

УДК 550.341.5

## ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ-УКАЗАТЕЛИ И ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А. А. Гусев

*Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР, Петропавловск-Камчатский*

В работе рассматривается особый тип связи между землетрясениями — увеличение числа троек: сильное  $A$  — слабое  $B$  — сильное  $C$  — в случае, когда время между  $A$  и  $B$  и расстояние между  $B$  и  $C$  малы. Явление изучалось для двух каталогов землетрясений с разными уровнями энергии. Оценены основные параметры связи и их зависимость от энергии. На нескольких примерах показана перспективность изучаемой связи для прогноза места и (или) времени сильных землетрясений. Сделана попытка физической интерпретации описанной связи.

Рассматривается определенного рода взаимосвязь между отдельными землетрясениями, интересная с точки зрения прогноза. Обычно анализируется парная связь, именно форшок — сильное, сильное — афтершок. Рой землетрясений без преобладающего толчка или афтершоковый рой представлен как пики плотности событий, а не как эффект многоточечной связи. Мы же будем рассматривать взаимосвязь трех событий.

Рассмотрим тройку событий  $A$ -,  $B$ -,  $C$ -землетрясении с параметрами — координаты  $\lambda$ ,  $\varphi$ ; времени  $t$ ; энергия  $10^k$  или магнитуда  $M$  (обобщенно —  $E$ ), — выделенную по следующим признакам:

- 1)  $A$ ,  $B$ ,  $C$  происходят последовательно во времени;
- 2)  $E_A$  и  $E_C$  много больше  $E_B$ ;
- 3)  $t_A - t = t_{AB}$  — время между  $A$  и  $B$  мало;
- 4)  $d_{BC}$  — расстояние между  $B$  и  $C$  мало.

Мы постараемся показать, что плотность событий  $B$  при надлежащем выборе  $E_A/E_B$ ,  $E_C/E_B$  и порогов для  $t_{AB}$  и  $t_{BC}$  превышает ожидаемую в отсутствие связи (для троек независимых событий). Иными словами, сильное землетрясение  $A$  вызывает в течение короткого времени форшоки  $B$  вблизи будущего сильного землетрясения  $C$ .

На существование явлений такого рода указывал С. А. Федотов. В литературе это явление впервые отмечено А. Г. Прозоровым [1], который дал событиям  $B$  название «удаленных афтершоков». Нам это название кажется неудачным, скорее  $B$ -события заслуживают названия «индуцированных форшоков». Мы, однако, предпочли ввести для  $B$ -событий специальный термин «землетрясение-указатель», или просто «указатель».

Сделаем еще одно терминологическое замечание. В эмпирическом материале у нас нет возможности отличить «истинные указатели» от обычных «фоновых» событий с теми же параметрами, и везде, где мы

говорим об указателях на основе эмпирического материала, они такими являются лишь с некоторой вероятностью<sup>1</sup>.

Мы поставили перед собой следующие задачи:

убедиться в существовании указателей для сейсмических процессов разных масштабов (регионального и глобального);  
определить для этих двух случаев основные параметры явления;  
оценить возможность прогноза землетрясений с помощью указателей.

Для доказательства существования использовали идею сравнения со случайным каталогом [1]. Сравнивали параметры некоторого набора троек  $A, B, C$  с некоторой другой выборкой, в которой предполагаемая связь не должна проявиться. Такая выборка сравнения составлялась одним из следующих способов:

α) вместо  $B$ -события — случайно выбранное из каталога (псевдо- $B$ );

β) вместо момента  $A$ -события — произвольный момент времени (псевдо- $A$ ).

γ) вместо  $C$ -события — событие с теми же параметрами, но не первое после  $B$ , а последнее перед ним (псевдо- $C$ ).

После проверки на неслучайность выделенные  $B$ -события можно считать (с некоторой вероятностью) указателями и оценить на полученных примерах важнейшие параметры явления, а именно:

соотношение между энергиями  $A$  и  $B$ ,  $B$  и  $C$ ;

относительное превышение плотности  $B$ -событий над ожидаемой в отсутствие связи;

верхние пороги для  $t_{AB}$  и  $d_{BC}$ , обозначаемые далее  $T_{AB}$  и  $D_{BC}$   
верхние пороги для  $t_{AC}$  и  $d_{AC}$ , обозначаемые  $T_{AC}$  и  $D_{AC}$ .

Первые два параметра — безразмерные, остальные должны зависеть от выбранного уровня  $E_A$  и (или)  $E_C$ . Эта сводка неполная, кроме того, параметры взаимосвязаны. Возможно, важнее знать не предельные, а характерные значения  $t_{AB}$ ,  $d_{BC}$ ,  $t_{AC}$ ,  $d_{AC}$ , а также отношения энергий, и мы будем иметь это в виду.

Данные. Явление изучалось для двух каталогов землетрясений. Используются региональный камчатский каталог, полученный в Тихоокеанской сейсмологической экспедиции Института физики Земли, Института вулканологии СО АН СССР, за 1965—V 1968 гг. (Каталог I), и каталог Береговой геодезической службы США, опубликованный в «Сейсмологическом бюллетене» и «Сводках определения координат» этой службы (Каталог II).

Из каждого каталога формируются.

1. Список обычных событий ( $O$ -список), из которого выбираются  $B$ -события. Для Каталога I  $O$ -список получен исключением событий с  $K < 7,5$ , с глубиной свыше 70 км, с  $\lambda > 165^\circ$ , с  $\phi < 50^\circ$ , а также всех событий территории Камчатки к западу от линии Северо-Курильск — Петропавловск — исток р. Кроноцкой — западный берег оз. Нерпичьего. Из Каталога II  $O$ -список получен исключением событий с  $m_b < 4,0^2$ , а также лишенных оценки магнитуды.

2.  $A$ - и  $C$ -списки. Если уровень выделения для  $A$  и  $C$  одинаков, эти списки совпадают (кроме крайних элементов). Для Каталога I общий  $A$ — $C$ -список выбирался из  $O$ -списка. Для Каталога II в  $A$ - и  $C$ -списках нижний уровень брался на основании магнитуд  $M$  из сводок в сборниках «Землетрясения в СССР».

<sup>1</sup> Ситуация аналогична задаче выделения афтершоков. Афтершоки тоже происходят «на фоне средней сейсмичности», и событие, близкое в пространстве и времени к сильному толчку, является афтершоком лишь с некоторой вероятностью.

<sup>2</sup> Это значение ниже уровня регистрации сети БГС во многих районах мира. Однако, если он не меняется во времени, выводы о значимости не исказятся. Аналогичное замечание может быть сделано и в отношении Каталога I.

## Результаты.

### Каталог I

Выбрано  $K_A \geq K_{A_0} = 12,5$ ;  $K_C \geq K_{C_0} = K_{A_0}$ . Событий  $A$  и  $C$  — 15 штук. В  $B$ -выборку включались первые 1—2—3 события из  $O$ -списка (после  $A$ ), соответствующие наборы троек обозначаются как (1), (12), (123)-наборы. Афтершоки  $A$ -событий исключались выбором  $d_{AB} > 100$  км.

1. Сравнение с  $\alpha$ -выборкой. Выбрано  $D_{BC} = 50$  км, и найдено, сколько раз  $C$ -события попадают в круги радиусом 50 км вокруг предшествующих  $B$ -событий. Совпадения считаются. Полученные числа  $N_1, N_{12}, N_{123}$  имеют максимальное значение  $K, 2K, 3K$ , где  $K = 14 + 13 + \dots = 105$ . Фактически между  $A$ -событиями с номерами 9 и 10 ни одного  $B$ -события не произошло, так что один член из суммы выпадает и  $K = 100$ . Фактические значения чисел попаданий — 9, 13, 18. Для выборки сравнения направление времени несущественно, и для выборки объема 20 псевдо- $B$ -событий  $K = 20 \times 15 = 300$ . Фактически псевдо- $B$ -события дали 9 попаданий. Эти результаты сравнивались с помощью  $2 \times 2$  таблиц сопряженности по критерию  $\chi^2_1$  с поправкой Йетса [2]. Различие значимо на 5-, 10%-ном уровне. Заметим, что времена  $t_{AB}$  почти всегда не превышают двух суток.

2. Такое же сравнение (12)-выборки с  $\alpha$ -выборкой объема 10 для случая, когда уровень для  $B$ -событий принят  $K_{B_0} = 10,5$  не дало никакого, даже малозначимого результата.

3. Сравнивались числа попаданий для (12)-выборки и  $\alpha$ -выборки из пункта 1 при разных значениях  $D_{BC}$ . Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1  
Числа попаданий для (12)-выборки и  $\alpha$ -выборки при разных  $D_{BC}$

$D_{BC}$ , км	50	40	20	
$N_{12}$ , шт.	13	10	5	$N_{\max} = 200$
$N_{\alpha}$ , шт.	9	5	3	$N_{\max} = 300$
$k$	2,2	3,0	2,5	

Относительная плотность  $B$ -событий, по-видимому, растет с уменьшением  $d_{BC}$ , но для доказательства мало данных.

4. Зависимость эффекта от  $t_{AC}$ . Рассмотрим распределение разности номеров событий  $A$  и  $C$  (в их общем списке) для тех 13  $A, C$ -пар, которые вошли в (12)-выборку. Если разности равновероятны, то они имеют дискретное треугольное распределение (14 возможностей для первого события, 13 — для второго, и т. д.). Для значений разности 1, 2, 3

имеем вероятность  $\frac{(14 + 13 + 12)}{150} = 0,37$ . Фактически имеем в выборке (1) 6 случаев из 9 с разностями номеров 3 и менее, а в выборке (12) — 7 случаев из 13. При нулевой гипотезе и биномиальном распределении первый результат значим на уровне 80%, второй незначим. Малые  $t_{AC}$ , таким образом, встречаются чаще.

### Каталог II

1. Выберем в качестве  $A$ -событий три землетрясения с  $M \geq 8,0$  — Урунское 13 октября 1963 г., Аляскинское 28 марта 1964 г. и Алеутское 4 февраля 1965 г. В течение четырех суток после этих землетрясений вне круга радиусом  $5^\circ$  произошло соответственно 22, 15, 17 событий из  $O$ -списка. При этом два события с удалением до  $5^\circ$  были взяты за одно.  $C$ -события — землетрясения с  $M \geq 7,0$  в пределах Тихоокеанского пояса и с  $M \geq 6,0$  вне его.

А. Урупское землетрясение. Выборка сравнения — тип с моментом .00 ч 1 октября 1963 г. в качестве псевдо-А. Условие на  $t_{AB}$  снято, вместо этого взята выборка равного объема. Результаты для  $D_{BC}=4^\circ$  и  $8^\circ$  сведены в табл. 2.

Результаты для  $D_{BC}=4$  и  $8^\circ$

Таблица 2

D <sub>BC</sub>	4°	8°	} из 22 возмож- ных
N <sub>B</sub>	10	13	
N <sub>псевдо</sub>	4	11	
к	2,5		

Соответствующая таблица сопряженности для  $D_{BC}=4^\circ$  значима на 10%-ном уровне.

Б. Аляскинское землетрясение. Выборка сравнения типа  $\gamma^1$ ,  $t_{AC}$  не превышает 15 месяцев. Афтершоки псевдо-С-событий будут встречаться среди В-событий выборки сравнения, искажая картину в неблагоприятную для нас сторону. Чтобы увеличить число случаев, мы увеличили  $D_{BC}$  до  $7^\circ$ , и все же лишь в 9 из 15 случаев нашлось хотя бы одно событие С или псевдо-С. Во всех 9 парах  $t_B - t_C$  меньше, чем  $t_{\text{псевдо-С}} - t_B$ , что значимо по критерию знаков на 1%-ном уровне.

В. Алеутское землетрясение. Здесь проверка способом, описанным в пункте Б, не дала значимого результата (5 плюсов из 8 возможных). Возможно, другой способ проверки дал бы значимый результат, но мы оставили вопрос открытым, чтобы избежать упрека в подгонке.

Итак, эффект тройной связи существует и для сейсмического процесса глобального масштаба. Степень по энергии между А и В — примерно шесть порядков, между В и С — около четырех-пяти порядков.

2. Обнаружив при просмотре каталогов вероятные указатели с очень малыми  $t_{AB}$ , мы стали искать их более систематически. Заодно нам хотелось уменьшить  $d_{BC}$  до размеров очаговой зоны С-события, что, как нам казалось, должно увеличить относительную плотность указателей. Общий А-С-список был составлен из событий с  $M \geq 7,75$  за 1963—1968 гг. Пороги были выбраны жесткие —  $T_{AB}=12$  ч,  $D_{BC}=200$  км.

Мы нашли пять В-событий для некоторых пар А, С. Три из них имеют  $d_{BC}$  не более 100 км. Для круга с радиусом 200 км среднее время ожидания О-события составляет во всех случаях более 5 сут., т. е. превышает порог  $T_{AB}$  более чем на порядок. Из 9 А-событий лишь три вызвали столь четкие указатели, а из 9 С-событий «указаны» четыре. Во всех случаях  $t_{AC}$  не превышали 2,5 года, но, что важно отметить, разность номеров А- и С-событий не превышает трех. При этом для каждого из четырех «указанных» С-событий существует указатель с  $t_{AC}$  менее года.

Схема прогноза. Приведенных данных, с нашей точки зрения, достаточно, чтобы убедиться в существовании тройной связи описанного типа. Попытаемся теперь применить полученные сведения о свойствах явления для разработки конкретных схем прогноза.

Грубо говоря, существуют две (непротиворечивые) возможности — либо разбить область, в которой дается прогноз, на куски размером  $D_{BC}$  и выделить «угрожаемые зоны», либо для отдельной зоны указывать «угрожаемые периоды». Мы попробовали второй вариант.

<sup>1</sup>  $\gamma$ -выборка вообще кажется более надежным инструментом сравнения, чем  $\beta$ -выборка, но ее нельзя построить вблизи начала Каталога, поэтому мы и использовали для Урупского землетрясения  $\beta$ -выборку.

Конкретная схема прогноза следующая.

1. Для заданного района и уровня  $C$ -событий выбрать соответствующие энергетические уровни  $A$ - и  $B$ -событий.

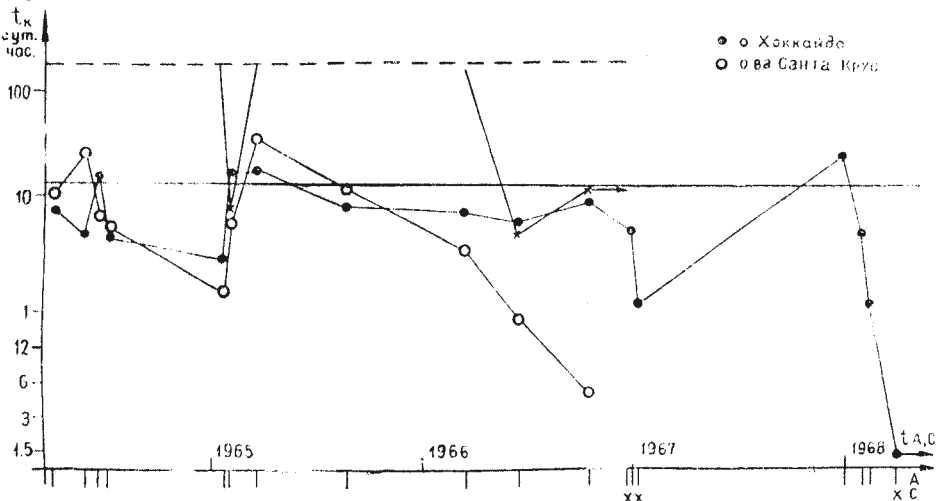
2. Составить  $A$ - и  $O$ -списки за предшествующий прогнозируемому период.

3. Для каждого  $A$ -события найти следующее по времени событие  $O$ -списка во времени: это проще и удобнее).

4. Просмотрев список значений  $t_{KB} - t_A = t_K$ , оценить среднее значение  $t_K = \frac{1}{\lambda_K}$ . (Вместо  $\lambda_K$  можно взять  $\lambda_0$ , предполагая «пуассоновость»  $O$ -списка во времени: это проще и удобнее).

5. Если последние значения  $t_K$  много меньше  $\frac{1}{\lambda_0}$ , давать прогноз на период до очередного  $KB$ -события (или  $C$ -события). Новое  $KB$ -событие вызывает пересмотр прогноза.

Мы выбрали три района — острова Санта-Крус, Хоккайдо и Монголия (районы 183—184, 333—334, 223—224 по схеме районирования, принятой при публикации данных БГС США и МСЦ), для того чтобы проверить возможность прогноза на землетрясениях с  $M \geq 7,75$ , происшедших в этих районах 31 декабря 1966 г., 5 января 1967 г. и 15 мая 1968 г. соответственно.  $A$ -события — все с  $M \geq 7,5$  начиная с 1963 г. Значения  $t_K$  нанесены на график (см. рисунок). Тонкая линия — уровень  $\frac{1}{\lambda_0}$  для первого и третьего районов, он в обоих случаях близок к 12 сут. (оцен-



Зависимость  $t_K$  от времени для трех районов — о-ва Санта-Крус, Монголия и Хоккайдо (кружки, крестики и точки соответственно), где произошли землетрясения с магнитудой  $M = 7,75$  ( $C$ -события). Их моменты отмечены под осью времени. Значения  $t_K$  получены для  $A$ -событий с  $M = 7,5$ , происшедших в моменты, отмеченные там же черточками. Горизонтальные линии — уровни  $\frac{1}{\lambda_0}$  для первого и третьего районов (сплошная) и условно для второго района (штриховая)

ка по данным 1964 г.). Для Монголии уровень проведен условно, т. к. за три года зарегистрировано лишь три события, из которых два — вероятные указатели. Принято значение  $\frac{1}{\lambda_0} = 130$  сут., и значения  $t_K$  больше этой величины на график не наносились.

Из рассмотрения графиков можно сделать вывод, что прогноз следует давать после пары таких значений  $t_K$ , которые ниже уровня  $\frac{1}{\lambda_0}$  бо-

лее чем на порядок, и на срок порядка полугода. Сумма длин трех интервалов  $KB-C$  составляет около 7 месяцев, в то время как сумма интервалов от первого  $A$ -события до  $C$ -события по трем случаям составляет около 8,5 года, что позволяет оценить значения эффективности прогноза.

1- $P$  (землетрясение | прогноз):  $P_{безул}$  (землетрясение) = 12,5. Эта оценка, скорее всего, завышена, но ожидать от такого типа прогноза значесний эффективности трех—пяти кажется вполне реалистичным. Действительно, даже при данной грубой методике, использующей только наиболее сильные  $A$ - и  $B$ -события, надежные указатели (с  $t_{AB}$ , более чем на порядок меньше  $\frac{1}{\lambda_0}$ ) можно найти для половины числа землетрясений с  $M > 7,75$  за 1964—1969 гг. (в 5 из 10 случаев).

Основные характеристики явления. На основе приведенных данных можно оценить свойства изучаемого эффекта для случая, когда энергии  $A$ - и  $C$ -событий одного порядка. Эффект проявляется при энергетической ступени между  $A$ -,  $C$ - и  $B$ -событиями в 4—6 порядков (у Прозорова — 5 порядков), а при ступени в 2 порядка исчезает. Плотность  $B$ -событий превышает случайную иногда (при жестких порогах на  $t_{AB}$  и  $d_{BC}$ ) на один-полтора порядка. Она сильно зависит от этих порогов. Для обоих изученных каталогов эффект наиболее заметен для времен  $t_{AB}$  менее двух суток, а критические расстояния  $D_{BC}$  превышают размеры очага на полпорядка (50 км для  $M \approx 5,0$ , 500 км для  $M \approx 7,0-8,0$ , у Прозорова 100 км для  $M \approx 6,0$ ). Но сильнее всего эффект проявляется на расстояниях порядка размеров очага (менее 200 км для  $M \approx 7,75-8$ ). Критические значения  $t^A_C$  для обоих каталогов — порядка двух лет, а характерные — от двух месяцев до года. Эти оценки очень неустойчивы из-за неравномерности появления во времени  $A$ - и  $C$ -событий. Если имеется общий  $A-C$ -список, то эффект мало заметен для  $A-C$ -пар с разностью номеров более трех. Пределов для  $d_{AC}$  не обнаружено, что частично связано со спецификой нашей методики. Если не выбирать уровни  $A$ - и  $C$ -событий близкими, такие пределы, наоборот, обнаружатся.

Гипотезы относительно механизма явления мы не в состоянии высказать. Мы объясняем появление указателей влиянием перестройки упругого поля (региона или Земли) после  $A$ -события. Район  $C$ -события находится при этом в критическом, близком к разрушению, состоянии, а изменение упругого поля является спусковым механизмом. Конечно, может быть сразу «сорвано»  $C$ -событие, и таких примеров достаточно. Однако через период порядка двух суток добавочное напряжение успевает заметно релаксировать — то ли за счет неупругости, то ли за счет крипа по сейсмическим швам, то ли за счет других землетрясений, и эффект сходит на нет. Заметим, что мы нашли указания на существование другого подобного трехточечного эффекта, а именно — «индуцированных афтершоков».

Для данной тройки  $C, A, B$  (порядок во времени) с теми же условиями по энергии плотность  $B$ -событий необычно велика в течение года после сильного  $C$ -события. Иными словами, перестройка упругого поля после  $A$ -события вызывает усиление афтершоковой активности в области уже происшедшего  $C$ -события.

Расстояния  $d_{AC}$  могут показаться неожиданно большими. Автор полагает, однако, что так и должно быть. Хотя деформации от землетрясения с  $M=8,0$  по земному шару в целом невелики, других подобных источников постоянной и при этом мгновенно включающейся деформации нет. Приливные деформации периодичны, а метеорологические резко не меняются. А такая резкость необходима в силу отмеченной быстрой релаксации эффекта,

## Выводы

Изучение особого рода связи между землетрясениями — появления вскоре после сильного землетрясения слабых землетрясений-указателей вблизи очага другого готовящегося сильного землетрясения — весьма интересно как с принципиальной стороны, так и в плане приложения к предсказанию землетрясений. В работе на материале двух каталогов — регионального камчатского и для земного шара — изучены важнейшие свойства явления. Степень по энергии между сильными землетрясениями и указателями составляет около пяти порядков, время между первым сильным землетрясением и указателем — сутки, расстояние от указателя до второго сильного землетрясения — размер его очага или на полпорядка больше.

На основе рассматриваемого явления предложена и испытана конкретная схема прогноза времени возникновения сильного землетрясения в некотором районе. По предварительной оценке, эффективность такого прогноза может достигать значений 3—5 и более.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кейлис-Борок В. И., Подгаецкая В. М., Прозоров А. Г. О локальных статистиках каталогов землетрясений.— В кн.: Вычислительная сейсмология, вып. 5. М., «Наука», 1971.
2. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. М., «Наука», 1965.

## THE EARTHQUAKES-INDICATIONS AND PREDICTION

*A. A. Gusev*

### Summary

This paper deals with special kind of relationship between the earthquakes: the increase of number of triples: strong A—weak B—strong C in the case when time between A and B and distance between B and C are small. This event was studied for two catalogues of the earthquakes with different energy levels. The main parameters of the relationship and their dependence upon the energy were evaluated. The perspective of the studied relationship for prediction of place and time of strong earthquakes is shown by some examples. An attempt is made to give physical interpretation of the described relationship.