

А. Г. ПРОЗОРОВ, Е. Я. РАНЦМАН

## СТАТИСТИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МОРФОСТРУКТУРЫ ВОСТОКА СРЕДНЕЙ АЗИИ

(Представлено академиком М. А. Садовским 18 VI 1971)

В настоящей работе исследуется взаимосвязь последовательных землетрясений; характеризующие эту связь параметры сравниваются с морфоструктурами. Методика исследования основана на сравнении локальных статистик для двух каталогов землетрясений: реального (<sup>1-3</sup>) и рандомизированного (<sup>4-5</sup>). Перечислим основные результаты.

1. Существует положительное влияние слабых землетрясений (V группа интенсивности или  $k = 9-12$  (<sup>1-3</sup>)): вероятность последующих повышается в окрестности исходного на некоторую величину  $p$ . Для нормальных землетрясений это повышение статистически значимо при  $\tau \sim 30-40$  суток и  $d$  более 50 км (оценка  $d$  может быть несколько завышена из-за ошибок в определении расстояний между близкими гипоцентрами). Положительное влияние сосредоточено при малых  $d$  и  $\tau$  (примерно половина взаимосвязанных землетрясений имеют  $d \sim 10-15$  км и  $\tau$  несколько часов) и медленно убывает при больших  $d$  и  $\tau$ . Взаимосвязь землетрясений при больших  $d$  и  $\tau$  может быть проявлением систематических изменений потока землетрясений в различных структурах, которые не учитываются рандомизированным каталогом. Для промежуточных глубин очага положительное влияние количественно меньше, но по-прежнему статистически значимо:  $\tau$  — несколько суток,  $d$  — порядка точности гипоцентров, 10—20 км.

2. Выделены цепочки взаимосвязанных слабых нормальных землетрясений, в которых каждое отделено от одного из остальных расстоянием  $d \leq d_0$  и временем  $\tau \leq \tau_0$ . Принято  $d_0 = 15$  км и  $\tau_0 = 3$  часа, при этом ошибка II рода — образование фиктивной цепочки из независимых землетрясений — составляет не более 7%, а ошибка I рода — пропуск цепочки — 43%. Для максимальных значений  $d_0 = 50$  км и  $\tau = 40$  суток погрешность II рода была бы слишком большой. Выделены также цепочки сильных землетрясений I—III группы интенсивности с порогами  $\tau_0 = 10$  суток и  $d_0 = 25$  км.

3. Для промежуточных землетрясений обнаружено (см. рис. 1) значимое на 90%-м уровне понижение величины положительного влияния  $p$  на интервале глубин 120—160 км, примерно том, на котором предполагается волновод (<sup>6</sup>), что согласуется с представлением о повышенной текучести пород в волноводе.

4. Намечается корреляция с морфоструктурами величины  $p$  и наклона  $\gamma$  линейного графика повторяемости землетрясений. Морфоструктуры представлены на рис. 2;  $p$  характеризуется распределением цепочек (для сравнения приведены также фиктивные цепочки, выделенные по рандомизированному каталогу); значения  $\gamma$ , вычисленные по формулам (<sup>7</sup>), представлены в соответствующих структурах. Распределение  $p$  значительно отличается от распределения сейсмической активности; основная масса цепочек слабых землетрясений сосредоточена в V области в структурах с мощным слоем осадков, повышенное  $p$  наблюдается также в месте выхода на поверхность древних архейских пород в районе Синьцзяна. Большие  $\gamma$  свойственны более тектонически напряженным территориям, расположен-

ным на границах горных стран Тянь-Шаня и Памира. Это согласуется с экспериментами по разрушению образцов горных пород (<sup>8</sup>, <sup>9</sup>) и результатами изучения афтершоков сильных землетрясений Японии (<sup>9</sup>):  $p$  и  $\gamma$  велики в сильно раздробленных породах, в условиях неоднородного, концентрированного источника напряжений или повышенной скорости деформаций; напротив, в консолидированных породах, в условиях однородного поля напряжений  $p$  и  $\gamma$  малы.

5. Отклонения  $p$  и  $\gamma$  от долговременных средних величин, по-видимому, могут быть связаны с подготовкой сильных землетрясений. В частности, некоторые аномальные цепочки были приурочены к местам будущих силь-

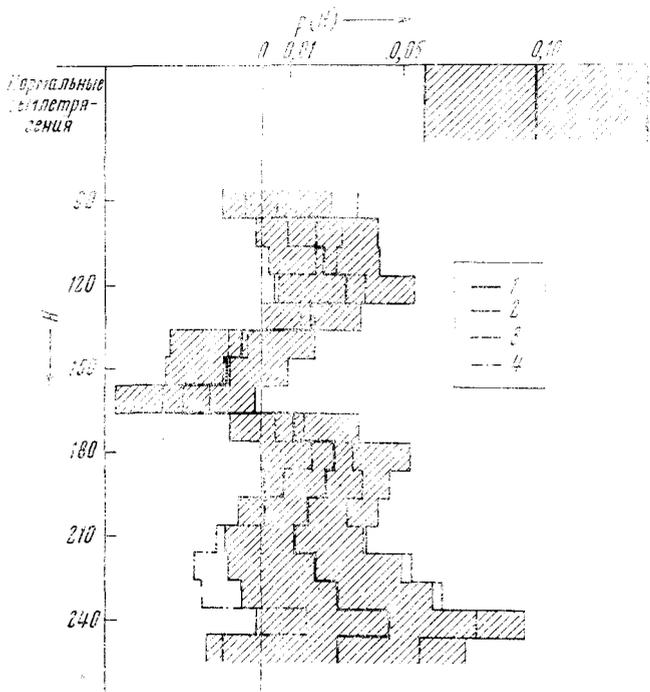


Рис. 1. Оценка положительного влияния  $p$  исходного землетрясения на последующие в диапазоне времени  $\tau \leq 15$  суток и расстояния  $d \leq 18$  км. Сила землетрясений — V группа интенсивности в 1952—1956 гг. и  $k = 9-12$  в 1957—1961 гг. Исходные землетрясения брались из интервала глубин  $\Delta H = 30$  км, скользящего с шагом 10 км. 1 — оценка  $p$ , 2 — 90%-й доверительный уровень для нее, 3, 4 — оценки  $p$  за 1952—1956 гг. и 1957—1961 гг. соответственно

ных землетрясений. В 20 км от Пржевальского землетрясения (1970 г.,  $M = 6,8$ ) в 1952 г. произошли 3 цепочки в течение 5 суток, всего в III области было 12 цепочек за 14 лет. В эпицентре Хантского землетрясения (1949 г.,  $M = 7,5$ ) цепочка из двух землетрясений с  $M = 5$  и  $M = 5,5$  и  $\tau = 12$  мин. произошла за двое суток до основного толчка. В 50 км от Чаткальского землетрясения (1946 г.,  $M = 7,5$ ), происшедшего на фоне абсолютного сейсмического затишья в этом радиусе, цепочка из 3 землетрясений произошла за 6 лет до него. За два года до Улугчатского землетрясения (1955 г.,  $M = 7$ ) значительно возросло количество цепочек в круге радиуса 100 км (см. (4)).

6. Интенсивность потока землетрясений Востока Средней Азии значительно перераспределялась между морфоструктурами. На рис. 3 схематически показаны изменения доли  $\theta$  III области. С этой схемой согласуется поведение абсолютной сейсмичности III области: на рубеже XIX—XX вв. в этой области произошли сильнейшие землетрясения с  $k = 17-18$ , затем в течение длительного периода таких землетрясений не наблюдалось, а с 1939 по 1965 гг. не было даже землетрясений с  $k = 16$ . Отметим, что с повышением  $\theta$  в III области в начале века активизировалась и более обширная территория — Восток Средней Азии и Гималаи: за 60 лет (1897—1956 гг.) здесь было 10 землетрясений с  $M \geq 8$  (10), из них 7 произошло за 14 лет (1897—1911 гг.), что значительно по критерию А. Н. Колмогорова (11) на 95%-м уровне. В (12) отмечается в это же время повышение сейсмичности

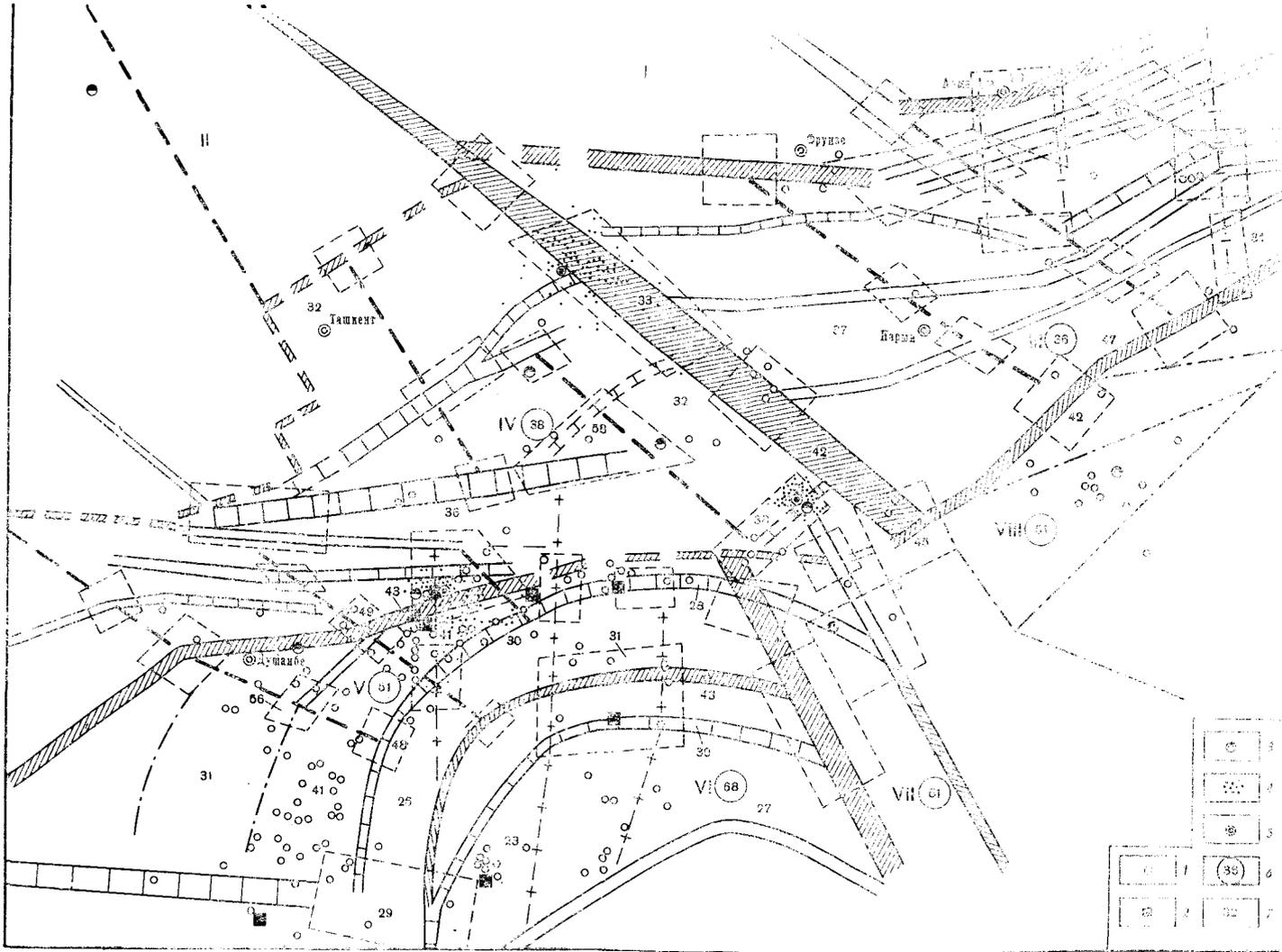


Рис. 2. Морфоструктурная схема Востока Средней Азии (17). 1 — центры взаимосвязанных слабых землетрясений; 2 — то же по рандомизированному каталогу; 3 — центры взаимосвязанных сильных землетрясений; 4 — некоторые афтершоки, а 5 — эпицентры Чаткальского, Хантского и Улугчатакского землетрясений; 6 —  $\gamma$  для морфоструктурных областей, обозначенных римскими цифрами по землетрясениям с  $k = 15-48$  за 1880-1965 гг.,  $k = 14$  за 1925-1965 гг. по каталогу (16) и  $k = 12-43$  по (3); 7 —  $\gamma$  для мелких структур по землетрясениям с  $k = 9-46$  по каталогу (3)

во всем мире, его значимость для  $M \geq 8$  по каталогу <sup>(10)</sup> по критерию А. Н. Колмогорова 99%. Эта схема, близкая к описанным в <sup>(13-15)</sup>, может представлять интерес не только для прогноза землетрясений, но и для объяснения известного парадокса, встреченного при оценке сейсмической опасности с помощью закона повторяемости: в Северном Тянь-Шане современная активность в 5—10 раз ниже <sup>(16)</sup>, чем в других районах с аналогичными разрушительными землетрясениями.

7. Проверилась гипотеза: сильное землетрясение помимо обычных афтершоков вызывает активизацию сейсмичности — «удаленные афтер-

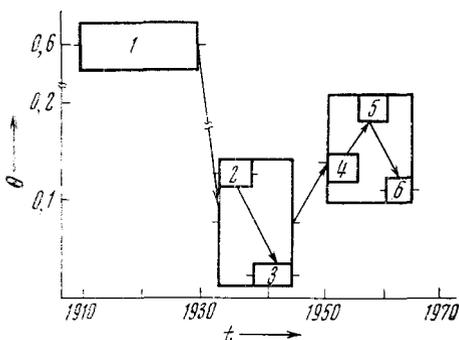


Рис. 3. Статистически значимые на 95%-м уровне по биномиальному критерию <sup>(14)</sup> изменения доли  $\theta$  сейсмичности Северного Тянь-Шаня (область III на рис. 2) от общей интенсивности потока землетрясений Востока Средней Азии в следующих периодах времени и диапазонах энергии: 1 —  $k \geq 17$ , 1895—1911 гг.; 2, 3 — I—IV группы интенсивности (2—1933—1939 гг., 3—1940—1945 гг.); 4—V группа интенсивности, 1952—1956 гг.; 5, 6 —  $k = 9-12$  (5—1957—1961 гг., 6—1962—1965 гг.)

шоки» — в местах будущих сильных землетрясений всего Востока Средней Азии. Рассматривались круги радиуса  $\sim 1^\circ$  вокруг эпицентров нормальных землетрясений с  $k \geq 14$  за 1962—1965 гг. и эпицентра Ташкентского землетрясения 1966 г. После удаленного сильного землетрясения определялось время  $\tau_k$  до первого слабого землетрясения с  $k = 9-13$ , происшедшего в рассматриваемом круге. Значимости  $s_k$  полученных  $\tau_k$  рассчитывались по 4-летнему среднему уровню сейсмичности в данном круге для данного класса  $k$ . Выбиралось  $k$ , дающее максимальную значимость  $s_{\max}$ .  $s_{\max}$  определялись для всех удаленных нормальных с  $k \geq 14$  и промежуточных с  $k \geq 15$  землетрясений, происшедших за год до сильного землетрясения в данном круге. Вероятности того, что полученные наборы  $s_{\max}$  противоречат случайному характеру  $\tau_k$ , получились следующими (в хронологическом порядке «предсказываемых» землетрясений): 0,555; 0,210; 0,765; 0,081; 0,675; 0,960; 0,996; 0,422; 0,540; 0,989. По критерию Реньи <sup>(11)</sup> при  $\alpha = 0,05$  это дает значимость существования удаленных афтершоков 99%.

Авторы выражают благодарность акад. И. П. Герасимову и проф. В. И. Кейлис-Бороку за руководство и помощь в работе.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
21 V 1971

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Атлас землетрясений в СССР, Изд. АН СССР, 1962. <sup>2</sup> Бюллетень сети сейсмических станций за 1957—1961 гг., Изд. АН СССР, 1958—1964. <sup>3</sup> Землетрясения в СССР в 1962—1965 гг., «Наука», 1964—1967. <sup>4</sup> Е. В. Вилькович, В. И. Кейлис-Борок и др., Тр. X Генеральной ассамблеи ЕСК, 2, М., 1970. <sup>5</sup> В. И. Кейлис-Борок, В. М. Подгаецкая, А. Г. Прозоров, Сборн. Вычислительная сейсмология, в. 5, «Наука», 1971. <sup>6</sup> А. А. Лукк, И. Л. Некрасов, ДАН, 162, № 3 (1965). <sup>7</sup> Л. В. Канторович, Г. М. Молчан и др., Изв. АН СССР, Физика Земли, № 5 (1970). <sup>8</sup> С. Д. Виноградов, К. М. Мирзоев, Тр. III Всесозн. симпозиума по сейсмическому режиму, ч. II, Новосибирск, 1969. <sup>9</sup> K. Mogi, Tectonophysics, 4, № 1 (1967). <sup>10</sup> S. J. Duda, Tectonophysics, 2, № 5 (1965). <sup>11</sup> Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов, Таблицы математической статистики, «Наука», 1965. <sup>12</sup> B. Gutenberg, C. F. Richter, Seismicity of the Earth and Associated Phenomena, New Jersey, 1954. <sup>13</sup> В. И. Кейлис-Борок, Л. Н. Малиновская, Сборн. Сейсмические методы исследования, «Наука», 1966. <sup>14</sup> С. А. Федотов, Сборн. Сейсмическое районирование СССР, «Наука», 1968. <sup>15</sup> Р. И. Курочкина, И. Л. Нерсесов, Сборн. Землетрясения в СССР в 1967 г., «Наука», 1970. <sup>16</sup> В. И. Бунз, Н. А. Введенская, М. В. Гзовский, Сборн. Сейсмическое районирование СССР, «Наука», 1968, стр. 48. <sup>17</sup> И. М. Гельфанд, Ш. А. Губерман и др., ДАН, 202, № 6 (1972).