

УДК 519.25 +519.237+ 550.34.01

Научная статья

Степенные закономерности в последовательностях статистически связанных событий, предшествующих главному событию

О. В. Шереметьева

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: olga.v.sheremetyeva@gmail.com

Используя статистическую модель связанных событий и данные сейсмического каталога КФ ФИЦ ГС РАН за период 01.01.1962 – 31.12.2002 ($n = 79283$ события) для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги ($50^\circ - 60^\circ$ с.ш., $156^\circ - 166^\circ$ в.д., классы 4.1 – 16.1, глубины 0 – 600 км) построены последовательности событий, предшествующих главному событию заданной магнитуды и связанных с ним в пространственно-временной области. Проведён статистический анализ наличия степенных закономерностей в этих последовательностях на основании релаксационной модели деформационной активности. Степенные закономерности были выделены только в последовательностях связанных событий, предшествующих главному событию с энергетическим классом меньше 12 (показатель степени 0.5 – 0.7). Это объясняется большим объёмом выборки для главных событий такого класса и небольшой пространственно-временной областью их подготовки, что уменьшает вероятность попадания афтершоков от более крупных событий, предшествующих главному удару, в рассматриваемые последовательности.

Ключевые слова: связанные сейсмические события, форшоковые последовательности, статистическая диффузионная модель, модель процессов релаксации, степенные закономерности.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-102-109

Поступила в редакцию: 28.09.2020

В окончательном варианте: 23.10.2020

Для цитирования. Шереметьева О. В. Степенные закономерности в последовательностях статистически связанных событий, предшествующих главному событию // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2020. Т. 33. № 4. С. 102-109. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-102-109

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Шереметьева О. В., 2020

Финансирование. Работа выполнялась в рамках государственного задания по теме «Динамика физических процессов в активных зонах ближнего космоса и геосфер» (Пер.№ АААА-А17-117080110043-4).

Введение

В работе [1] была представлена модель процессов релаксации в различных режимах деформаций, где основной характеристикой деформационного процесса является фрактальная функция Миттаг-Леффлёра со степенным аргументом, которая определяет замедленную релаксацию [2]. Модель была применена для аппроксимации зависимостей, полученных авторами исследования [3] для афтершоковых последовательностей из сейсмических каталогов для центральной и южной Италии. Варьирование параметров функции Миттаг-Леффлёра позволило также аппроксимировать зависимости, построенные по данным общих каталогов сейсмических событий для тех же областей [3]. Модель процессов релаксации не применялась к форшоковым последовательностям и логическим продолжением работы [1] является выделение форшоковых последовательностей в сейсмических каталогах, поиск степенных закономерностей в этих последовательностях и аппроксимация с помощью функции Миттаг-Леффлёра. В ряде работ исследуются вопросы выделения в сейсмических каталогах форшоковых последовательностей на основании заданных критериев с целью предупреждения сейсмической опасности [4, 5]. В настоящей работе решаются задачи обнаружения в сейсмическом каталоге событий, предшествующих главному удару, на основании диффузионной модели сейсмичности [6, 7] и построения последовательности этих событий, связанных с главным ударом на основании выбранных критериев. Полученные последовательности исследуются с точки зрения релаксационной модели деформационной активности [2] на наличие степенной закономерности.

Критерии выбора событий, связанных с главным ударом

Для определения критериев статистической связанности предшествующих событий с главным ударом в пространстве и во времени используем диффузионную модель сейсмичности [4, 5]. Предшествующие события будем считать связанными с главным в пространстве, если они попадут в область подготовки этого события, радиус R [км] (пространственный масштаб) которой определяется по закону Добровольского [8]

$$R = 10^{0.43 \cdot M_L},$$

где M_L – локальная магнитуда Рихтера, связанная с энергетическим классом сейсмического события соотношением $K = 4.8 + 1.5M_L$ [9].

Связанность во времени попавшего в область Добровольского события с главным ударом задаётся на основании закона Гутенберга-Рихтера. А именно, на временной оси предшествующее событие должно отстоять от главного удара на расстоянии не превышающем временной масштаб t [дни] главного удара,

$$t = T/n,$$

где T – временной период каталога, n – частота событий с выбранной магнитудой (магнитуда главного удара).

Алгоритм построения последовательностей событий, предшествующих главному удару

На основании заданных критериев каталог раскладываем по энергетическим масштабам, выбирая сначала главные удары с максимальной магнитудой для построения последовательностей предшествующих им событий. Событие, для которого построена такая последовательность, исключается из каталога и процесс поиска в каталоге главного события с максимальной магнитудой повторяется.

Пусть в каталоге выбрано событие максимальной энергии с номером j . Рассматриваем предшествующие события с номерами $i = 1, \dots, j - 1$. Предшествующее событие с номером i будем считать статистически связанным с главным событием с номером j , если выполняются условия:

1) расстояние между сейсмическими событиями $|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|$ не превышает пространственный масштаб R события с номером j , т. е. $|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i| \leq R$, где \mathbf{r}_α – радиус-вектор от выбранной точки отсчёта до α -ого события;

2) временной промежуток в днях $(t_j - t_i)$ между парой сейсмических событий не превышает временной масштаб t события с номером j , т. е. $(t_j - t_i) \leq t$, где t_α – время, когда произошло α -ое событие;

3) исходя из релаксационной модели деформационного процесса, события, предшествующие главному удару, должны быть меньшего энергетического масштаба и в свою очередь порождаться ещё меньшими по масштабам событиями, а значит магнитуда события с номером i не превышает магнитуду события с номером j и в данной модели считаем, что она удовлетворяет условию $M_{j-1} \leq M_i \leq M_j$.

Методика обработки и обсуждение результатов

Вышеописанный алгоритм применён к данным сейсмического каталога КФ ФИЦ ГС РАН за период 01.01.1962 – 31.12.2002 ($n = 79283$ события) для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги ($50^\circ - 60^\circ$ с.ш., $156^\circ - 166^\circ$ в.д., классы $K = 4.1 - 16.1$, глубины $h = 0 - 600$ км). Результатом являются последовательности событий, предшествующих главному удару заданной магнитуды и связанных с ним в пространственно-временной области.

В табл. 1 в качестве примера приведены данные о некоторых полученных последовательностях: дата и класс главного удара, количество связанных с ним событий, временная протяжённость последовательности. Отметим, что главные события, разность энергетических классов которых не превышала 0.3, были отнесены к одной группе по энергии.

В табл. 2 выборочно для главных ударов, отнесённых к одной группе по энергии, представлена статистика количества полученных последовательностей, суммарного количества событий в этих последовательностях (объём выборки), временной период, охватываемый последовательностью, и временной масштаб главного удара. Как видно из представленных в таблицах данных, статистика для главных ударов, относящихся к энергетическим классам более 12, включает от 2 – 3 до 30 последовательностей, а этого количества недостаточно для получения достоверных результатов в ходе статистической обработки. Более представительна статистика для главных событий меньших энергетических классов.

Применим к последовательностям, полученным для главных ударов, метод наложения эпох. Главный удар примем как нулевую точку на временной оси, а промежутки времени между главным ударом и предшествующими событиями соответственно будем откладывать в отрицательном направлении. Для главных ударов из одной группы по энергии разобьём временной интервал, на котором расположены все предшествующие им события, на интервалы таким образом, чтобы на каждый интервал попало не менее пяти событий, в противном случае объединяем интервалы. Вычисляем относительную частоту появления событий на каждом интервале.

Таблица 1

Характеристики последовательностей событий

№	Дата главного события	К*	Количество событий в последовательности
1	29/01/1971	16.1	7
2	24/11/1971	15.9	7
3	22/1/1969	15.3	7
4	21/12/1975	15.0	5
5	26/12/1962	15,0	13
6	11/11/1999	13.6	16
7	01/06/1998	13.6	63
8	06/12/1997	13.6	69
9	22/06/1996	13.6	41
10	17/11/1993	13.6	9
11	30/08/1989	13.6	10
12	02/05/1986	13.6	7
13	09/01/1983	13.6	11
14	06/01/1976	13.6	22
15	23/08/1975	13.6	18
16	06/04/1975	13.6	20
17	11/05/1966	13.6	6
18	18/11/1965	13.6	16

*К – энергетический класс главного удара

Таблица 2

Статистики для главных событий заданной энергии

№	К*	Количество последовательностей	Объём выборки	Период времени [дни]
1	16	2	14	3255
2	15	3	25	5015
3	14.5	9	357	1900
4	13.6	13	308	470
5	13.1	23	583	160
6	10.6	302	2938	7

*К – энергетический класс главного события

На рис. 1–3 представлены графики зависимостей частоты появления событий от времени до наступления главного удара в масштабах время/относительная частота и в двойном логарифмическом масштабе. Если в двойном логарифмическом масштабе зависимости аппроксимируются линейной функцией, то можно говорить о наличии степенной закономерности в последовательностях предшествующих событий, связанных с главным ударом. Для главных событий с энергетическим классом 14.5 и 13.1 характерен значительный разброс точек относительно графика линейной аппроксимирующей функции и степенной закономерности не наблюдается (рис. 1 б, 2 б). Для третьего случая, когда $K = 10.6$ (рис. 3), в двойном логарифмическом масштабе точки группируются около графика линейной функции с коэффициентом 0.66 и можно говорить о степенной закономерности в последовательностях событий, предшествующих главному удару данного энергетического класса. Заметим, что такие закономерности наблюдаются для главных ударов, энергетический класс которых меньше 12, и коэффициент аппроксимирующей линейной функции (показатель степени) принимает значения в пределах 0.5–0.7. Также для этих случаев отмечается пик за день до главного удара на графике в масштабах время/относительная частота и уменьшение количества событий на промежутке времени менее одного дня (рис. 3 а).

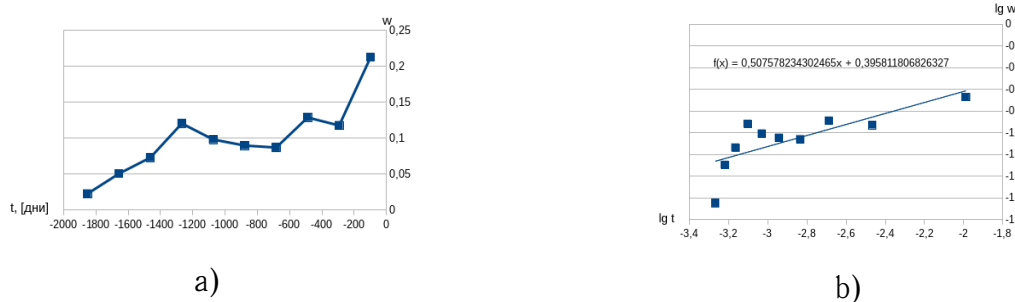


Рис. 1. График зависимости относительной частоты появления событий от времени до наступления главного удара класса $K = 14.5$: а) в масштабах время [дни]/относительная частота, б) в двойном логарифмическом масштабе.

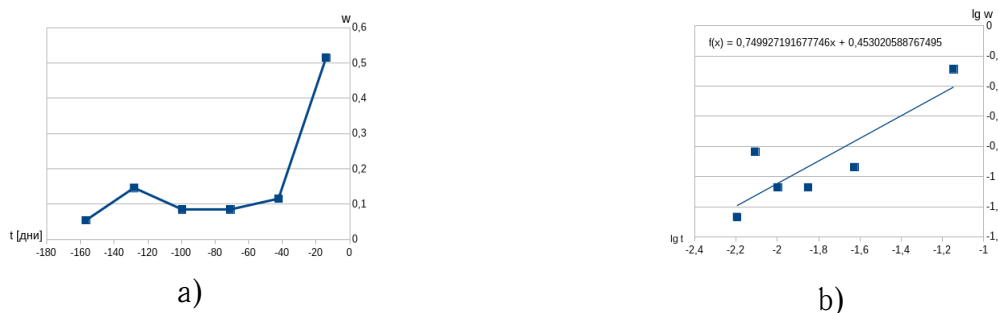


Рис. 2. График зависимости относительной частоты появления событий от времени до наступления главного удара класса $K = 13.1$: а) в масштабах время [дни]/относительная частота, б) в двойном логарифмическом масштабе.

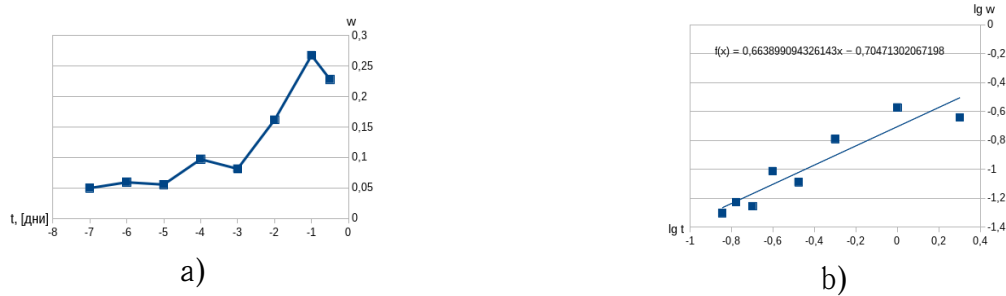


Рис. 3. График зависимости относительной частоты появления событий от времени до наступления главного удара класса $K = 10.6$: а) в масштабах время [дни]/относительная частота, б) в двойном логарифмическом масштабе.

Выводы

Используя каталог КФ ФИЦ ГС РАН за период 01.01.1962 – 31.12.2002 ($n = 79283$ события) для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги ($50^\circ - 60^\circ$ с.ш., $156^\circ - 166^\circ$ в.д., классы 4.1 – 16.1, глубины 0 – 600 км), построены последовательности событий меньшей энергии, предшествующих главному удару заданной магнитуды и связанных с ним в пространственно-временной области. Проведён статистический анализ наличия степенных закономерностей в этих последовательностях на основании релаксационной модели деформационной активности.

Для главных событий, энергетический класс которых меньше 12, в последовательностях связанных с ними событий наблюдаются степенные закономерности со значениями показателя степени 0.5 – 0.7.

Обнаружение степенных закономерностей для главных событий этих энергетических классов объясняется, во-первых, большим объёмом выборки для них, во-вторых, в связи с небольшой энергией главного события пространственно-временная область его подготовки сужается, что уменьшает вероятность попадания в неё афтершоков от более крупных событий состоявшихся ранее.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Автор участвовал в написании статьи и полностью несет ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Список литература/References

- [1] Шереметьева О. В., “Модель процессов релаксации в различных режимах пластических деформаций”, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2018, № 5(25), 74-82. [Sheremet'eva O. V., “Model' protsessov relaksatsii v razlichnykh rezhimakh plasticheskikh deformatsiy”, *Vestnik KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki*, 2018, № 5(25), 74-82 (in Russian)].
- [2] Shevtsov B., Sheremetyeva O., “Fractional models of seismoacoustic and electromagnetic activity”, *E3S Web of Conferences*, **20** (2017), 02013.
- [3] Carbone V., Sorriso-Valvo L., Harabaglia P., Guerra I., “Unified scaling law for waiting times between seismic events”, *Europhys. Lett.*, **71:6** (2005), 1036-1042.
- [4] Малышев А. И., Тихонов И. Н., “Закономерности динамики форшок-афтершоковых последовательностей землетрясений в районе Южных Курильских островов”, *Докл. АН*

- СССР, **319**:1 (1991), 134-137. [Malyshev A. I., Tikhonov I. N., "Zakonomernosti dinamiki forshok-aftershokovykh posledovaetl'nostey zemletryaseniya v rayone Yuzhnykh Kuril'skizh ostrovov", *Dokl. AN SSSR*, **319**:1 (1991), 134-137 (in Russian)].
- [5] Малышев А. И., Малышева Л. К., "Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога USGS", *Геосистемы переходных зон*, **2**:3 (2018), 141-153. [Malyshev A. I., Malysheva L. K., "Prognoziruemost' potoka seysmicheskoy energii severo-zapadnogo obramleniya Tikhogo okeana po dannym kataloga USGS", *Geosistemy perekhodnykh zon*, **2**:3 (2018), 141-153 (in Russian)].
- [6] Шевцов Б. М., Сагитова Р. Н., "Статистический анализ сейсмических процессов на основе диффузионного подхода", *ДАН*, **426**:2 (2009), 254-256. [Shevtsov B. M., Sagitova R. N., "Statisticheskiy analiz seysmicheskikh protsessov na osnove diffuzionnogo podkhoda", *DAN*, **426**:2 (2009), 254-256 (in Russian)].
- [7] Шевцов Б. М., Сагитова Р. Н., "Диффузионный подход в статистическом анализе сейсмичности Камчатки", *Вулканология и сейсмология*, 2012, № 2, 56-66. [Shevtsov B. M., Sagitova R. N., "Diffuzionnyy podkhod v statisticheskom analize seysmichnosti Kamchatki", *Vulkanologiya i seysmologiya*, 2012, № 2, 56-66 (in Russian)].
- [8] Добровольский И. Р., *Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения*, Физматлит, М., 2009, 236 с. [Dobrovol'skiy I. R., *Matematicheskaya teoriya podgotovki i prognoza tektonicheskogo zemletryaseniya*, Fizmatlit, M., 2009 (in Russian), 236 pp.]
- [9] Kasahara K., *Earthquake mechanics*, Cambridge University Press, 1981, 284 pp.

Power-law patterns in sequences of statistically related events preceding to the main event

O. V. Sheremetyeva

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7
E-mail: olga.v.sheremetyeva@gmail.com

Using a statistical model of related events and data from the seismic catalog of the FRC GS RAS for the period 01.01.1962 – 31.12.2002 ($n = 79283$ events) for the subduction zone of the Kuril-Kamchatka island arc ($50^\circ - 60^\circ$ N, $156^\circ - 166^\circ$ E, classes 4.1 – 16.1, depths 0 – 600 km) the sequences of events preceding the main event of a given magnitude and associated with it in the spatio-temporal region are constructed. A statistical analysis of the power laws presence in these sequences was carried out on the basis of the relaxation model of deformation activity. It was possible to obtain power-law patterns in sequences of related events for main events that energy class is less than 12. The exponent takes the values of 0.5 – 0.7. The possibility of detecting of power-law patterns for the main events of such an energy class is explained by a large sample size for them and by a small spatio-temporal region of event preparation that reduces the probability to get the aftershocks from events with larger energy preceding the one under consideration into the sequence of related events.

Key words: related seismic events, foreshock sequences, statistical diffusion model, model of relaxation processes, power laws.

DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-102-109

Original article submitted: 28.09.2020

Revision submitted: 23.10.2020

For citation. Sheremetyeva O. V. Power-law patterns in sequences of statistically related events preceding to the main event. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2020, **33**: 4, 102-109. DOI: 10.26117/2079-6641-2020-33-4-102-109

Competing interests. The author declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. The author contributed to this article. The author is solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by the author.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Sheremetyeva O. V., 2020

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment on the topic "Dynamics of physical processes in active zones of near space and geospheres" (Reg. No. AAAA-A17-117080110043-4).