

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧНОСТИ КАМЧАТКИ НА ОСНОВЕ ДИФФУЗИОННОГО ПОДХОДА

Сагитова Р.Н., Шевцов Б.М.

*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Паратунка,
Камчатский край, raya@ikir.kamchatka.ru*

Введение

Идея создания динамической модели землетрясений на основе единого статистического подхода [1], который широко и эффективно используется в различных областях физики, давно обсуждается в литературе, но она еще очень далека от своей реализации. И трудности здесь как в выборе исходных динамических уравнений, которые бы описывали нелинейные процессы разрушения, так и в построении статистической модели их коэффициентов.

Тот факт, что лишь небольшая часть теплового потока Земли преобразуется в акустические колебания, создаваемые землетрясениями [1], говорит о том, что сейсмические явления можно описывать в диффузионном приближении. Этот подход успешно используется для описания геофизических процессов [2], в том числе и сейсмических [3]. Хорошо известно их представление в виде процесса случайных блужданий на фрактальном множестве [3, 4], которым является геологическая среда [2]. Представляет интерес рассмотреть последовательность камчатских землетрясений как процесс случайных блужданий и определить его характеристики. Как будет показано ниже такое представление эквивалентно разложению по пространственным и временным масштабам, что может быть использовано в развитии динамической теории сейсмичности.

Методика анализа сейсмических событий

Связанность сейсмических событий проявляется, например, в последовательностях форшоков и афтершоков, в возникновении зон затишья и активизации землетрясений, в их пространственной и временной периодичности. Так или иначе, все это обусловлено спецификой геодинамических процессов, но внешне связанность выступает как корреляция событий на определенных пространственных и временных масштабах. Встает вопрос, как их определить в зависимости от энергии события.

Временной масштаб нетрудно оценить из закона повторяемости землетрясений. Обратная частота событий и будет искомая величина. В качестве пространственного масштаба можно взять, например, радиус влияния Добровольского $R = 10^{0.42 \cdot M}$ [5], где M – магнитуда события. Разумеется, это не единственно возможная, но вполне достаточная оценка.

В определенную таким образом зону влияния может попадать огромное число событий, среди которых необходимо провести отбор. Выше при выборе радиусов влияния был использован энергетический критерий, его же используем и на данном этапе – будем оставлять для дальнейшего рассмотрения землетрясение с максимальной энергией.

Если такое событие в зоне влияния находится, то рассмотрение связанности продолжается, а если нет, то останавливается. В результате такой процедуры анализа землетрясений будет выстраиваться марковская цепь случайных событий, которая описывает процесс случайных блужданий. Его еще называют броуновским движением, пространственная плотность вероятности которого описывается уравнением диффузии, поэтому такие процессы еще именуется диффузионными.

Построение цепей Маркова можно начинать с любого события в каталоге. Повторы укороченных фрагментов цепей нетрудно исключить вычеркиванием использованных событий. В результате такого построения не возникает ветвлений, что облегчает вычисления. Землетрясений объединяется в цепочки, под которыми подразумеваются группы из трех и более событий, удовлетворяющих указанным выше критериям.

Вычисления устойчивы, если в область влияния попадает событие, сопоставимое с предыдущим или большее по энергии. Если меньше, то область влияния резко стягивается и наиболее вероятно оказывается пустой, процесс вычисления останавливается, а цепочка прерывается.

Для статистического анализа был использован каталог землетрясений Камчатского филиала ГФ ГС РАН. Рассматривались события не меньше восьмого класса. Процесс построения цепочек запускался, начиная с каждого события в каталоге. Цепочки событий строились по принципу выбора наиболее энергичного события в пределах радиусов влияния из числа событий, попавших туда.

Каждая из таких цепочек может рассматриваться как случайным образом возникающий, блуждающий и исчезающий объект. Ниже будут рассмотрены статистические характеристики, как отдельных цепочек, так и их ансамбля.

Результаты статистического анализа

1. Сейсмические события делятся на связанные и одиночные.
2. На долю связанных сейсмических событий приходится около четверти каталога землетрясений.
3. Связанные события образуют независимые между собой цепочки.
4. Длина полученных цепочек варьируется от 3 до 55 событий.
5. В каждой из цепочек реализуется процесс случайных блужданий.
6. Одиночные события можно рассматривать как цепочки минимальной длины.
7. В итоге статистического анализа получено представление сейсмического процесса в виде ряда последовательностей с различными пространственно-временными и энергетическими масштабами.

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлены 3 цепочки, которые образовались у побережья Камчатки, из них две продолжительные по времени, охватывающие почти весь каталог землетрясений, и одна короткая.

Цепочки будем характеризовать номером, под которым она появилась при выделении ее из каталога, количеством звеньев, временем начала и конца ее существования (в последовательности: год, месяц, день), положением среднегеометрического центра блуждания, средним радиусом блуждания и суммарной энергией.

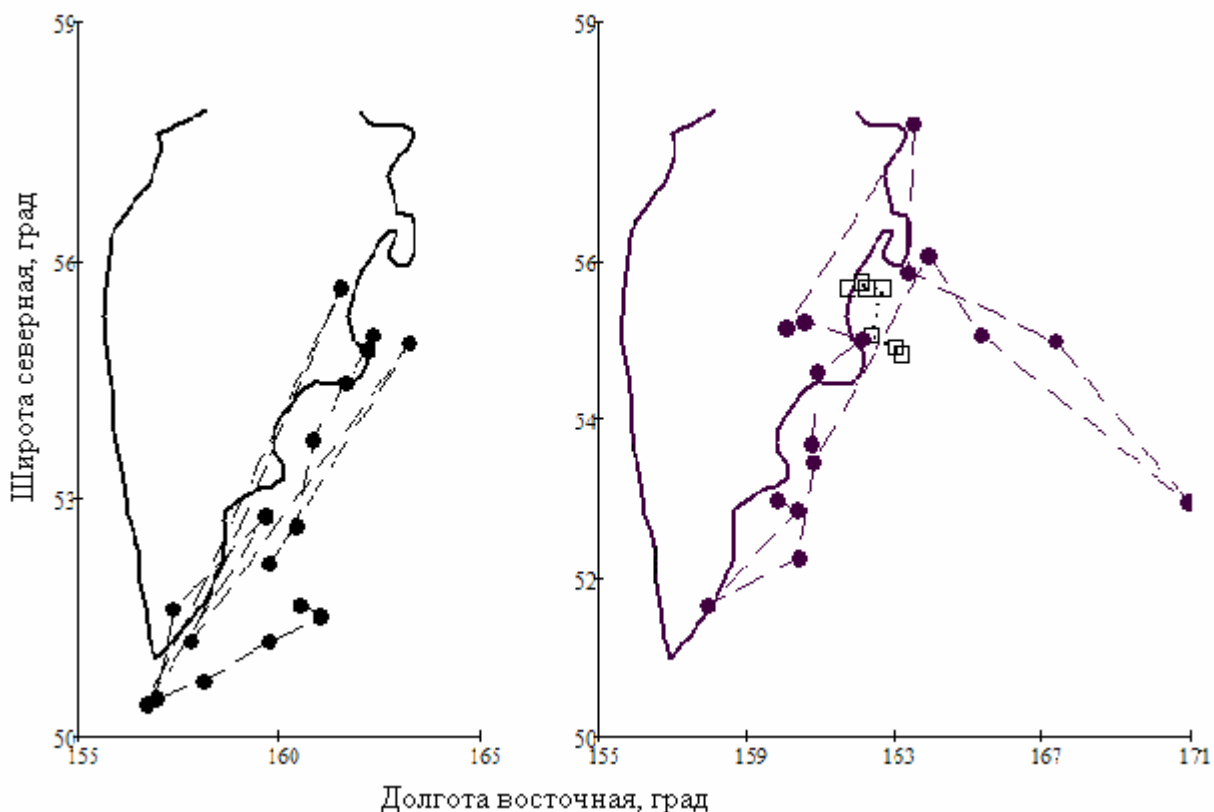


Рис. 1. Примеры цепочек: **а** – из 18 событий за период 1962.1-2002.12 гг., **б** – из 17 событий за 1962.4-2002.12 гг. (кружки) и из 7 событий за 6 месяцев 1962 г. (квадраты).

Рис. 2 иллюстрирует характер блужданий в цепочке, представленной на рис. 1а. Видно, как менялась длина пролета в цепочке в зависимости от номера события: колебательный процесс сначала развивался, а затем затухал, после чего цепочка прекратила существование, когда создавший ее локальный геодинамический процесс закончился. Такое поведение с осцилляциями характерно для всех цепочек, отличия могут быть только в числе гармоник и периодов колебаний.

Примечательно то, что изображенные на рис. 1 а и б продолжительные цепочки, существовавшие в одно время, сгруппировались в различных районах. Это указывает на то, что их сформировали пространственно разнесенные геодинамические процессы, масштабы которых составляют сотни километров. Короткая по времени цепочка имеет размер на порядок меньше, к тому же она выглядит как вложенная в более крупное образование.

Это по структуре напоминает многомасштабную турбулентность, а сейсмические события в ней представляются как блуждающие маркеры. Видно, что случайное блуждание реализуется неравномерно: "топтания" в ограниченной области сменяются длинными пролетами, которые называются полетами Леви. Такое поведение характерно для супердиффузии [6,7] на фрактальном пространстве [2].

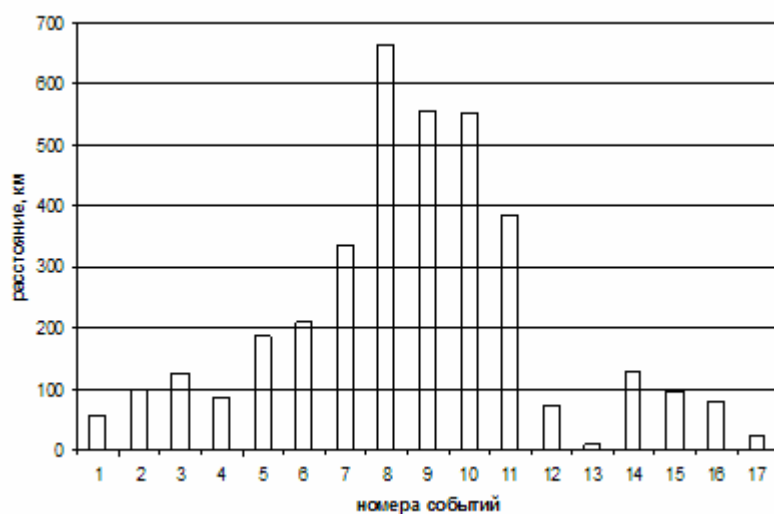


Рис. 2. Зависимость расстояния между событиями от номера пары в цепочке, представленной на рис. 1а.

На рис. 3 приведены три примера частотных распределений по длинам пролетов в цепочках. По оси X отложена длина пролета в км, а по оси Y – количество событий N в заданном интервале длин. Рис. 3а соответствует самой длинной цепочке из 56 звеньев, однако малая статистика даже в этом случае, к сожалению, не позволяет получить более гладких распределений. Их формы получаются весьма разнообразными. Встречаются такие распределения, в которых есть звенья с наиболее вероятной длиной, но при этом имеются короткие и длинные пролеты.

О длинных пролетах было сказано выше, а короткие звенья рассматриваются как пленение блужданий, что характерно для субдиффузии. Например, есть цепочки с почти нулевыми пролетами. Таким образом, процессы блужданий в цепочках по характеру распределений пролетов представляют собой обобщенные броуновские движения.

Скорее всего, распределения по длинам пролетов в цепочках отображают природу геодинамических процессов, которые отвечают за их образование. А каким образом, это еще предстоит выяснить.

Заключение

С использованием гипотезы связанности землетрясений осуществлено разложение сейсмического процесса на множество последовательностей, каждая из которых представляет собой процесс марковского типа с определенными пространственно-временными и энергетическими масштабами.

Такое представление аналогично масштабному разложению в теории турбулентности и может быть полезным при построении динамической модели землетрясений.

Разложение по цепочкам дает компактное представление каталога землетрясений и может использоваться для иллюстрации характеристик сейсмического полигона.

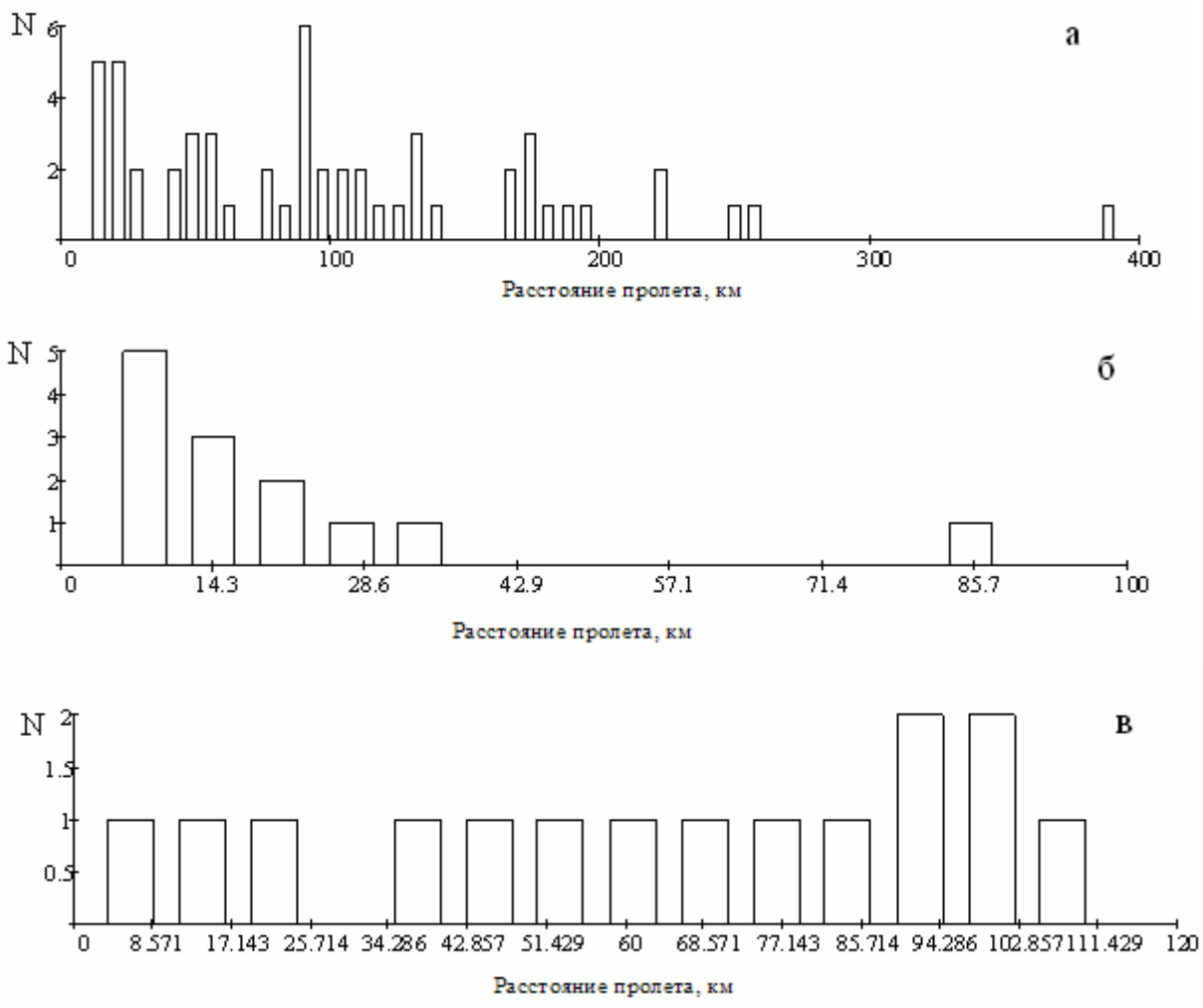


Рис. 3. Примеры частотных распределений по длинам пролетов в трех цепочках: а – за период 1965.8.27-1999.4.20, б – 1995.12.11-1997.1.27, в – 1992.3.14-1995.5.22.

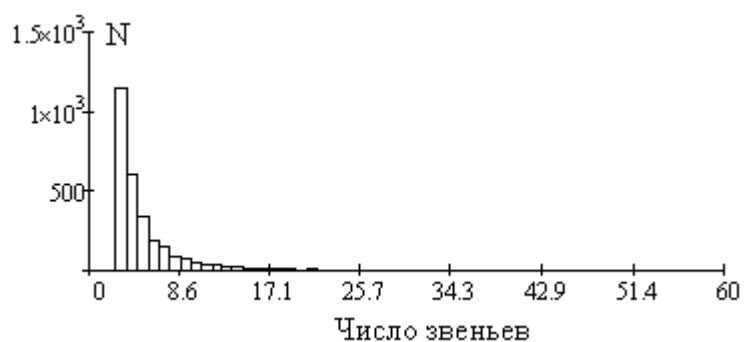


Рис. 4. Частотное распределение цепочек по количеству звеньев в них.

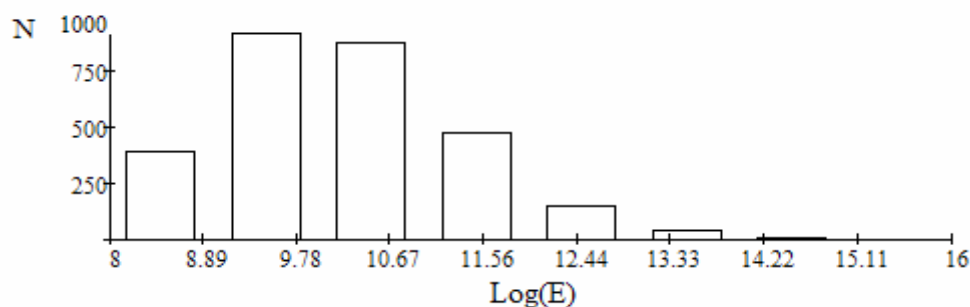


Рис. 5. Частотное распределение цепочек по их суммарным энергиям.



Рис. 6. Частотное распределение цепочек по их средним радиусам блужданий.

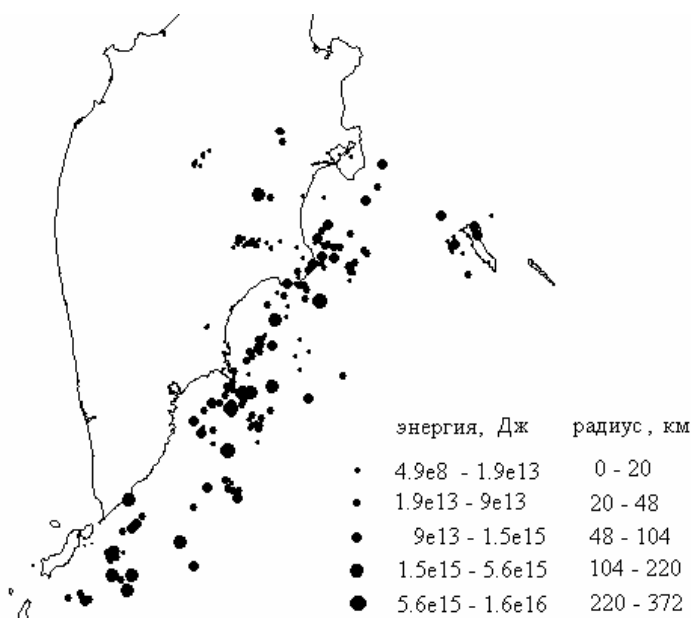


Рис. 7. Положение цепочек, их средние радиусы блуждания и суммарные энергии за период 1962 – 1965 гг.

Список литературы

1. Голицын Г.С. Место закона Гуттенберга-Рихтера среди других статистических законов природы // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности (Вычислительная сейсмология, вып. 32). М.:ГЕОС, 2002. С. 138-161.
2. Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
3. Helmstetter A., Sornette D. Sub-critical and Super-critical Regimes in Epidemic Models of Earthquake Aftershocks <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0109318>
4. Учайкин В.В. Автомодельная аномальная диффузия и устойчивые законы. // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 8. С. 848-876.
5. Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. // Pageoph. 1979. V. 117. P. 1025-1044.
6. Saichev A.I., Zaslavsky G.M. Fractional kinetic equations: solutions and applications. // Chaos. 1997. V. 7. № 4. P. 753-764.
7. Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 288 с.