tomblin et al. 1978; Chuy 1982, 1984; Chuy et al. 1980, 1982, 1983, 1984) c) Datos macrosísmicos inéditos, facilitados gentilmente por T. Chuy del Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba.

APROBACION DEL TRABAJO

Los planteamientos fundamentales del trabajo de tesis se expusieron y discutieron en la reunión sismológica del Caribe (República Dominicana, 1983), el Simposio del KAPN "Tremótico 84" en Sofía (Bulgaria, 1984), el Seminario-Taller sobre Desastres Naturales (UNDRP) en La Habana (Cuba, 1984) y en la IV Jornada Científica del Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba en La Habana (Cuba, 1984).

VOLUMEN DEL TRABAJO

La tesis consta de Introducción, 5 capítulos, Conclusiones, listado de referencias bibliográficas (150 títulos) y dos anexos.

(catálogo de terremotos y tabla), abarcando 122 páginas mecanografiadas y 35 gráficos.

CONTENIDO DEL TRABAJO

En el primer capítulo están descritas las investigaciones sismológicas en Cuba y los trabajos de estimación de la peligrosidad sísmica en la región del Caribe. Se discute la posibilidad de realizar estimados cuantitativos de la peligrosidad sísmica de la región oriental de Cuba considerando todas las particularidades de la sismicidad de la región. Aparecen descritos los métodos de estimación de la peligrosidad sísmica en la URSS, los EE.UU. y otros países. Se discute la actualidad del enfoque cuantitativo para la estimación de la peligrosidad sísmica de Cuba Oriental y se presenta el esquema de estos trabajos.

En el segundo capítulo se da una breve descripción de las fuentes de la información sismológica utilizadas en el trabajo. Los datos instrumentales de todos los catálogos internacionales, grabados en banda magnética en el National Earthquake Information Service (catálogo NEF), fueron utilizados en el trabajo. Los datos macrosísmicos, conteniendo la evaluación del grado en puntos aislados y los mapas de isosistas de terremotos fuertes y comparativamente débiles, fueron tomados de numerosos trabajos regionales. Además, fueron utilizados datos inéditos, facilitados gentilmente por T. Quay del Institute de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba. Los mapas de isosistas son de muy variadas formas: de isosistas casi circulares a elípticas fuertemente alargadas. Fueron propuestos modelos de isosistas elípticas. El modelo se determina por la relación de los semiejes de las elipses (A/B) y los parámetros de una ecuación de campo macrosísmico del tipo de Haversigthy. Los modelos elípticos se describen por la fórmula:

$$\Delta = A \left| \frac{\cos \theta}{\cos \alpha} \right| = B \left| \frac{\sin \theta}{\sin \alpha} \right|$$

donde

$$\theta = \arctan (A/B \tan \alpha)$$

Δ - distancia epicentral, A, B - ejes mayor y menor respectivamente

α - ángulo entre el eje mayor y la dirección de Δ .

La ecuación del campo macrosísmico tiene la forma:

$$I = bM - K/\sqrt{r_e} - p/r_e + d \quad r_e = (\Delta^2 + h^2)^{1/2}$$

donde r_e - radioefectivo. Así, en lugar del radio de la isosista elíptica se seleccionan 3 direcciones - a lo largo de los ejes principales o a lo largo del radio medio de la elipse $\Delta_e = (A, \bar{A}, B)$

Con ayuda del modelo elíptico fue posible describir el campo macrosísmico de todos los terremotos de las Antillas Mayores y determinar las características medias regionales. Para la obtención de los modelos técnicos de isosistas fue desarrollado un programa de computación.

Fue preparado un catálogo de terremotos para la región limitada por las coordenadas 16° - 24° Lat.N y 71° - 81° Long.O.- En la preparación del catálogo se usaron los datos macrosísmicos para la determinación de las coordenadas de los epicentros y la magnitud de los terremotos.

En el tercer capítulo se examinan la tectónica, la sismicidad, el mecanismo focal de terremotos y la delimitación de las zonas de origen de terremotos. La región del Caribe se caracteriza por la presencia de varias placas tectónicas. En las fronteras entre las placas del Caribe y de América del Norte existe un desplazamiento de tipo corrimiento por el rumbo, al cual va acompañado por terremotos. La sismicidad es representada a través de los mapas de epicentros y los gráficos magnitud-frecuencia para los intervalos de profundidad 0-70 km y 70-150 km. Fue analizada la representatividad de los datos en el catálogo RDP. Se estudiaron los mecanismos focales publicados por otros autores, y para 27 casos se determinó el mecanismo focal usando el programa SOURCES de la biblioteca de programas del IPT de la Academia de Ciencias de la URSS.

A partir del análisis de los mapas de epicentros y de los datos geólogo-geofísicos fueron delimitadas las zonas de origen de terremotos. Fueron propuestas 2 variantes de delimitación; en la primera fueron delimitadas 2 zonas alargadas, con sismicidad homogénea; en la segunda, partiendo de la inhomogeneidad evidente de la sismicidad en el período 1901-1981, estas 2 zonas fueron subdivididas en 6 zonas diferentes.

En el cuarto capítulo se tratan los gráficos magnitud-frecuencia y el programa para el cálculo de la sacudibilidad sísmica.

Partiendo de la hipótesis de que la ley de Gutenberg-Richter es válida para la densidad ^{de} frecuencia de recurrencia de terremotos fueron obtenidas las fórmulas siguientes para los gráficos magnitud-frecuencia.

a) Distributivo

$$\lg(N_i(M_i)/F(b, \Delta M_i)) = a - b(M_i - M_0)$$

$$F(b, \Delta M_i) = \frac{1}{b \ln 10} \left[10^{b \Delta M_i / 2} - 10^{-b \Delta M_i / 2} \right]$$

b) Acumulativo

$$N_2(M_i) = 10^{a - b(M_i - M_0)} \frac{10^{b \Delta M_i / 2}}{b \ln 10} \left[1 - 10^{-b(M_{\text{max}} - M_i + \Delta M_i / 2)} \right]$$

donde a, b - parámetros, ΔM_i - longitud de los intervalos de agrupamiento de los terremotos, M_{max} - error en la determinación de M_{max} , $N_1(M_i)$ - terremotos en el intervalo $(M_i - \Delta M_i / 2, M_i + \Delta M_i / 2)$, $N_2(M_i)$ - terremotos en el intervalo $(M_i + \Delta M_i / 2, M_{\text{max}} + \Delta M_{\text{max}})$.

Así, el gráfico magnitud-frecuencia acumulativo se caracteriza por una curvatura en la región de las magnitudes máximas. Se obtuvieron las funciones de distribución y de densidad de distribución correspondientes de la frecuencia de recurrencia de los terremotos.

Fue desarrollado un programa de computación para la estimación de los parámetros a y b del gráfico magnitud-frecuencia por los métodos de los mínimos cuadrados y de la verosimilitud máxima, y para el cálculo de las frecuencias acumulativas. Se confecciona-

ron los gráficos magnitud-frecuencia distributivo y acumulativo para cada zona de origen de terremotos. Se demostró que la fórmula para las frecuencias acumulativas propuesta en este trabajo permite una mejor correspondencia con los datos experimentales que la línea recta en escala semilogarítmica.

Fue confeccionado el gráfico intensidad-frecuencia para la ciudad de Santiago de Cuba. Se demostró que los intervalos entre sacudidas consecutivas con intensidad $I \geq 7$ en Santiago de Cuba se distribuyen exponencialmente, lo que corresponden a un proceso poissoniano de generación de terremotos.

Se describe detalladamente el programa desarrollado para el cálculo de la sacudibilidad sísmica según la fórmula de Yu.V. Rishnichenko, y la obtención de estimados probabilísticos de la peligrosidad sísmica. En el programa se utilizan el modelo de isosistas y la fórmula de las frecuencias acumulativas propuestos en este trabajo. Los datos iniciales para el programa están constituidos por el mapa de zonas de origen de terremotos, los parámetros del régimen sísmico y del modelo de isosistas para cada zona. Se presentan ejemplos de la prueba del programa para cálculos de la sacudibilidad en Crimea y Moldavia. En la comparación de estos cálculos con el mapa de regionalización sísmica de la URSS se obtuvo una correspondencia satisfactoria. En la comparación con los mapas de sacudibilidad del álbum de mapas de sacudibilidad de la URSS de Yu.V. Rishnichenko (red) se obtuvo una correspondencia menos satisfactoria. Se analizan las causas de las discrepancias entre estos mapas.

En el quinto capítulo se presentan los resultados del cálculo de la sacudibilidad y de los estimados probabilísticos de la peligrosidad sísmica. La sacudibilidad se representa através de dos tipos de mapas de períodos medios de recurrencia de las sacudidas con intensidad ≥ 7 (mapas habituales de B_1) y mapas de intensidades máximas para diferentes períodos de recurrencia de las sacudidas.

Los cálculos probabilísticos se representan mediante 3 tipos de mapas: mapas de las probabilidades de no ser excedidos valores dados de intensidad para diferentes tiempos de espera, mapas de tiempos de espera durante los cuales no pueden ser excedidos valores dados de intensidad para diferentes niveles de probabilidad (0.5, 0.7, 0.9), y mapas de intensidades con probabilidad 0.5, 0.7 y 0.9 de no ser excedidos para diferentes tiempos de espera. Se realizó un experimento numérico del estudio de la influencia de los datos iniciales sobre los períodos medios de expectabilidad. Los cálculos se realizaron para 7 ciudades de Cuba Oriental. En las zonas de origen de terremotos ubicadas inmediatamente junto a las costas de Cuba Oriental y en la parte norte de La Española se analizan cuatro fuentes de variación: M_{max} , b , razón de los semiejes de las isosistas elípticas y parámetro b del gráfico magnitud-frecuencia.

Los resultados fundamentales son:

1. Se confeccionó un catálogo de terremotos para la región limitada por las coordenadas 16° - 24° Lat.N y 71° - 81° Long.O., desde 1551 hasta 1981. En aquellos casos en que no existían datos instrumentales las coordenadas y la magnitud se determinaron por datos macrosísmicos con ayuda del modelo de isosistas. Usando los datos del catálogo se confeccionaron los mapas de epicentros.
2. Se seleccionaron los mapas de isosistas de 18 terremotos y sobre su base se desarrolló un modelo teórico de isosistas elípticas. Se determinaron los parámetros del modelo para diferentes partes de las Antillas Mayores.
3. Se delimitaron las zonas de origen de terremotos en la región de Cuba Oriental. Para cada zona se determinaron los valores de M_{max} y los parámetros del régimen sísmico (a y b).
4. Fue propuesta una fórmula para los cálculos de las frecuencias acumulativas de los terremotos que corresponde a un gráfico magnitud-frecuencia con una curvatura en la región de las grandes magnitudes.

5. Se confeccionaron los gráficos intensidad-frecuencia para I 6 para la ciudad de Santiago de Cuba. Aparentan concentrarse los intervalos temporales entre sismos consecutivos con intensidad 7. Los mismos obedecen a una distribución exponencial, lo que corresponde a un proceso poissoniano de origen de terremotos.

6. Se desarrolló un programa para el cálculo de la sacudibilidad. Para los cálculos se utilizó un mapa de zonas de origen de terremotos con los parámetros a, b y h_{max} , los modelos de isosistas elípticas y la fórmula para el cálculo de las frecuencias acumulativas. El programa permite calcular los parámetros medios de la sacudibilidad y la probabilidad de no exceder valores dados de intensidad para diferentes tiempos de espera (20, 50, 100, 500, 1000 y 10000 años).

7. El programa se utilizó para los cálculos de la sacudibilidad de Crimea y Moldavia. Se obtuvo una correspondencia satisfactoria con el mapa de regionalización sísmica de la URSS.

8. Se realizaron los cálculos de la sacudibilidad sísmica de Cuba Oriental. Se confeccionaron los mapas de los períodos medios de sacudibilidad para diferentes intensidades I 6, I 7, etc., los mapas de las probabilidades de no exceder valores dados de la intensidad I para diferentes tiempos de espera.

9. La mayor poligonalidad se le asocia a la zona de origen de terremotos ubicada inmediatamente al sur de la isla entre Santiago de Cuba y Guantánamo. Se investigó la estabilidad de los estimados de los períodos de sacudibilidad para 7 ciudades de Cuba Oriental ante variaciones de los datos iniciales. La variación en la profundidad influye sustancialmente en la sacudibilidad sísmica sólo en las regiones muy próximas a las zonas de origen de terremotos; el alargamiento de las elipses del modelo de isosistas conduce a una disminución de la sacudibilidad en las zonas alejadas ubicadas transversalmente a la orientación de las estructuras fundamentales; las variaciones del parámetro b del gráfico magnitud-frecuencia o de

Máx conducen no sólo al cambio de los períodos de sacudibilidad, sino que a veces ocurre un aumento o disminución del valor de la intensidad máxima posible.

Esta tesis es el primer intento de realizar estimados cuantitativos de la sacudibilidad sísmica en Cuba. En ella se examinó solamente la zona con alta actividad relativa de Cuba Oriental. El resto del territorio de Cuba se caracteriza por la presencia de zonas sísmicas de baja actividad, para las cuales no es aplicable la metodología utilizada en esta tesis. La resolución de esta compleja cuestión requiere de la realización de investigaciones especiales, las cuales se salen del marco del trabajo presente.

Del tema de la tesis se publicaron los trabajos siguientes:

1. Estimación de la peligrosidad sísmica para la porción sur-oriental de Cuba (en ruso). Inv. AN SSSR, *Fizika Zemli*, 1977. No.10, p. 54-67 (coautor: V.I. Ruzé).
2. Sismicidad y régimen sísmico de Cuba y las acuatorias adyacentes (en ruso). En: Investigación de la sismicidad de las zonas sísmicas de baja actividad (Cuba Central). M., Nauka, 1983, p. 57-80 (coautores: T.G. Nautilan y A.G. Godakovskaya).
3. Particularidades del campo macrosísmico y estimación de los efectos macrosísmicos posibles en el emplazamiento (en ruso). En: Investigación de la sismicidad de las zonas sísmicas de baja actividad (Cuba Central). M., Nauka, 1983, p. 88-96 (coautores: T.G. Nautilan y T. Chuy).
4. Estimación de la peligrosidad sísmica para la ciudad de Santiago de Cuba. Inv. Sísm. en Cuba, 1983, N 4, p. 87-123.
5. El terremoto del 19 de febrero de 1976. Filón, región oriental de Cuba. Inv. Sísm. en Cuba, 1984, N 5, p. 5-60 (coautores: M. Borrero, B. Rubio, T. Chuy, B. González).
6. Regionalización sísmica en Cuba. I Seminario-Taller sobre Reacciones Naturales, UNIBO, 3-6 sept. 1984, Resúmenes. La Habana, 1984, publicación. La Habana, 1984, p. 36-59.

7. Mecanismo focal de terremotos en el arco del Caribe. Resúmenes, IV Jornada Científica, IGA. AOC, 1984, p. 73. (coautor: M. Cutille).
8. Modelo de isocintas de terremotos para las Antillas Mayores. Resúmenes, IV Jornada Científica, IGA. AOC, 1984, p. 74-75. (coautor: T. Chay).
9. Secundabilidad sísmica de Cuba Oriental. Resúmenes, IV Jornada Científica. IGA. AOC, 1984, p. 76. (coautor: V.I. Bane).
10. Catálogo de terremotos fuertes (IpVII, MSK-1978) de las Antillas Mayores. Resúmenes, IV Jornada Científica, IGA. AOC, 1984, p. 77. (coautor: T. Chay).

El autor expresa un profundo agradecimiento a su tutor V.I. Bane por la ayuda, las recomendaciones útiles y la atención por el trabajo, y a los trabajadores del laboratorio 704 del IPT de la AOC de la URSS y del departamento de sismología del IGA de la AC de Cuba por la ayuda en la preparación del trabajo.