УДК 550.34.01

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АФТЕРШОКОВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ КРОНОЦКОГО 1997 г. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Кролевец А.Н.[1], Широков В.А.[2]

[1]Петропавловский филиал РАНХиГС, г. Петропавловск-Камчатский
[2]Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, priemnaya@pk.ranepa.ru

Введение

Построение моделей геофизической среды выполняется параллельно с моделированием сейсмического процесса. От адекватной модели ожидают объяснения не только особенностей процесса разрушения среды, излучения и распространения сейсмических волн, но и объяснения пространственно-временных закономерностей сейсмичности в фоновом и афтершоковом режимах. В первую очередь, это относится к законам Гутенберга и Рихтера, Омори [8] и его уточнениям [9]. Вопросом, на который до сих пор нет однозначного ответа, является: имеет ли среда регулярную пространственную структуру. Достаточно часто, в масштабах размеров ме́ньших тектонических плит рассматривается «бесструктурная» среда. Сторонники такой точки зрения полагают, что разрывы среды, порождающие сейсмические волны, в достаточной мере «залечиваются» без последствий до момента времени, когда в этом же месте возникает новый разрыв, близкий по масштабу. Альтернативная точка зрения опирается на примеры глобальной тектоники, а именно, на существование плит, которые все вместе образуют долгоживущую двумерную структуру мирового масштаба. Однородность сейсмичности в разных масштабах (закон Гутенберга-Рихтера) косвенно указывает на необходимость существования структурной однородности и сетки разрывов, существующей и постоянно обновляющей свою структуру во всех масштабах, вплоть до самых мелких. Сами разрывы расчленяют среду на блоки, заполняющие среду целиком. Блоковые модели среды развивались в работах [3, 5, 7]. Пространственно на разрывы должны бы указывать положения гипоцентров, однако считается, что это невозможно ввиду низкой точности определения их координат. По нашему мнению, дополнительные аргументы в пользу или против блоковых моделей среды можно найти в данных пространственно-временной статистики существующих сейсмических данных. Вариабельность пространственно-временных свойств потока сейсмических событий оценивают параметрами «фрактальности». Сама по себе фрактальность указывает лишь на сложность и разномасштабность протекающих в среде процессов, но в малой степени на их физическую сущность. **Целью данной работы** является *физическая интерпретация пространственно-временных особенностей статистики сейсмичности, по данным афтершоков с точки зрения блокового строения среды*. Для исследования использован региональный каталог землетрясений Камчатского филиала ГС РАН по состоянию на декабрь 2018 г. [2]. Классификация землетрясений по энергии осуществлялась с помощью с помощью шкалы С.А.Федотова K_s [6]. Энергия в джоуляхрассчитывалась по формуле $E=10^{Ks}$. Район исследования заключен в рамки по широте φ от 46.6° до 62.6° N, по долготе λ от 148.5°до 174.4° E.

Особенности статистики сейсмичности

Обозначим интенсивность потока сейсмических событий $A=dN/dt$ (здесь dN – число событий в течение времени dt). A в фоновом (не афтершоковом) режиме зависит от диапазона рассматриваемых энергетических классов, выбора в пространстве анализируемого объёма. Даже при фиксированных указанных (кроме dN) параметрах, A в течение значительных промежутков времени не остаётся постоянной. Причинами таких вариаций являются изменения состояния среды, как целого, перераспределение вещества и напряжений внутри. Сторонники «бесструктурности» среды склонны полагать, что, это вызывает соответствующие отклики и темпа процесса её разрушения. Независимость процессов образования отдельных трещин даёт им основание считать, что на ограниченных промежутках времени, по продолжительности многоо́льших среднего промежутка между событиями, плотность вероятности возникновения событий не зависит от времени. Отсюда следует, что поток сейсмических событий в малых временных масштабах должен обладать свойствами пуассоновского потока [1]. Как следствие, статистика ***распределения промежутков времени между событиями*** должна быть экспоненциальной [1]. Любые отклонения от экспоненциальности, если они обнаружены, должны находить объяснение. Сторонники среды со структурой, тем более блоковой, с одной стороны, должны уметь объяснить экспоненциальность распределения, с другой – уметь указать, где следует ожидать отклонения от экспоненциальности, уметь объяснить природу их возникновения и особенности. При большом числе событий проверка распределения на экспоненциальность может выполняться с помощью статистического критерия Пирсона, при малом – можно сравнивать средний промежуток времени между событиями со стандартным отклонением (для экспоненциального они совпадают), вычислять параметр асимметрии распределения (равен двум).

Экспоненциальное распределение и периодические процессы. Во-первых, путём моделирования покажем, что *экспоненциальное распределение* ***промежутков времени между событиями*** типично и для блоковой среды. Действительно, в блоковой среде можно ожидать периодичности сейсмических событий, связанных с движением каждого отдельного блока. Однако, наложение даже строго периодических процессов с несоизмеримыми периодами порождает поток событий со свойствами пуассоновского. Рассмотрим модельную среду, состоящую из блоков [4, 7]. Отдельный *i-ый* блок периодически порождает сейсмические события, строго через промежутки времени T_i. Если размеры блоков разные, то различаться будут и периоды. Для пяти блоков с помощью генератора случайных чисел получено пять случайных «периодов генерирования сейсмических событий» в интервале от 0 до 100: T_1=53.85, T_2=54.22, T_3=29.61, T_4=46.44, T_5=17.11. Далее, от нулевого момента времени вычислены последовательности $T_1, 2{\cdot}T_1, \ldots 1000\ T_1$ «моменты наступления сейсмических событий для первого блока»: и аналогично последовательности для оставшихся четырёх с периодами $T_2 - T_5$. Все вычисленные моменты времени объединены в один массив и отсортированы по возрастанию. Для того чтобы рассматривать только случаи, когда «работают» все пять блоков, моменты бóльшие $1000{\cdot}T_5$ из массива исключены (T_5 является минимальным периодом из пяти). Далее вычислены промежутки времени для 4979 интервалов для подряд следующих событий. Для проверки гипотезы об экспоненциальности распределения подсчитаны числа интервалов, попадающих в диапазоны [0-4), [4-8),…[52-56). На рис.1 в полулогарифмическом масштабе представлена зависимость чисел интервалов, попадающих в каждый из диапазонов. Значения отнесены к серединам диапазонов. На этом же рисунке представлена линейная аппроксимация результатов, и параметр R^2 – достоверности аппроксимации. Линейность графика в выбранном масштабе, высокое значение параметра аппроксимации, статистическая проверка гипотезы об экспоненциальности распределения с использованием критерия Пирсона, дают основание не отвергать гипотезу. Подобные исследования, выполнялись и при других наборов случайных периодов (*но не менее пяти*), а также и не случайных, но не соизмеримых. Например, в случае пяти периодов, образующих геометрическую прогрессию со знаменателем $\sqrt{3}$, результат оказался аналогичным представленному на рисунке 1. Этим показано, что поток событий, генерируемых пятью или большим числом блоков при их равномерном движении, порождает последовательность интервалов, со свойствами экспоненциального распределения.

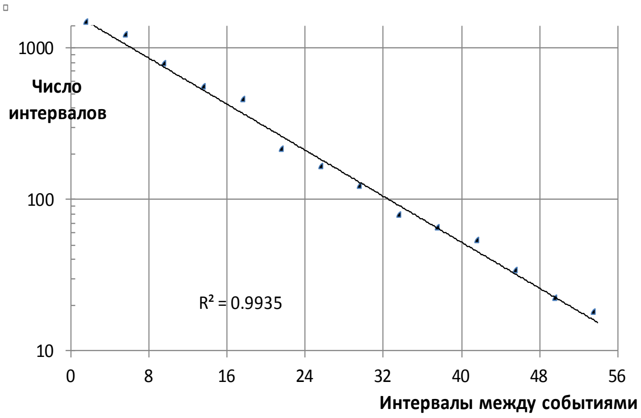

Рис. 1. Экспоненциальность статистического распределения интервалов между событиями **пяти** строго периодических последовательностей

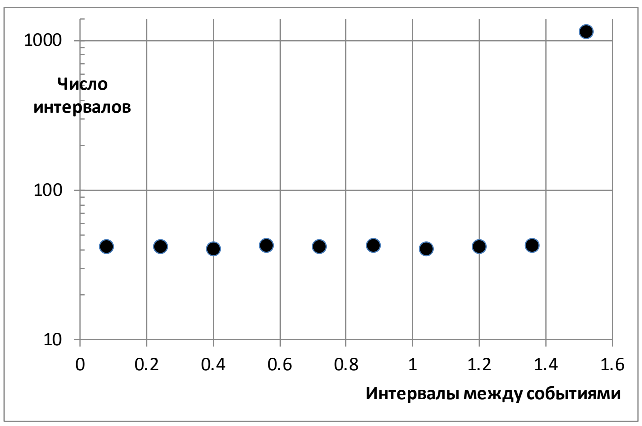

Рис. 2. В распределении интервалов суперпозиции **двух**, последовательностей (периоды T_1=10 и T_2 ≈0.158) последовательность меньшего периода (T_2) выявляется явно своими «кусками»

Особый интерес представляют ситуации, когда число блоков, порождающих поток сейсмических событий, оказывается небольшим. В таких ситуациях появляется шанс регистрировать периодичности сейсмических событий, обусловленные квазиравноменым движением блоков. К примеру, если события регистрируются лишь от двух блоков, каждый из которых порождает события с постоянным периодом, то при заметном отличии периодов, меньшая периодичность будет «кусками» выявляться во временном модельном ряду. Для иллюстрации на рис.2 представлено распределение интервалов между событиями модельного ряда, получающегося путём наложения ряда с периодом $T_1=10$ и $T_2=10^{0.2}\approx 1.58$. Трудности выявления периодичностей во временных рядах реальной сейсмичности обусловлены рядом причин. Во-первых, обозначенная проблема связана с не решённой ещё проблемой выделения в пространстве определённых блоков. Во-вторых, это нестационарный режим как глобальной, так и региональной сейсмичности, с не строгой периодичностью порождения сейсмических событий даже каждым из отдельных блоков и в течение относительно коротких периодов режимов стационарной сейсмичности, погрешностями определения координат событий. Всё вместе приводит к тому, что часть из событий выбранной для анализа пространственной области, содержащей определённые блоки, «выпадает» из ряда, и, наоборот, в область будут неправомерно попадать события, порождаемые блоками соседних областей. Это может и маскировать существующие периодичности, и приводить к «выявлению» ложных.

Укажем на меры и ситуацию, когда вклад в анализируемый подкаталог от событий одновременно большого числа блоков оказывается минимальным. Меры: сужение рамок пространственного окна и ограничение снизу энергетического класса для отбора анализируемых событий. Ситуация - афтершоковый процесс. В течение афтершокового процесса происходит резкое увеличение скорости относительного перемещения ограниченного числа блоков. После главных событий с числом афтершоков класса 11 и выше не более 10-20, такие афтершоковые события могут порождаться движением лишь одного блока. В случае мощных событий, большие размеры пришедших в движение блоков позволяют надеяться за счёт выбора положения пространственных окон осуществлять отделение афтершоковых событий одних блоков от других. Данная задача однозначного решения пока не имеет. В данной работе предлагается использовать дополнительный критерий для идентификации серий событий, порождаемых движением небольшого числа блоков. Серии идентифицируются по их статистическим характеристикам. Самая простая ситуация – режим стационарной сейсмичности. Если сейсмичность имеет характерные черты Марковского процесса, то распределение интервалов между последующими событиями должно иметь экспоненциальное распределение, а средний интервал между событиями T_{e} в пределах статистической погрешности должен примерно совпадать со стандартным отклонением $\sigma_{\text{e}} \approx T_{\text{e}}$. Моменты наступления любого события в серии практически невозможно предсказать. Если же считать, что сейсмические события являются проявлением движения блоков с механизмами, подобными описанным в [4], то стандартное отклонение для значений интервалов может оказаться значимо меньше T_{e}: $\sigma_{\text{e}} << T_{\text{e}}$. В работе [4] отмечалось, что гипоцентры событий, представленных в таблице 1, располагаются вблизи двух

Таблица 1. Шесть следующих подряд сильнейших афтершока Кроноцкого землетрясения

Дата	φ°- широта	λ° - долгота	h - глубина, км	K_s	Dt, мин	N, номера событий
05.12.97 11:35	53.86	161.19	32	13.9	-	2
05.12.97 11:37	54.099	163.124	24.2	13.7	2	3
05.12.97 11:41	53.875	161.366	37.6	12.2	4	4
05.12.97 11:42	53.54	161.8	37	12.7	1	5
05.12.97 11:45	54.97	161.97	11	12.9	3	6
05.12.97 11:48	54.29	162.46	10	13.5	3	7
05.12.97 11:51	53.9	161.5	19	12.5	3	8

плоскостей рис. 3, имеющих уравнения: h = -17.86333700$\cdot\varphi$ -1.876962778$\cdot\lambda$ + 1296.87 и h = -43.4685378$\cdot\varphi$ + 8.548170637$\cdot\lambda$ + 981.3. Там же предложено идентифицировать эти плоскости как плоскости скольжения блоков. Если ставится задача анализа событий, порождаемых минимальным числом блоков (или несколькими блоками, но движущимися до поры консолидировано), логично рассмотреть события с гипоцентрами вблизи этих плоскостей. В качестве серии событий для анализа рассмотрим серию первых семи следующих подряд сильнейших $K_s \geq 11.0$ афтершоковых событий Кроноцкого землетрясения [2]. В таблице – дата, координаты гипоцентров, энергетический класс, Dt – интервал между событиями. Среднее значение интервалов T = 2.67 мин. Стандартное отклонение значений ряда σ = 0.42 мин. 99% -процентный доверительный интервал для значения T, вычисленный с использованием распределения Стьюдента, составляет от 1.58 до 3.75 мин. Главным результатом здесь является значимое несовпадение стандартного отклонения интервалов между событиями со средним значением этих интервалов. Отсюда следует, что *данную серию лишь с ничтожной вероятностью можно рассматривать как проявление Марковского процесса. События в серии следуют в бóльшей степени детерминировано, чем это могло бы быть, если бы события могли происходить с равной вероятностью в любой момент времени.*

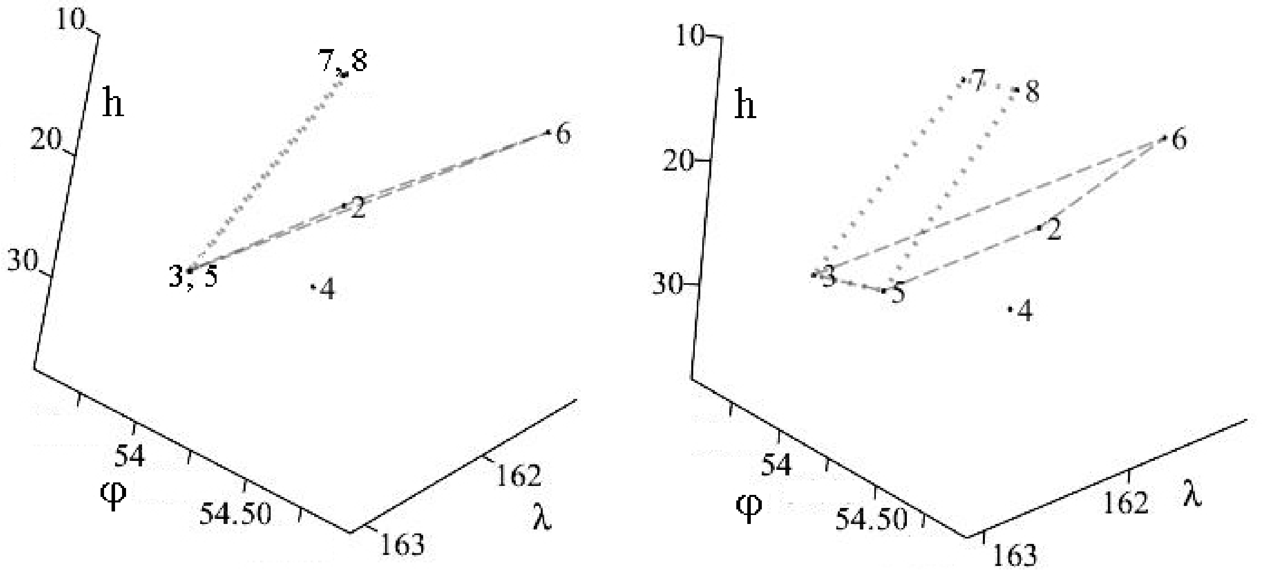

Рис. 3. Плоскости группирования шести из семи сильнейших первых афтершоков (K_s≥11.0, табл.1) Кроноцкого землетрясения 1997г. Выпадающее с плоскостей событие 4 имеет наинизший класс 12.2.

Афтершоковые события во временном окне с 05.12.1997 11:26 по 01.01.1998 20:03, класса $K_s \geq$ 11.0, расположенные, с точностью до значения определения погрешности координат, вблизи двух плоскостей (рис.2) могут быть сгруппированы в шесть «этапов» (79 событий) [4]. В течение четырёх этапов наблюдается линейная зависимость времени наступления события от его номера, что можно интерпретировать, как следствие равномерного движения блока (блоков), а в течение ещё двух – линейная зависимость времени наступления события от параметра $\psi = -ln(1 - i / m)$, где i – номер события, а (m-1) – полное число событий в рамках этапа. Этапы равномерного движения идентифицировались следующим образом. Вначале графически строились зависимости $t(i)$, а линейные участки идентифицировались визуально. Получали первое приближение – модель линейного участка. Далее участок расширялся (добавлялась одна точка) и получалась модифицированная модель. Для обеих моделей вычислялись средний квадрат отклонений (RSS), приходящийся на одну степень свободы, реальных данных от вычисленных в предположении линейности модели. Критерий Фишера позволял установить как значимость каждой из линейных моделей, так и значимость отличия одной из сравниваемых в сторону лучшего приближения. Если оказывалось, что лучше модель с большим числом точек, процедура повторялась. Временные рамки этапов линейности связи $t(i)$:первый – 05.12.1997: с 11:35 по 11:51 – 7 событий; третий – с 15:45 по 20:12 – 14 событий; четвёртый по 06.12 10:21 – 21 событие; пятый по 10.12 11:13 – 17 событий. Значимость линейности зависимостей $t(\psi)$ также устанавливалась с помощью критерия Фишера. Зависимости идентифицировались, как проявление затухающих относительных движений в среде. Временные рамки этапов затухания: второй – 05.12.97 с 12:05 по 15:55 – 13 событий и шестой с 10.12 1997 11:13 по 01.01.1998 – 7 событий. Далее вблизи двух плоскостей (рис.2) ни одного события класса 11 и выше по 30.05.1998 не произошло.

Сравним с использованием критерия Фишера упомянутую выше, [4] модель афтершокового процесса Кроноцкого землетрясения, состоящую из шести этапов (4 линейных+2 затухающих), включающих 79 событий класса 11 и выше с моделью Утсу [9] для этого же множества событий. Модель Утсу (одно из обобщений закона Омори связывает интенсивность dN/dt афтершокового процесса со временем t, прошедшим после основного события: $dN / dt = K / (t + c)^p$, K, c и p – подгоночные параметры. Интегрируя последнюю формулу, получаем выражение накопленного к моменту t числа событий: $N_{выч} = K \cdot c^{1-p} \cdot ((1 + t/c)^{1-p} - 1) / (1 - p)$. Для моментов времени каждого из 79 событий вычислялось ожидаемое «накопленное число событий». Допускалась нецелость $N_{выч}$. Далее вычислялась сумма квадратов разностей $SS = \Sigma(N_{выч} - N)^2$. Параметры K, c, p определялись путём минимизации SS. Получены значения $K = 25.87$, $c = 0.319$, $p = 1.69$, $SS = 346.9$. Число степеней свободы $n_y = 79 - 3 = 76$. Дисперсия на одну степень свободы $RSS_y = 4.56$. Вычислим теперь RSS для «модели шести этапов». Во-первых, определимся с параметрами каждого этапа. Их по 4: момент начала, коэффициент пропорциональности в линейной зависимости, число событий m и параметр выбора типа процесса (не затухающий – затухающий). Всего параметров 6·4=24. Теперь число степеней свободы $n_{6\ этп} = 79 – 24 = 55$. Используя представленные в [4] параметры для шести выделенных этапов получаем $SS_{6\ этп} = 31.59$. Теперь $RSS_{6\ этп} = 0.574$. В качестве нулевой статистической гипотезы примем гипотезу статистической неразличимости двух моделей. Параметр статистики по Фишеру $F = 4.56 / 0.574 = 7.95$. При данном наборе параметров, нулевая гипотеза отклоняется с вероятностью ошибки до 10^{-12}. Стационарность сейсмического режима (постоянство сейсмической активности) для четырёх этапов КЗ достаточно просто интерпретируется, как промежутки времени, в течение которых блоки очаговой области, примыкающей к плоскостям (рис. 1), движутся с постоянной скоростью. Второй и четвёртый этапы являются затухающими. Отличие нестационарного пуассоновского потока событий от более детерминированного, порождаемого затухающим движением блока, было решено выявлять по значению коэффициента детерминации R^2 в зависимости $i(\psi)$. Для второго этапа $R^2 = 0.995$. Для выявления особенностей пуассоновского потока с интенсивностью A, затухающей по экспоненциальному закону была составлена компьютерная программа, моделирующая по методу Монте – Карло такие потоки, с характерным временем затухания τ, совпадающим со значением второго этапа. Было «разыграно» 400 реализаций, и лишь в двух случаях значение R^2 оказалось не меньшим значения 0.995. Это указывает на малую вероятность того, что и второй этап КЗ является проявлением Пуассоновского потока.

Не настолько однозначными являются результаты для последующих четырёх этапов. В третьем – пятом этапах, распределение интервалов может рассматриваться, как Пуасоновское, а R^2 шестого этапа составляет 0.979, что также может интерпретироваться как типичное для нестационарного Пуассоновского.

Обсуждение и выводы

Результаты статистического анализа и компьютерного моделирования приводят к следующим выводам: 1. Для афтершоков КЗ характерна этапность. 2. Для двух этапов (первого и второго) интерпретация сейсмического потока, как Пуассоновского является маловероятной. Более вероятным является в большей степени детерминированный поток, порождаемый движением блоков. 3. Поток событий, порождённый во временных рамках оставшихся четырёх этапов может рассматриваться, как Пуассоновский. Последнее может интерпретироваться как следствие того, что по мере развития афтершокового процесса при КЗ события порождаются уже бóльшим числом блоков, движущихся с повышенными по сравнению со стационарным режимом сейсмичности скоростями. Таким образом, **модель движущихся блоков достаточно последовательно может использоваться при интерпретации афтершокового процесса Кроноцкого землетрясения.**

Список литературы.

1 *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. Высш. шк., 1999. 576 с.

2. Каталог сейсмических событий Камчатского филиала ГС РАН www.emsd.ru/ts

3. *Кролевец А.Н.* Иерархическая модель активной геофизической среды. // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 71–80.

4. *Кролевец А.Н.* Процессы релаксации в среде блочного строения. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды VI научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1-7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 281–286 и http://emsd.ru/conf2017lib/mlib3.html

5. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.

6. *Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений. М.: Наука, 1972. 117 с.

7. *Burridge R., Knopoff L.* Model and theoretical seismicity //Bull. Seismol. Soc. of America. 1967. V. 57. N 3. P. 341–371.

8. *Omori F.* On the aftershocks of earthquakes // Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo. 1894. № 7: P. 111–200.

9. *Utsu T.* A statistical study on the occurrence of aftershocks // Geoph.Magazine.1961.V. 30. P. 521–605.