

УДК 550.34.012:621.391.19

ГЕОФИЗИКА

В. И. БУНЭ, И. Т. ТУРБОВИЧ, Б. А. БОРИСОВ, В. Г. ГИТИС,  
Г. И. РЕЙСНЕР, Е. Ф. ЮРКОВ

## О МЕТОДЕ ВЫЯВЛЕНИЯ СВЯЗИ МАГНИТУДЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ТЕКТЕНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ РАЙОНА

(Представлено академиком М. А. Садовским 10 V 1973)

Настоящая работа проведена с целью оценки возможности применения метода прогнозирования <sup>(1)</sup> для установления связи сейсмичности с совокупностью различных геолого-геофизических признаков. Исходные геолого-геофизические и сейсмологические данные подготовлены в Институте физики Земли АН СССР на основе ранее опубликованных материалов <sup>(2-5)</sup>; алгоритм метода разработан в Институте проблем передачи информации АН СССР.

Математические положения метода. Задача установления связи между тектоникой района и его сейсмичностью решается методом прогнозирования, который основан на применении одномерных нелинейных преобразований. Прогнозирование максимальной магнитуды землетрясений ( $M_{\max}$ ) осуществляется путем нахождения прогноза в классе функций вида

$$M_{\max} = f(x_1, x_2, \dots, x_i) = Z \left( \sum_{i=1}^i \varphi_i(x_i) \right), \quad (1)$$

где  $\{x_i\}$  — параметры (геологические характеристики),  $Z$  и  $\varphi_i$  — искомые одномерные монотонно возрастающие нелинейные функции;  $i$  — номер параметра.

Вид зависимости функции  $\varphi_i$  от  $x_i$  говорит о характере влияния геологического параметра  $x_i$  на величину  $M_{\max}$  в предположении неизменности остальных факторов. Введение в формулу прогноза (1) нелинейной монотонной функции  $Z$  позволяет получить прогноз величины  $M_{\max}$  в виде более сложной функции.

Только монотонные функции  $\varphi_i$  и  $Z$  в формуле прогноза (1) имеют физический смысл. Это ограничение резко уменьшает число степеней свободы алгоритма, что позволяет при меньшем объеме статистических данных получить более достоверные результаты.

Алгоритм нахождения функций  $\varphi_i$  и  $Z$  основан на аппроксимации случайной величины  $M$  (в данном случае магнитуды) функцией  $f(x_1, x_2, \dots, x_i)$ . В соответствии с методом наименьших квадратов неизвестные функции  $\varphi_i$  и  $Z$  могут быть найдены из условия минимума взвешенной среднеквадратичной ошибки аппроксимации:

$$E\{M-f\}^2 = \int \int_M \left\{ M - Z \left[ \sum_{i=1}^i \varphi_i(x_i) \right] \right\}^2 S(M, X) P(M, X) dM dx, \quad (2)$$

где  $E$  — знак математического ожидания,  $X$  — вектор параметров с компонентами  $x_1, x_2, \dots, x_i$ ,  $S(M, X)$  — весовой множитель,  $P(M, X)$  — совместная плотность вероятности величин  $M, X$ .

Решение этой вариационной задачи градиентным методом приводит к рекуррентному алгоритму нахождения функций  $\varphi_i$  и  $Z$  (6):

$$\begin{aligned} Z^{(n+1)}(y) &= Z^{(n)}(y) + \gamma^{(n)} P^{(n)}(y) E\{(M^{(n)} - Z^{(n)}) S^{(n)} / y\}, \\ \varphi_i^{(n+1)}(x_i) &= \varphi_i^{(n)}(x_i) + \gamma^{(n)} P^{(n)}(x_i) E\{g^{(n)} S^{(n)} / x_i\}, \\ g &= [M - Z(y)] \frac{\partial Z}{\partial y}, \quad y = \sum_{i=1}^I \varphi_i(x_i), \quad i=1, 2, \dots, I. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $P(x_i)$  и  $P(y)$  — одномерные плотности вероятностей,  $E\{(M - Z)S/y\}$ ,  $E\{gS/x_i\}$  — условные математические ожидания величин  $(M - Z)$  и  $g$  с ве-

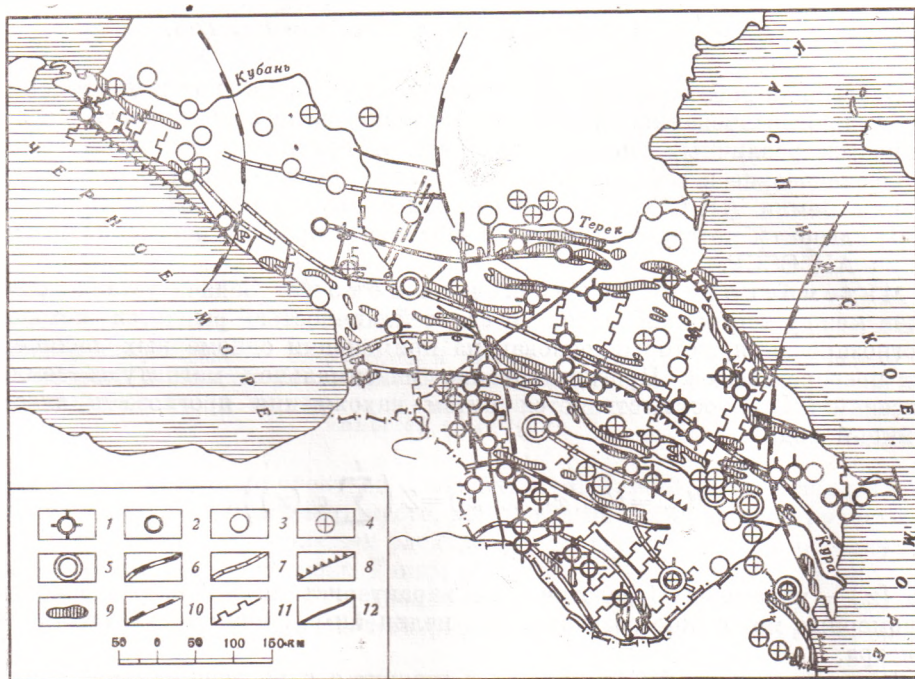


Рис. 1. Схема расположения экспериментального материала. 1—3 — категории ячеек, 4 — ячейки всех категорий, в пределах которых происходили землетрясения с магнитудой, соответствующей экспертной оценке; 5 — ячейки всех категорий, для которых прогноз  $M_{\max}$  не соответствует экспертной оценке; 6 — зоны активных в новейшее время глубинных разломов; 7 — зоны глубинных разломов, новейшая активность которых не установлена; 8 — зоны контрастных сочленений; 9 — зоны высоких значений градиента скорости новейших тектонических движений; 10 — глубинные флексуры, ограничивающие активные в новейшее время поперечные поднятия первого порядка; 11 — границы активных в новейшее время поперечных поднятий (ступеней) более высокого порядка; 12 — активные в новейшее время разломы, в том числе связанные с вулканизмом

сом  $S$ , каждая из этих величин зависит от одного параметра;  $\gamma^{(n)}$  — коэффициент, зависящий от алгоритма градиентного спуска.

Вычислительный алгоритм составлен для ЭВМ «БЭСМ-6» на языке Алгол-60.

Подготовка исходного геолого-геофизического материала. В качестве предмета геологического описания выбраны участки территории (ячейки), имеющие вид кругов с радиусом 14 км. Центры кругов находятся на пересечении параллелей (через 10') и меридианов (через 15'). Размеры ячеек соизмеримы с размерами проекций очагов наиболее сильных землетрясений Кавказа ( $M \approx 6$ ) на поверхность Земли. На территории Кавказа размещается около 1200 таких ячеек. Геологическое

описание не ограничено информацией, относящейся только к площади выбранной ячейки. Характеристики структур, размеры которых превышают размеры ячейки, также включены в геологическое описание. Использованы данные о землетрясениях на территории Кавказа с очагами в пределах земной коры.

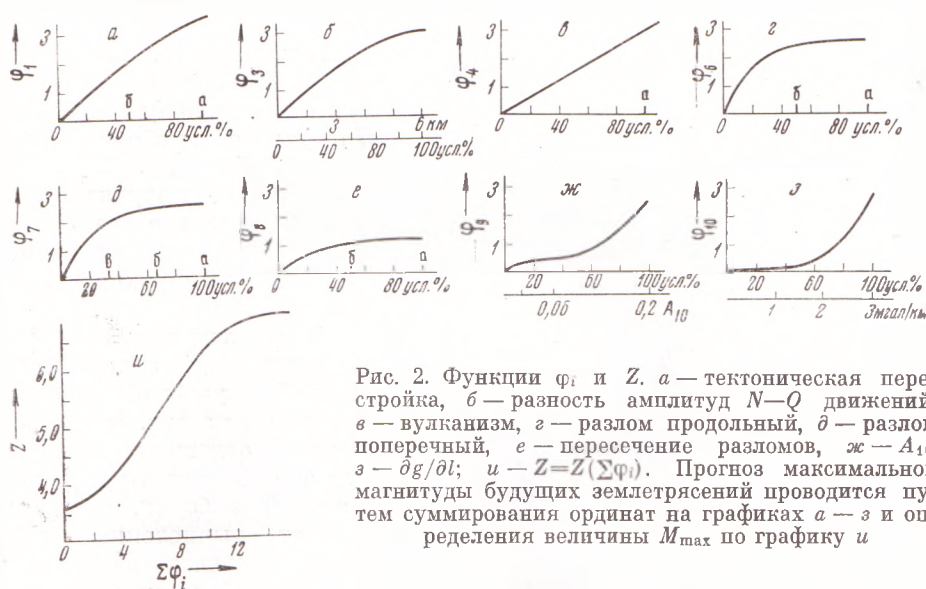


Рис. 2. Функции  $\phi_i$  и  $Z$ . а — тектоническая перестройка, б — разность амплитуд  $N-Q$  движений, в — вулканизм, г — разлом продольный, д — разлом поперечный, е — пересечение разломов, ж —  $A_{10}$ , з —  $\delta g/\delta l$ ; и —  $Z = Z(\Sigma \phi_i)$ . Прогноз максимальной магнитуды будущих землетрясений проводится путем суммирования ординат на графиках а — з и определения величины  $M_{\max}$  по графику и

В зависимости от максимальной магнитуды землетрясений ячейки разделены на три категории. Для решения задачи выбраны 94 ячейки, около 8% территории Кавказа (рис. 1).

В первую (1) категорию ( $M_{\max} = 6^{1/2} \pm 1/2$ ) вошли участки, в пределах которых уже произошли землетрясения с  $M \geq 6$ , а также некоторые ячейки, в которых зарегистрированы землетрясения с  $M \geq 5$ , располагающиеся в зонах пересечения глубинных разломов, активных в новейшее время, ограничивающих крупные (30–50 км) блоки земной коры.

Во вторую (2) категорию ( $M_{\max} = 5^{1/4} \pm 1/2$ ) вошли ячейки, расположенные в зонах продольных или поперечных глубинных разломов, в зонах контрастного сочленения блоков с разной историей развития на новейшем этапе и в зонах высоких значений градиента скорости новейших вертикальных тектонических движений.

В третью (3) категорию ( $M_{\max} = 4 \pm 1/2$ ) вошли ячейки, расположенные вблизи от населенных пунктов, где в течение нескольких веков сильные и средние землетрясения не отмечались.

Отнесение различных районов к той или иной категории по  $M_{\max}$  производилось экспертами с разной степенью уверенности. Поэтому вводился весовой множитель  $S$ , зависящий от того, происходили ли на площади данной ячейки землетрясения соответствующего класса, и от точности определения их географического положения. Введение этого множителя дает возможность получить более достоверные результаты при прогнозировании (менее зависимые от способа выбора экспертных оценок).

Для описания привлекались следующие характеристики: перестройка тектонического режима в новейшее время; амплитуда новейших вертикальных движений; горизонтальный градиент скорости новейших движений; проявления неоген-четвертичного вулканизма; геотектоническая неоднородность (попадание в пределы ячейки двух и более знаков на карте историко-тектонического районирования); наличие и протяженность продольных разломов; наличие поперечных разломов разных порядков; узлы пересечения продольных и поперечных разломов; сейсмическая активность



$A_{40}$ ; горизонтальный градиент изостатической аномалии силы тяжести.

На основании предшествующих сейсмо-геологических исследований можно предполагать, что значения  $M_{\max}$  на Кавказе монотонно связаны с выбранными геолого-геофизическими характеристиками <sup>(2-4)</sup>.

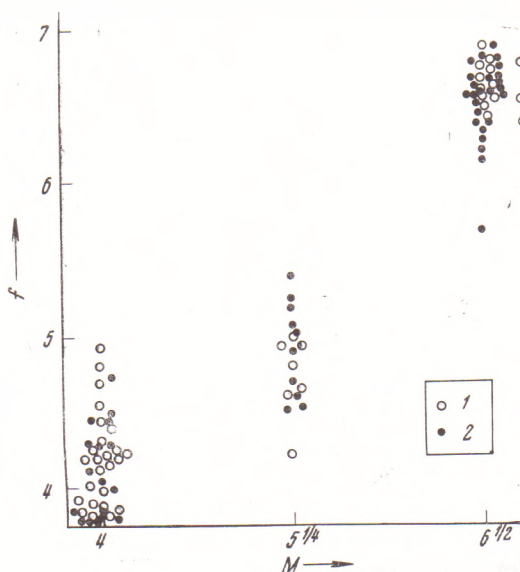


Рис. 3. Сопоставление экспертных оценок и прогнозных значений  $M_{\max}$  для экспериментального материала:  $M$  — экспертные оценки,  $f=Z(\sum \Phi_i)$  — прогноз. 1 — учебный, 2 — контрольный материал

Экспериментальный материал был разбит на учебную и контрольную выборки. По учебной выборке были найдены функции  $\Phi_i$  и  $Z$ , позволяющие получить прогноз максимально возможной магнитуды землетрясений, графики этих функций показаны на рис. 2.

Результаты прогноза, полученные на материале контрольной и учебной выборок, приведены на рис. 3; по оси абсцисс отложены экспертные оценки магнитуд землетрясений выборки, а по оси ординат — вычисленные значения прогноза  $M_{\max}$ . Для контрольной и учебной выборки соответствие между экспертными оценками и прогнозом в целом удовлетворительное. При разных

способах разбиения выборки на учебную и контрольную получены аналогичные результаты прогноза. Это позволяет сделать вывод, что с помощью найденных функций можно выделить наиболее сейсмичные районы. Для некоторых ячеек, в основном, 2 категории, имеются расхождения между экспертными оценками и прогнозом  $M_{\max}$ . Причины этих расхождений могут быть обусловлены как неточностью экспертных оценок магнитуд, так и неполнотой и даже ошибками геологического описания.

Основным результатом проведенной работы является установление связи между максимально возможной магнитудой землетрясений Кавказа и совокупностью геологических характеристик. Этот результат использован для классификации всех ячеек территории Кавказа по магнитуде ожидаемых землетрясений.

Методику подготовки экспериментального материала и разработанный алгоритм можно применить для решения подобных задач в других, достаточно хорошо изученных регионах.

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

Поступило  
18 IV 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. Г. Гитис, И. Т. Турбович, Е. Ф. Юрков, В сборн. Проблемы избыточности в информационных системах, ч. 1, Л., 1972, стр. 241. <sup>2</sup> В. В. Белоусов, А. А. Сорский, В. И. Бунэ, Сейсмоструктурная карта Европы, М., 1960. <sup>3</sup> И. В. Кириллова, Е. Н. Люстих и др., Анализ геотектонического развития и сейсмичности Кавказа, М., 1960. <sup>4</sup> В. И. Бунэ, И. В. Кириллова и др., В сборн. Сейсмические исследования для строительства, М., 1971, стр. 3. <sup>5</sup> В. И. Бунэ, М. Е. Артемьев, Н. Ш. Камбаров, ДАН, 201, № 6, 1305 (1971). <sup>6</sup> Е. Ф. Юрков, Применение нелинейных одномерных преобразований к задаче аппроксимации функции по ее значениям в случайно выбранных точках, Деп. 1973, ВИНТИ, № 5370—73.