

16. Sobolev G.A., Chelidze T.L., Zavyalov A.D., Slavina L.B., Nicoladze V.E. Maps of expected earthquakes based on combination of parameters// Tectonophysics. 1991. Vol.193, N4. P.255-265.
17. Наркунская Р.С., Шнирман М.Г. Об одном алгоритме прогноза землетрясений // Компьютерный анализ геофизических полей. М.:Наука, 1990. С.27-37.(Вычисл. сейсмология; вып.23).
18. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ в нормированных пространствах. М.: Госиздат Ф.М. Лит., 1959. 683с.
19. Булавский В.А., Звягина Р.А., Яковлева М.А. Численные методы линейного программирования. М.: Наука, 1977. 367с.

УДК 550.31

*И.А. Воробьева, Т.А. Левшина*

**ПРОГНОЗ ПОВТОРНОГО СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ  
ПО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ АФТЕРШОКОВ**

*I.A.Vorobieva, T.A. Levshina*

**PREDICTION OF THE REOCCURRENCE STRONG SHOCK  
USING THE AFTERSHOCK SEQUENCE**

The problem is formulated to recognize strongest earthquakes aftershock sequences which can contain strong aftershocks. The recognition is based on seismic activity data in the focal zone of a strong shock. Functions characterizing the seismic process were found using California earthquake catalog. The material for the recognition was represented by 17 aftershock sequences. The application of the preliminary solution rule resulted in 1 error. The algorithm was tested on independent data of 8 seismoactive regions of the world without additional data fitting. The results of the test can be considered as satisfactory, because errors do not exceed 15%. The statistical significance of the obtained result is 96%. Two successful advance predictions were done.

Введение. Многие сильные землетрясения возникают "парами", т.е. близко друг к другу в пространстве и времени. Здесь исследуется возможность прогноза второго сильного землетрясения в паре. Оно может быть афтершоком первого в обычном смысле слова или новым основным толчком. Проблема возникает после каждого сильного землетрясения в населенном районе и рассматривалась в ряде работ [1-7].

Бот [1] предложил для магнитуды  $M_1$  сильнейшего афтершока соотношение  $M_1 \approx M - 1,2$ , где  $M$  - магнитуда основного толчка. Однако ста-

тистический анализ [2,3] показал, что это соотношение может быть выведено как артефакт из теории экстремальных значений для событий, подчиняющихся обычному закону повторяемости, усеченному справа магнитудой  $M$ .

В работе [4] введена количественная оценка вероятности появления сильного толчка с магнитудой  $M_1 \in (M, M-\Delta)$  в любом заданном интервале времени. К сожалению, оценки основаны на пуассоновской модели, которая учитывает лишь усредненное распределение афтершоков по магнитуде и закон Омори по времени. Поэтому в указанном прогнозе не используются конкретные особенности этого потока: прогноз зависит лишь от времени, прошедшего после основного события.

Некоторые надежды на прогноз времени сильных афтершоков появились в связи с работой [5] (см. также [6,7]) – перед многими сильными афтершоками было замечено относительное затишье потока афтершоков. Аналогичные явления наблюдаются и для основных толчков. Для прогноза это явление использовать пока не удалось, так как оно выражено недостаточно сильно.

В настоящей работе делается попытка применить к прогнозу повторных сильных толчков подход, разработанный в [8-10] для прогноза одиночных сильных землетрясений по потоку основных толчков. Согласно [8-10] сильные землетрясения предваряются признаками приближения неустойчивости. Это проявляется в повышении интенсивности потока основных толчков и его неравномерности во времени и в пространстве. После сглаживания и осреднения эти явления становятся подобными в самых разных условиях. Мы исследуем гипотезу: аналогичные явления в потоке афтершоков предваряют повторное сильное землетрясение.

Задача состоит в следующем: дана последовательность афтершоков в первые  $N$  дней после сильного землетрясения: требуется определить возникнет ли парное к нему сильное землетрясение, или оно является одиночным.

Следуя опыту [8-10], будем рассматривать сходную группу предвестников, каждый из которых выражен недостаточно сильно.

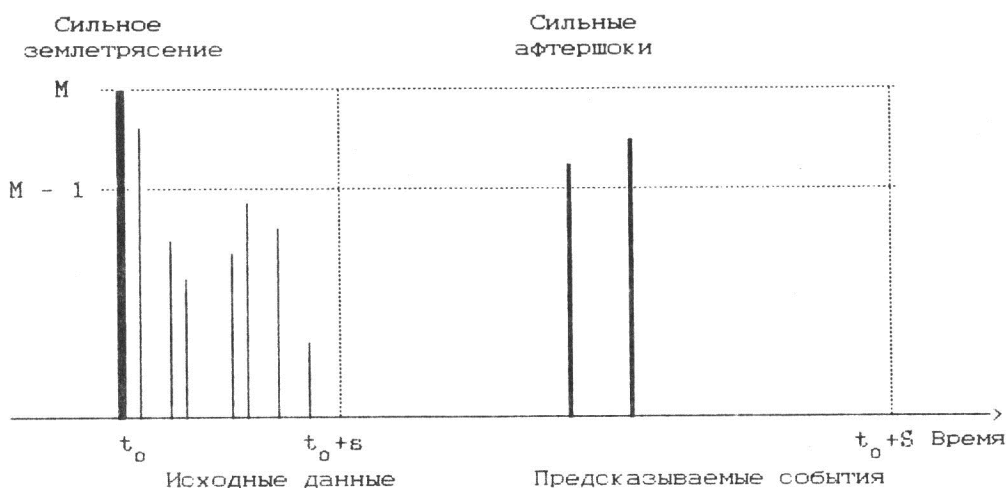
Кроме того, как и в [8-10], примем (и испытаем) гипотезу о частичном подобии прогностических явлений, т.е. построим алгоритм прогноза так, чтобы его можно было использовать в разных условиях без дополнительной адаптации. Без этой гипотезы решение задачи трудно проверить.

**Постановка задачи.** Пусть  $t_0$  – момент сильного землетрясения с магнитудой  $M_0$ . Дана начальная часть последовательности его афтер-

шоков ( $t_i, M_i$ ) в интервале времени ( $t_0, t_0+s$ ). Требуется предсказать, произойдет ли повторное сильное землетрясение с магнитудой  $M_{ав} \geq M - m_a$  за период времени ( $t_0 + s, t_0 + S$ ) в круге радиуса  $R(M)$  от эпицентра первого толчка (рис. 1).

В обычном определении эта пара сильных землетрясений может быть основным толчком и афтершоком или форшоком и основным толчком или двумя основными толчками.

Наша задача, как и прогноз сильных основных толчков в [8-10], ставится в терминах распознавания: даны примеры афтершоковых последовательностей ( $t_i, M_i$ ) для первых сильных землетрясений в паре (тип А) и для одиночных сильных землетрясений (тип В); необходимо найти "решающее правило", позволяющее распознавать к какому классу относится заданная последовательность ( $t_i, M_i$ ).



Р и с. 1. Постановка задачи: данные для прогноза и прогнозируемые события

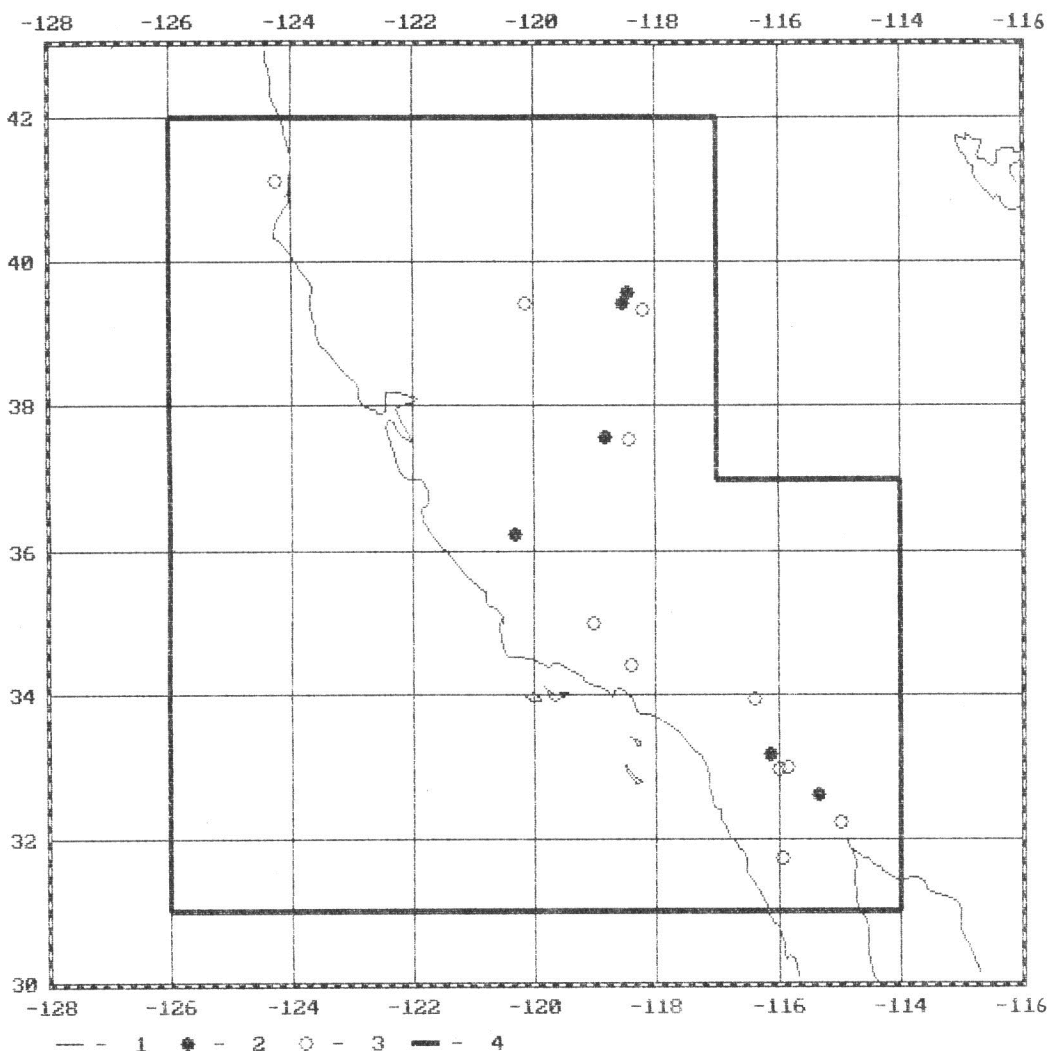
**Нормализация параметров.** Для решения поставленной задачи необходимо сделать "сравнимыми" афтершоковые последовательности землетрясений разной силы. Другими словами, нужно нормализовать параметры алгоритма по отношению к магнитуде рассматриваемого сильного землетрясения.

Эта цель достигается двумя способами: во-первых - радиус  $R(M) = c \cdot R_0(M)$  принят пропорциональным линейному размеру афтершоковой зоны  $R_0(M)$  [11]

$$R_0(M) = 0,02 \cdot 10^{0,5M} [\text{км}];$$

во-вторых, нижний порог для магнитуды афтершоков выбран зависящим от магнитуды рассматриваемого сильного землетрясения:  $M_1 \geq M_0 - m$ , где  $m$  - константа.

Исходные данные. Поиск решающего правила ("обучение") проводился на примере сильных землетрясений Калифорнии. Рассматриваемая территория (рис. 2) - это многоугольник с координатами вершин  $(31^\circ N, 114^\circ W)$ ,  $(37^\circ N, 114^\circ W)$ ,  $(37^\circ N, 117^\circ W)$ ,  $(42^\circ N, 117^\circ W)$ ,  $(42^\circ N, 126^\circ W)$ ,  $(31^\circ N, 126^\circ W)$ . Был использован каталог NEIS [12] за период с 1942 г. по 1989 г. Эти данные были дополнены землетрясениями с

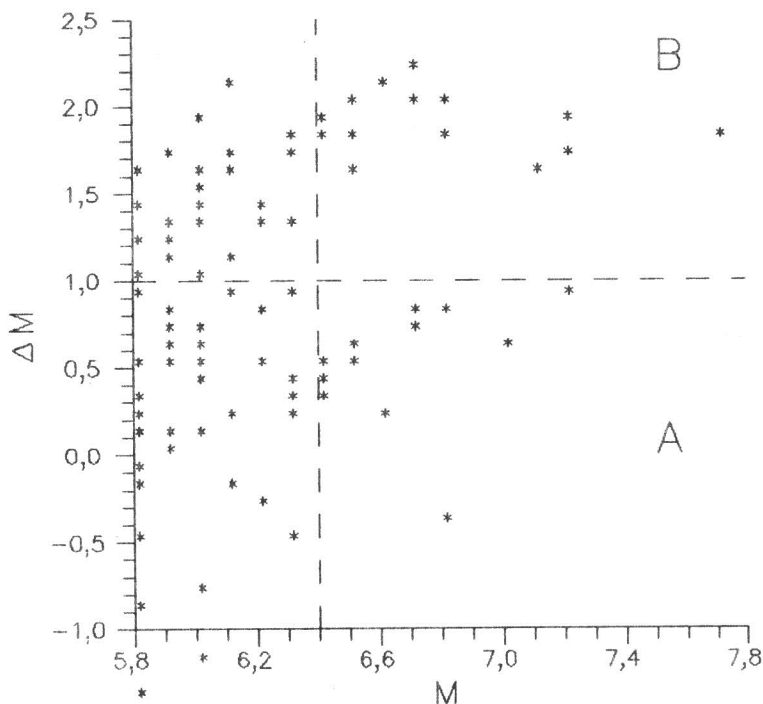


Р и с. 2. Исходные данные для разработки алгоритма

1 - береговая линия; 2,3 - афтершоковые последовательности типа А и типа В; 4 - границы территории

магнитудой  $M \geq 3,4$  из каталогов Беркли [13] для Северной Калифорнии и СГТ [14] для Южной Калифорнии. Мы использовали максимальное из приведенных в каталоге значений магнитуды.

Определение повторного сильного землетрясения. Для формализации понятия "повторное сильное землетрясение" были рассмотрены все землетрясения с магнитудой  $M \geq 5,8$  и построена диаграмма Бота: зависимость  $\Delta M$  - разности магнитуды основного толчка и сильнейшего афтершока (или повторного толчка) от  $M$  - магнитуды основного толчка (рис.3). Хорошо видно, что для более слабых землетрясений, у которых афтершоковые зоны обычно определяются менее уверенно, значения



Р и с. 3. Распределение разности магнитуды основного толчка и его сильнейшего афтершока в зависимости от магнитуды основного толчка

Пунктир - пороги для сильного землетрясения и сильного афтершока

$\Delta M$  равномерно распределены в интервале от 0 до 2,5, тогда как для более сильных ситуация меняется: здесь величины  $\Delta M$  хорошо разделяются на две группы: меньше 0,9, либо больше 1,5. Таким образом, в качестве сильных естественно выбрать те толчки, которые отличаются от основного толчка не более чем на единицу по магнитуде, а в ка-

честве порогового значения магнитуды сильных основных толчков было принято  $M_0 = 6,4$ .

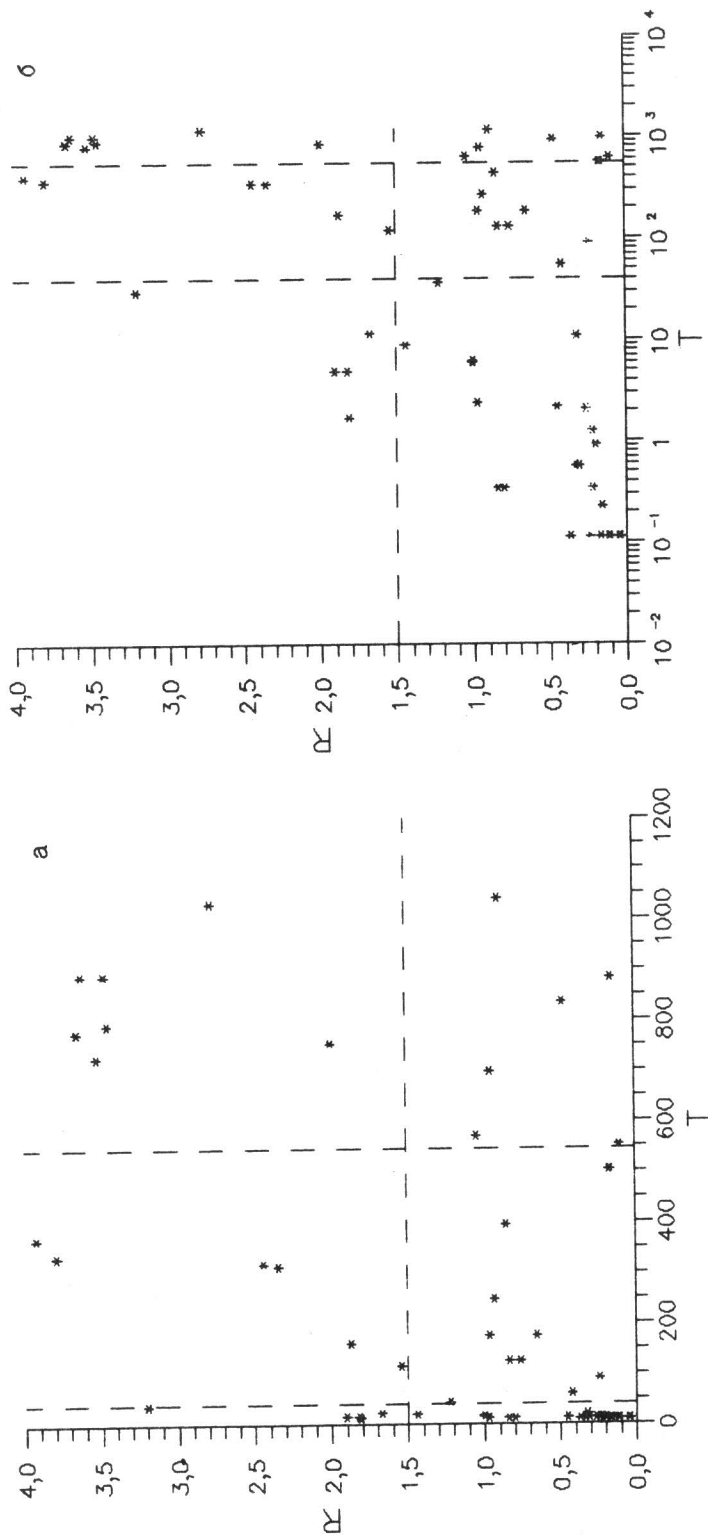
Чтобы выбрать пространственно-временные параметры  $(c, s, S)$  было рассмотрено распределение всех сильных афтершоков (у одного сильного землетрясения их может быть несколько) по расстоянию  $r_n$  и времени  $t$  от основного толчка (рис.4). Расстояние было нормировано по формуле:  $r_n = r/R_0$ . Исходя из этого распределения, было определено пороговое значение для расстояния -  $1,5R_0$ , и два порога для времени - 40 дней и 1,5 года (верхний порог по времени определялся из распределения на рис.4, а - с линейной шкалой по времени; логарифмическая шкала использовалась для определения нижнего порога (см-рис.4,б)). Таким образом, для Калифорнии были выбраны следующие значения параметров:

$$m=3, m_a = 1, c=1,5, s=40 \text{ дней}, S=1,5 \text{ года}.$$

Выбор объектов обучения. За период с 1942 г. по 1989 г. в Калифорнии произошло 26 сильных землетрясений с магнитудой  $M \geq 6,4$ . Для обучения были выбраны только те землетрясения, которые имеют не менее 10 афтершоков за первые 40 дней; если в течение 40 дней в круге с радиусом  $R$  произошло несколько таких землетрясений рассматривался сильнейший толчок, либо более поздний, если магнитуда была одинаковой. В результате было отобрано 17 последовательностей: 6 - имеющих сильный повторный толчок (тип А) и 11 - без него (тип В) (табл.1). Среди объектов типа А два землетрясения являются форшоками.

Иногда возникают группы из нескольких сильных землетрясений и тогда можно рассматривать в качестве объектов сами повторные толчки. В 1954 г. в Калифорнии возникла группа из четырех сильных землетрясений и мы будем анализировать первое, второе и третье (четвертое землетрясение произошло в один день с третьим и поэтому исключено из рассмотрения). Таким образом, возникает "цепочка" из нескольких сильных землетрясений, каждое из которых может изучаться независимо. Успешное распознавание таких землетрясений может рассматриваться как подтверждение гипотезы подобия.

Качественные характеристики афтершоковых последовательностей. Первая задача - найти для потока афтершоков интегральные характеристики, на которых строится распознавание. Для этого сравним две характеристики:  $N$  - число афтершоков и  $\Sigma$  - суммарную площадь разрывов в очагах афтершоков (рис.5). Видно, что для последовательностей типа А характерны более высокие значения этих параметров, чем



Р и с. 4. Распределение расстояния и времени сильных афтершоков от основного толчка в линейной (а) и логарифмической шкале времени (б)

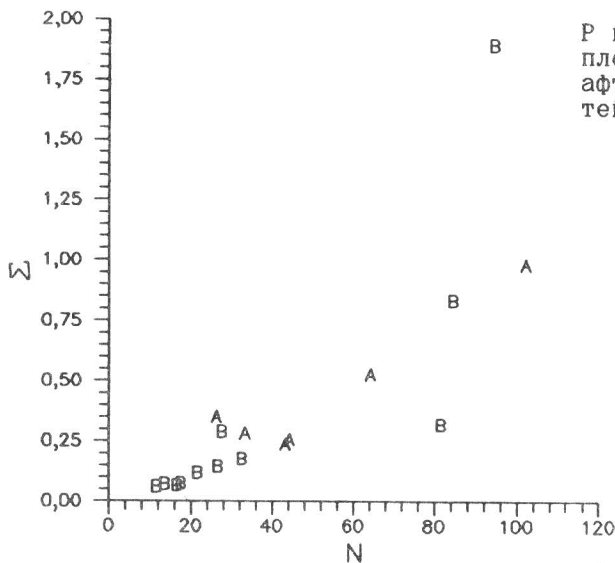
Пунктир - порого для расстояния и времени

Параметры основного толчка						Параметры сильнейшего повторного толчка		
Дата	Координаты		M	R <sub>0</sub> , км	N40	ΔM	ΔR, норм	ΔT, дни
	φN, градус	λW, градус						
Тип А								
06.07.1954	39,42	118,53	6,8	50	66	-0,4	0,61	162
24.08.1954	39,58	118,45	6,8	50	36	-0,4	0,72	114
09.04.1968	33,18	116,12	6,4	31	50	0,3	0,81	384
15.10.1979	32,63	115,33	7,0	63	28	0,6	0,89	237
25.05.1980	37,56	118,82	6,7	44	109	0,8	0,13	492
02.05.1983	36,21	120,31	6,7	44	51	0,7	0,20	80
Тип В								
21.10.1942	32,97	116,00	6,5	35	30	2,0	0,56	239
04.12.1948	33,93	116,38	6,5	35	21	2,4	0,12	404
21.07.1952	35,00	119,02	7,7	141	39	1,8	0,00	540
16.12.1954	39,32	118,20	7,2	79	28	1,7	0,19	340
09.02.1956	31,75	115,92	6,8	50	103	1,8	0,23	90
12.09.1966	39,42	120,15	6,4	31	27	1,9	0,58	88
09.02.1971	34,40	118,40	6,5	35	154	1,6	0,24	44
09.06.1980	32,22	114,98	6,4	31	19	2,9	1,18	484
08.11.1980	41,11	124,25	7,2	79	13	1,9	1,16	455
21.07.1986	37,53	118,44	6,5	35	99	2,3	0,34	58
24.11.1987	33,01	115,84	6,7	44	20	2,0	0,41	64
Объекты, исключенные как парные (все типа В)								
21.07.1952	35,00	119,00	6,4	31	115	0,5	0,06	540
16.12.1954	39,50	118,00	7,1	70	34	1,6	0,16	340
15.02.1956	31,50	115,50	6,4	31	48	1,4	0,00	192
25.05.1980	37,60	118,84	6,5	35	224	0,6	0,12	492
24.11.1987	33,08	115,77	6,5	35	44	1,8	0,58	65
Объекты, исключенные из-за недостатка афтершоков								
24.01.1951	32,98	115,73	6,4	31	6	1,9	1,06	315
25.11.1954	40,27	125,63	6,8	50	1	3,0	1,09	531
21.12.1954	40,78	123,87	6,6	39	2	2,5	1,20	251
26.11.1976	41,28	125,70	6,8	50	7	2,1	1,39	164



Р и с. 5. Число и суммарная площадь очагов афтершоков для афтершоковых последовательностей Калифорнии

А - тип А; В - тип В



для последовательностей типа В. Иными словами, поток афтершоков интенсивнее, если готовится второе сильное землетрясение. Однако этих характеристик недостаточно для решения задачи, поскольку разброс значений слишком велик. Это вынуждает нас искать более широкий комплекс характеристик и применять для решения задачи методы распознавания образов.

**Выбор функционалов.** Известные алгоритмы прогноза сильных основных толчков, такие как предвестник В [8], КН [9] и М8 [10], основаны на поиске аномальных вариаций сейсмичности, исходя из общих признаков неустойчивости нелинейных систем. Эти свойства проявляются в основном в повышении активности потока землетрясений, а также в усилении неустойчивости его поведения в пространстве и времени перед сильным землетрясением. Мы предположили, что для афтершоков в той или иной форме должны проявиться такие же закономерности. Для решения нашей задачи необходимо найти функционалы, отражающие и формализующие эти закономерности. Были выбраны следующие функционалы

*Повышение сейсмической активности:*

1.  $N$  - число афтершоков с  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t_0 + s_1, t_0 + s_2)$ .
2.  $S_n$  - число афтершоков с  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t_0 + s_1, t_0 + s_2)$  с весом  $10^{\binom{M_a - m}{a}}$ .
3.  $N_{for}$  - число землетрясений с  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t_0 - s_1, t_0 - s_2)$  перед сильным землетрясением, в радиусе  $1,5R$ .

*Неустойчивое поведение в пространстве и времени:*

4.  $Vn$  - вариация числа афтершоков с магнитудой  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t+s_1, t+s_2)$  с шагом  $\Delta t$ ,

$$Vn = \sum_{s_1}^{s_2} |n_{i+1} - n_i|,$$

где  $n_i$  - число афтершоков за период  $\Delta t$ .

5.  $Vm$  - вариация магнитуды афтершоков с магнитудой  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t_0+s_1, t_0+s_2)$ ,

$$Vm = \sum_{s_1}^2 |m_{i+1} - m_i|,$$

где  $m$  - магнитуда  $i$ -го афтершока.

6.  $Vmed$  - вариация средней магнитуды афтершоков с магнитудой  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t_0+s_1, t_0+s_2)$  с шагом  $\Delta t$ .

$$Vmed = \sum_{s_1}^{s_2} |\mu_{i+1} - \mu_i|,$$

где  $\mu_i$  - среднее арифметическое магнитуды афтершоков за период  $\Delta t$ .

7.  $Rz$  - аномальное возрастание числа афтершоков во времени с магнитудой  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t_0+s_1, t_0+s_2)$ . Рассматривается число афтершоков в скользящем окне  $\tau$  с шагом  $\Delta t$ , и суммируются все возрастания этой функции; полученное значение нормируется на общее число афтершоков за этот период.

8.  $Rmax$  - максимальное расстояние между основным толчком и афтершоками с магнитудой  $M_a \geq M - m_1$  за время  $(t_0, t_0+s)$ , нормированное на радиус афтершоковой зоны  $R$ .

Заметим, что все параметры алгоритма и функций нормированы относительно магнитуды рассматриваемого сильного землетрясения. Это позволяет, во-первых, сравнивать между собой различные сильные землетрясения одного региона, и во-вторых переходить к регионам с различным уровнем сейсмичности, не изменяя формального определения функций. Численные параметры функций, определенные на материале Калифорнии, приведены в табл. 2.

Дискретизация параметров. Значения каждой вычисленной функции были разбиты на две части - "большие" и "малые" (для  $Vmed$  значения разбиты на три части: "большие", "средние" и "малые"). Пороги выбирались так, чтобы в каждый интервал значений попадало одинаковое количество объектов. Для объектов типа А характерны большие значения функций  $N$ ,  $Vm$ ,  $Sn$ ,  $Vmed$ ,  $Rz$  и малые значения функций  $Vn$ ,  $Rmax$ ,  $Nfor$ . Такое распределение значений функций отражает более высокую

Название функции	Зачения параметров				
	$m_1$	$s_1$	$s_2$	$\Delta t$	$\tau$
N	3	1 ч	10 дней	-	-
Sn	2	1 ч	10 дней	-	-
Vn	3	1 ч	40 дней	1 день	-
Vm	3	1 ч	40 дней	1 день	-
Vmed	2	1 ч	40 дней	-	-
Rz	3	10 дней	40 дней	1 день	10 дней
Rmax	2	-	2 дня	-	-
Nfor	1	5 лет	3 мес	-	-

интенсивность и неустойчивость потока афтершоков для объектов типа А. Последнее вполне согласуется с выводами работ [5,7], в которых отмечено появление неустойчивости во временном ходе афтершокового процесса перед возникновением сильного афтершока.

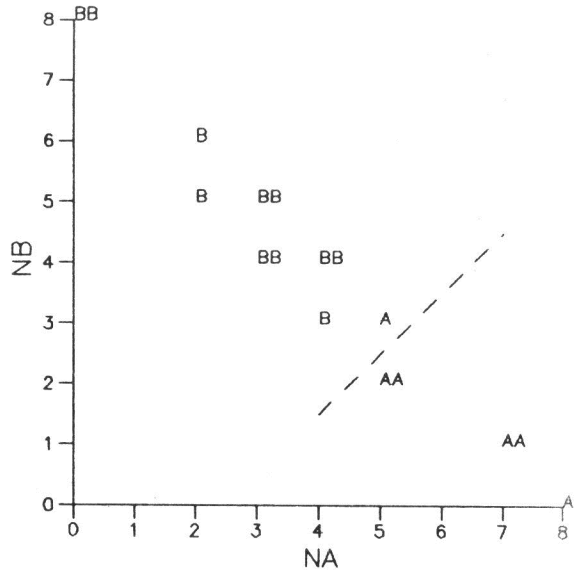
Интересно отметить, что все объекты, исключенные из обучения из-за недостаточного для корректного вычисления функций числа афтершоков (см.табл.1), являются землетрясениями типа В, т.е. не имеют повторных сильных толчков. Этот факт также подтверждает гипотезу о том, что пониженное число афтершоков процесса указывает на то, что следующего сильного толчка не последует. Однако использовать это наблюдение в качестве формального правила кажется ненадежным. Кроме того, малое число афтершоков может быть следствием плохой регистрации землетрясений.

**Критерий объявления тревоги.** Определим этот критерий в соответствии с алгоритмом "голосование по Хемингу" [15]. Для каждой из 17 последовательностей афтершоков рассмотрим значения 8 определенных выше функций и посчитаем, сколько из этих значений характерно для типа А и сколько для типа В. Функция Vmed в подсчет не включалась, если она принимала среднее значение. Прогноз, как обычно в распознавании, будет основан на разности  $n_A - n_B$  ("голосовании"). Значения  $n_A$  и  $n_B$  даны в табл. 3 и на рис.6. Было сформулировано следующее.

**Р е ш а ю щ е е п р а в и л о:** Если  $n_1 - n_2 = \Delta \geq 3$ , то следует ожидать сильный афтершок с магнитудой  $M_{3a}$  в радиусе R в течение 1,5 лет после основного толчка; если  $n_1 - n_2 = \Delta < 3$ , то за этот период времени сильный афтершок не произойдет.

Р и с. 6. Результаты распознавания: голосование для афтершоковых последовательностей Калифорнии

А - тип А; В - тип В;  
пунктир - порог голосования



Применяя это правило к афтершоковым последовательностям сильных землетрясений Калифорнии мы получим 16 правильных прогнозов и один пропуск цели (см.табл.3).

Проверка устойчивости решающего правила. Это правило получено ретроспективным подбором ("подгонкой") и его необходимо проверить на независимом материале. Для начала оценим его устойчивость к многочисленным решениям, принятым в процессе подбора.

Были проведены следующие контрольные эксперименты:

1. Каждая из описанных выше функций исключалась по очереди при подсчете  $\Delta = n_1 - n_2$ . Тогда, при  $\Delta=2$ , при отсутствии функций  $N$ ,  $V_n$ ,  $V_m$ ,  $S_n$ , результаты оставались неизменными, а исключение функций  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $N_{for}$  приводило к появлению одной ложной тревоги, а именно: неправильно распознавалось землетрясение 21 июля 1986 г. Исключение функции  $V_{med}$  приводит к улучшению результата: в этом случае все 17 землетрясений распознаются правильно. Мы полагаем, что снижение порога  $\Delta$  правомерно, так как число функций, используемых для распознавания, уменьшалось.

2. Варьировался верхний порог времени ожидания сильного афтершока  $S$ . При  $S=600$  дней объекты для распознавания не изменились и, следовательно, результат сохранился. При  $S=400$  дней землетрясение 25 мая 1980 г. становится объектом типа В и является ошибкой типа ложной тревоги. Однако в этом случае для данного объекта  $\Delta M=1,1$ , что скорее характерно для объектов типа А, так как минимальное значение  $\Delta M$  для объектов типа В равно 1,6.

Объект		Значения функций								Голосование
Дата	M	N	Vn	Vm	Sn	Vmed	Rz1	Rmax	Nfor	$n_A:n_B$
Тип А										
06.07.1954	6,8	Λ	Λ	В	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	7:1
24.08.1954	6,8	Λ	Λ	В	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	7:1
09.04.1968	6,4	Λ	Λ	Λ	Λ	-	Λ	В	В	5:2
15.10.1979	7,0	Λ	Λ	Λ	Λ	В	В	В	Λ	5:3
25.05.1980	6,7	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	Λ	8:0
02.05.1983	6,7	Λ	В	Λ	Λ	-	В	Λ	Λ	5:2
Тип В										
21.10.1942	6,5	В	В	В	Λ	-	Λ	В	В	2:5
24.12.1948	6,5	В	В	Λ	В	В	Λ	Λ	В	3:5
21.07.1952	7,7	В	В	Λ	В	Λ	Λ	В	Λ	4:4
16.12.1954	7,2	В	В	В	В	В	Λ	Λ	В	2:6
09.02.1956	6,8	Λ	В	В	Λ	Λ	Λ	В	В	4:4
12.09.1966	6,4	В	В	Λ	В	-	В	Λ	Λ	3:4
09.02.1971	6,5	Λ	Λ	В	В	-	В	В	Λ	3:4
09.06.1980	6,4	В	В	В	В	В	В	В	В	0:8
08.11.1980	7,2	В	В	В	В	В	В	В	В	0:8
21.07.1986	6,5	Λ	Λ	Λ	Λ	-	В	В	В	4:3
24.11.1987	6,7	В	Λ	В	В	В	В	Λ	Λ	3:5

П р и м е ч а н и е: Λ - значения функций, характерные для типа А;  
 В - значения функций, характерные для типа В.

3. Варьировался магнитудной порог  $m_{ас}$  в определении сильного повторного толчка. Изменение этого параметра от 0,9 до 1,6 не меняет типа объектов и, следовательно, не влияет на результат.

4. Варьировалось пороговое значение R в определении сильного повторного толчка и афтершоковой последовательности. При  $R=2R_0$  землетрясение 4 декабря 1948 г. становится объектом типа А, а распознается по-прежнему как объект типа В. Нужно отметить, что у этого землетрясения сильный афтершок находится существенно дальше от основного толчка, чем в остальных 6 случаях и фактически лежит вне афтершокового облака, хотя формально расстояние меньше порогового. При  $R=R_0$  землетрясение 8 ноября 1980 г. исключается из рассмотрения из-за недостаточного количества афтершоков, в связи с этим по-



Объект		Параметры афтершоковой последовательности								Голосование
Дата	M	N40	Ns	b	p	R <sub>0</sub>	ΔM	ΔR	ΔT	n <sub>A</sub> :n <sub>B</sub>
Италия										
Тип А										
06.05.1976	6,1	114	28	0,640	0,689	22	0,1	0,36	131	7:1
15.09.1976	6,0	107	15	0,635	0,473	19	0,7	0,77	366	4:3
Тип В										
28.12.1908	7,0	55	11	0,500	0,553	63	1,9	0,00	185	4:3
13.01.1915	6,9	15	2	0,544	0,116	56	2,1	0,49	45	3:5
15.01.1968	6,4	71	9	0,427	0,583	31	1,8	0,89	76	6:2
23.11.1980	6,5	51	10	0,486	0,538	35	1,8	0,06	53	4:3
24.05.1979	6,1	16	5	0,389	0,428	22	1,6	0,35	50	5:3
Средняя Азия										
Тип А										
13.02.1983	6,72	26	17	0,638	0,512	45	0,67	0,24	51	5:2
Тип В										
16.10.1963	6,5	14	1	0,700	0,032	35	2,5	1,02	391	2:6
11.02.1969	6,5	13	4	0,720	0,113	35	1,9	0,94	112	3:4
11.08.1974	7,3	81	4	0,820	0,076	89	2,3	0,23	414	5:2
01.11.1978	6,8	39	5	0,753	0,123	50	1,8	0,41	437	4:3
16.12.1982	6,5	10	5	0,635	0,192	35	1,23	0,62	52	3:4
23.08.1985	7,2	13	3	0,668	0,106	79	2,3	0,71	157	5:3
24.01.1987	6,4	32	1	0,719	0,030	31	2,2	0,35	365	3:4
Прибайкалье										
Тип В										
28.03.1970	5,5	11	3	1,096	0,087	11	2,17	0,06	52	3:4
15.05.1970	5,6	25	5	0,653	0,067	12	2,27	0,40	375	6:2
Кавказ										
Тип В										
14.05.1970	6,6	31	3	0,713	0,025	39	2,6	0,20	43	4:3
28.07.1976	6,4	12	1	0,692	0,011	31	1,4	1,32	504	1:7
24.11.1976	7,0	21	5	0,643	0,083	63	1,8	0,72	53	2:6
30.10.1983	6,8	10	1	0,572	0,032	50	2,6	0,18	475	3:4
07.12.1988	6,8	27	3	0,747	0,025	50	2,36	0,55	113	3:5

Т а б л и ц а 4 (продолжение)

Объект		Параметры афтершоковой последовательности								Голосо- вание
Дата	М	N40	Ns	b	p	R <sub>0</sub>	ΔM	ΔR	ΔT	n <sub>A</sub> :n <sub>B</sub>
<b>Иберо-Магриб</b>										
Тип А										
10.10.1980	6,5	40	7	0,517	0,493	35	1,0	0,78	58	7:1
Тип В										
26.05.1975	6,7	16	0	1,316	0,000	44	1,8	1,48	204	1:6
<b>Балканы и Малая Азия</b>										
Тип А										
12.08.1953	7,0	69	17	0,602	0,666	63	0,9	0,00	70	6:1
15.04.1979	7,3	38	13	0,552	0,656	89	1,0	0,17	40	5:2
17.01.1983	7,2	94	51	0,723	0,844	79	1,0	0,38	65	5:2
Тип В										
04.04.1904	7,1	11	3	0,541	0,228	158	2,2	1,47	290	3:4
18.04.1928	7,0	31	2	0,526	0,170	63	2,2	0,52	59	6:2
18.03.1953	7,2	12	2	0,572	0,139	79	2,6	0,77	82	4:3
09.07.1956	7,4	21	4	0,666	0,174	100	2,1	0,75	59	2:6
22.07.1967	7,0	20	1	0,569	0,073	63	3,0	-	-	3:4
19.02.1968	7,3	29	6	0,525	0,429	89	1,8	0,12	64	2:6
28.03.1970	7,2	69	9	0,535	0,550	79	1,4	0,38	422	5:3
19.12.1981	7,6	14	3	0,690	0,120	126	2,5	0,82	111	4:4
18.01.1982	7,0	18	4	0,562	0,268	63	1,9	0,24	81	0:8
<b>Рифт Мертвого моря</b>										
Тип В										
03.02.1983	5,3	19	12	0,616	0,516	8	1,4	1,40	43	4:4
<b>Туркмения</b>										
Тип А										
14.03.1983	5,6	12	4	0,604	0,226	12	1,0	0,41	166	5:3
Тип В										
30.07.1970	6,7	11	6	0,666	0,249	44	2,2	0,20	394	3:5
07.03.1974	5,6	18	8	0,641	0,349	12	1,99	0,44	71	2:5
16.08.1985	5,5	12	1	0,767	0,029	11	2,22	0,84	275	1:6
29.10.1985	5,6	17	4	0,809	0,093	12	2,28	0,87	46	1:6



Регион	Mo	N	Тип А		Тип В	
			Всего	Ошибки	Всего	Ошибки
Калифорния	6,4	17	6	1	11	-
Средняя Азия	6,4	8	1	-	7	1
Кавказ	6,4	5	-	-	5	-
Прибайкалье	5,5	2	-	-	2	1
Иберо-Магриб	6,0	2	1	-	1	-
Рифт Мертвого моря	5,0	1	-	-	1	-
Италия	6,0	7	2	1	5	1
Туркмения	5,5	5	1	1	4	-
Балканы и Малая Азия	7,0	12	3	-	9	1
Тест		42	8	2	34	4
Всего		59	14	3	45	4

Оценка статистической значимости. При проверке алгоритма на не-зависимом материале параметры алгоритма не менялись. Это позволяет провести оценку статистической значимости полученных результатов в рамках следующей гипотезы:

Г и п о т е з а  $H_0$ : *Магнитуды афтершоков независимы и их распределение подчиняется закону повторяемости с наклоном  $b$ , зависящим от афтершоковой последовательности.*

Рассмотрим  $i$ -ю афтершоковую последовательность. Пусть за период  $(t+s, t+S)$  произошло  $N_s$  толчков с  $M_a \geq M-3$ , где  $M$  - магнитуда основного толчка. Тогда, в условиях гипотезы  $H_0$ , вероятность того, что хотя бы один из  $N_s$  толчков имеет магнитуду  $M_{a_s} \geq M-1$ , т.е. возникнет повторный сильный толчок, равна

$$p_i = 1 - \left[ \frac{1 - z^2}{1 - z^3} \right]^{N_s}, \quad z = 10^{-b_i}.$$

Здесь использовано то обстоятельство, что обычный толчок принадлежит интервалу  $(M_0-3, M_0-1)$ .

Вероятность того, что повторных сильных толчков не было

$$q_i = 1 - p_i.$$

Все афтершоковые последовательности независимы, тогда вероятность получить случайно не более  $k$  ошибок среди  $n$  объектов класса А:

$$P_A = \sum_{x=0}^k \left[ \sum_{i_1 \dots i_x} \left[ \prod_{m=i_1 \dots i_x} q_m \cdot \prod_{l \neq i_1 \dots i_x} p_l \right] \right],$$

где  $i_j$  - неповторяющиеся индексы из интервала  $(1, n)$ .

Для объектов класса В формула вычисления  $P_B$  с точностью до перестановки  $p$  и  $q$  точно такая же.

В условиях гипотезы  $H_0$  вероятность получить случайно результат не хуже достигнутого по числу ошибок  $k_A$  и  $k_B$  для каждого типа оценивается как произведение вероятностей:

$$P = P_A \times P_B = 0,146 \times 0,091 = 0,013.$$

Можно также оценить вероятность того, что сумма ошибок  $k_A + k_B$  будет не больше достигнутой, она составляет 0,038. Как видим, вероятность результатов распознавания в рамках гипотезы  $H_0$  меньше 5%.

**Заключение.** Предложен алгоритм прогноза сильного повторного толчка на основе анализа потока афтершоков первого сильного землетрясения в паре. Параметры алгоритма определены по афтершоковым последовательностям сильных землетрясений Калифорнии. Алгоритм проверен на независимом материале - 42 афтершоковые последовательности восьми сейсмоактивных регионов мира без дополнительной подгонки параметров. Допущено 6 ошибок: 2 пропуска цели и 4 ложные тревоги.

Повторные сильные толчки встречаются достаточно редко: 16 из 125 в изученных регионах, т.е. в 13% случаев. Близкая оценка - 11% получается согласно пуассоновской модели афтершоков [4] для Калифорнии. Важно, однако, что в рамках этой же гипотезы наш прогноз значим на уровне 96%. Полученные результаты можно рассматривать только как предварительные. Для подтверждения эффективности метода необходим дальнейший мониторинг. На данный момент было сделано два успешных прогноза "вперед": Лома Приета (1989г.) и Рачинск (1991г.).

#### Литература

1. *Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle// *Tectonophysics*. 1965. Vol.2. P. 483-514.
2. *Vere-Jones D.* A note on the statistical interpretation of Bath's law// *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1969. Vol.59. P.1535-1541.
3. *Прозоров А.Г.* О понижении вероятности сильных толчков в некоторой пространственно временной окрестности сильных землетрясений мира// *Вопросы прогноза землетрясений и строения Земли*. М.: Наука, 1978. с.35-47. (Вычисл. сейсмология; Вып. 11).

4. *Reasenberg P.A., Jones L.M.* Earthquake hazard after a main-shock in California// *Science*. 1989. Vol.243. P.1173-1176.
5. *Matsu'ura R.S.* Precursory quiescence and recovery of after-shock activities before some large aftershocks// *Bull. Earth. Res. Inst. University of Tokyo*. 1986. Vol.61. P.1-65.
6. *Шрейдер С.Ю.* Определение сейсмических затиший в терминах временных интервалов между событиями// *Компьютерный анализ геофизических полей*. М.: Наука, 1990. С.37-57. (Вычисл. сейсмология; Вып. 23).
7. *Haberman R.E., Creamer F.H.* Prediction of large aftershocks on the basis of quiescence. The 7th US - Japan seminar on earthquake prediction. 1990. Vol.1. P.93-96.
8. *Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Ротвайн И.М.* Долгосрочные сейсмологические предвестники сильных землетрясений в Калифорнии - Сьерра - Неваде, Новой Зеландии, Японии и Аляске// *Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных*. М.: Наука, 1980. С.3-11. (Вычисл. сейсмология; Вып. 13).
9. *Аллен К.А., Кейлис-Борок В.И., Ротвайн И.М., Хаттен К.* Комплекс долгосрочных сейсмологических предвестников (Калифорния и некоторые другие регионы)// *Математические методы в сейсмологии и геодинамике*. М.: Наука, 1986. С.23-37. (Вычисл. сейсмология; Вып. 19).
10. *Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г.* Периоды повышенной вероятности возникновения для сильных землетрясений мира// *Математические методы в сейсмологии и геодинамике*. М.: Наука, 1986. С.48-58. (Вычисл. сейсмология; Вып. 19).
11. *Tsuboi C.* Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area, and strength of earth's crust// *J. Phys. Earth*. 1956. Vol.4. P.63-69.
12. World hypocenters data file. USGS-NEIS, Boulder, Colorado.
13. Southern California hypocenters data file. CIT-USGS, Pasadena, Calif.
14. Northern California hypocenters data file. Berkley, Calif.
15. *Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г.* Периоды повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира// *Достижения и проблемы современной геофизики*. М.: Наука, 1984. С.48-57.

УДК 550.34.013

*Е.М.Блантер, М.Г.Шнирман*

О "МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОМ" ПОДХОДЕ К ВОПРОСУ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ЭПИЦЕНТРОВ

*E.M.Blanter, M.G.Shnirman*

A "MULTIFRACTAL" APPROACH TO THE EPICENTER CLUSTERIZATION

We study clusterisation properties of real and modeled flows of seismic events. The distribution of clusters by number of events is investigated in terms of multifractal technology. It is shown