

УДК 550.34.01

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ДИФФУЗИОННОГО ПОДХОДА

© 2009 г. Б. М. Шевцов, Р. Н. Сагитова

Представлено академиком Г.С. Голицыным 16.12.2008 г.

Поступило 17.12.2008 г.

На основе диффузионного подхода выполнен статистический анализ сейсмичности с целью выявления особенностей, характерных для процессов случайного блуждания. Согласно гипотезе о связанности землетрясений и энергетического критерия осуществлено разложение сейсмического процесса на множество последовательностей, каждая из которых представляет собой броуновский процесс с определенными пространственными, временными и энергетическими масштабами. Построены статистические распределения последовательностей по числу членов, суммарным энергиям, расстояниям, времени и скоростям пролета между событиями.

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 заключаются как в выборе исходных динамических уравнений, которые описывали бы нелинейные процессы разрушения, так и в построении статистической модели их коэффициентов.

Тот факт, что лишь малая 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, в том числе и сейсмических. Хорошо известно их представление в виде процесса случайных блужданий на фрактальном множестве, каковым является геологическая среда [2]. Интересно рассмотреть последовательность землетрясений как процесс случайных блужданий и определить его характеристики. Как будет показано, такое представление эквивалентно разло-

жению по пространственным и временным масштабам и может быть использовано в динамической теории сейсмичности.

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, это обусловлено спецификой геодинамических процессов, но внешне связанность выступает как корреляция событий на определенных пространственных и временных масштабах. Проблема состоит в том, как определить эти закономерности в зависимости от энергии события.

Временной масштаб нетрудно оценить из закона повторяемости землетрясений. Величина, обратная частоте событий, и будет искомым. В качестве критерия для пространственного масштаба можно взять, например, радиус влияния Добровольского $R = 10^{0.42M}$ [3], где M – магнитуда события. Разумеется, это не единственно возможная, но достаточная оценка.

Выбранный пространственный радиус влияния – по сути энергетический критерий, поэтому из всех удовлетворяющих пространственному и временному критериям 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 каталога землетрясений получаются марковские цепи случайных событий, которые описывают процесс случайных блужданий. Этот процесс можно интерпретировать как броуновское движение (диффузионный процесс), пространственная плотность вероятности которого описывается уравнением диффузии.

Землетрясения объединяются в цепочки, под которыми подразумеваются группы из трех и более событий, удовлетворяющих указанным выше критериям. Процесс построения цепочек запускался, начиная с каждого события в каталоге. Вычисления устойчивы, если в область влияния

*Институт космофизических исследований
и распространения радиоволн
Дальневосточного отделения
Российской Академии наук,
с. Паратунка Камчатской обл.*

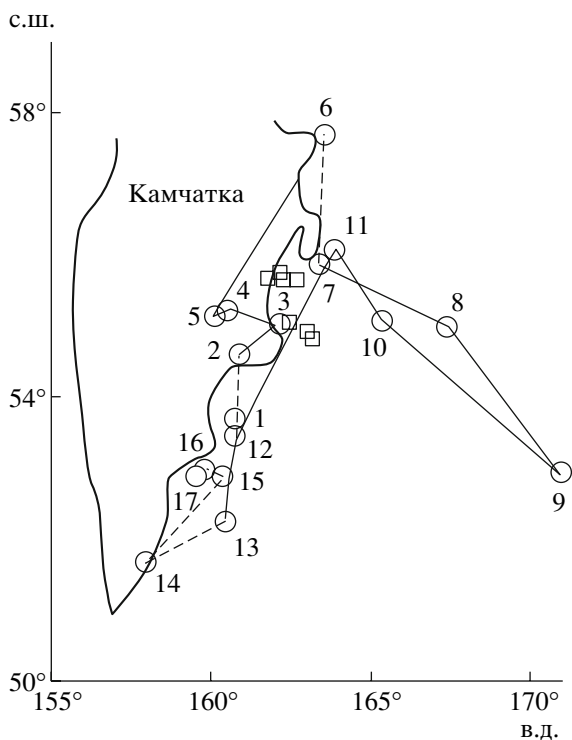


Рис. 1. Примеры цепочек из 17 камчатских событий за период с апреля 1962 г. по декабрь 2002 г. (кружки, пронумерованные цифрами по направлению блуждания) и из 7 событий за 6 месяцев 1962 г. (квадраты).

попадает событие, сопоставимое с предыдущим или большее по энергии. Если энергия события меньше, то область влияния резко стягивается и наиболее вероятно оказывается пустой, процесс вычисления останавливается, а цепочка прерывается. 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. Для статистического анализа были использованы каталоги землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН и Японского метеорологического агентства. Рассматривались события не меньше восьмого класса для камчатского каталога и с магнитудой выше 3.1 для японского.

Результаты статистического анализа следующие:

сейсмические события делятся на связанные и одиночные;

на долю связанных сейсмических событий приходится около четверти каталога землетрясений;

связанные события образуют статистически независимые между собой цепочки;

длина полученных цепочек варьируется от 3 до 56 событий для Камчатки и до 61 события в японском каталоге;

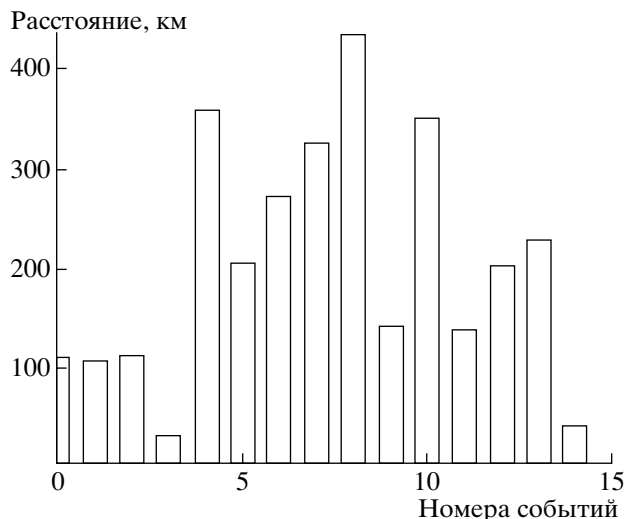


Рис. 2. Зависимость расстояния между событиями от номера пары в цепочке, представленной на рис. 1.

в каждой из цепочек реализуется процесс случайных блужданий;

одиночные события можно рассматривать как цепочки минимальной длины;

в итоге статистического анализа получено представление сейсмического процесса в виде ряда последовательностей с различными пространственно-временными и энергетическими масштабами.

На рисунке 1 представлены две цепочки, которые образовались у побережья Камчатки, одна продолжительная по времени, охватывающая почти весь каталог землетрясений, другая короткая. Цепочки будем характеризовать количеством звеньев, временем начала и конца их существования, положением среднегеометрического центра блуждания, средним радиусом блуждания и суммарной энергией.

Рисунок 2 иллюстрирует характер блужданий в цепочке, представленной на рис. 1. 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 колебаний. Можно сделать вывод о том, что цепочка является отображением нестационарного процесса.

Примечательно то, что продолжительные цепочки существовали в одно время, но сгруппировались в различных районах. Это указывает на то, что их сформировали пространственно разнесенные геодинамические процессы, масштабы которых составляют сотни километров. Корот-

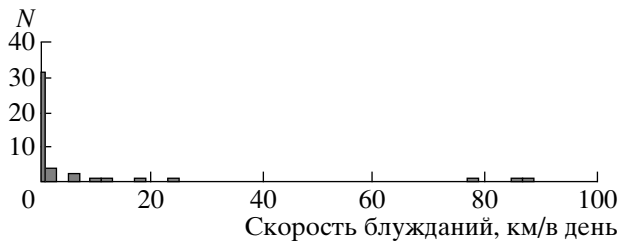


Рис. 3. Частота распределения по скоростям блужданий в цепочке за период с августа 1965 г. по ноябрь 2002 г. N – число событий.

кие по времени цепочки охватывают площадь на порядок меньше и выглядят как вложенные в более крупные образования.

Такие вложения по структуре напоминают многомасштабную турбулентность [1], а сейсмические события в ней представляются как блуждающие маркеры. Видно, что случайное блуждание реализуется неравномерно: “топтания” в ограниченной области сменяются длинными пролетами, которые можно рассматривать как полеты Леви [2]. Такое поведение характерно для супердиффузии на фрактальном пространстве.

На рисунке 3 показан пример частотного распределения по скоростям блужданий в цепочках. Приведена самая длинная цепочка камчатского каталога из 56 звеньев, однако малая статистика даже в этом случае, к сожалению, не позволяет получить более гладких распределений.

Характерные скорости блужданий в цепочках соответствуют скоростям медленных деформационных (тектонических) волн [4], однако имеют место и сильные выбросы, которые, видимо, соответствуют полетам Леви. Поэтому распределение на рис. 3 двухмасштабное. Длинные и короткие последовательности различаются по своим характеристикам. В коротких цепочках радиусы блуждания, скорости и суммарная энергия меньше.

На рисунке 4 приведен пример блужданий событий из японского каталога, показаны две цепочки с различными временными и пространственными масштабами. Как и в случае с камчатскими землетрясениями, в цепочки уходит примерно четверть событий из японского каталога. Таким образом, камчатские и японские разложения по масштабам аналогичны в общих чертах, а различаются лишь в параметрах разложения.

Надо отметить запутанный рисунок блужданий в цепочках, но при этом имеет место достаточно устойчивая корреляционная связь между парами событий. Иногда они выстраиваются в протяженную линию (события 1–3 или 16–18 на рис. 4), а иногда перепрыгивают между двумя удаленными областями (события 10–12). Все это обу-

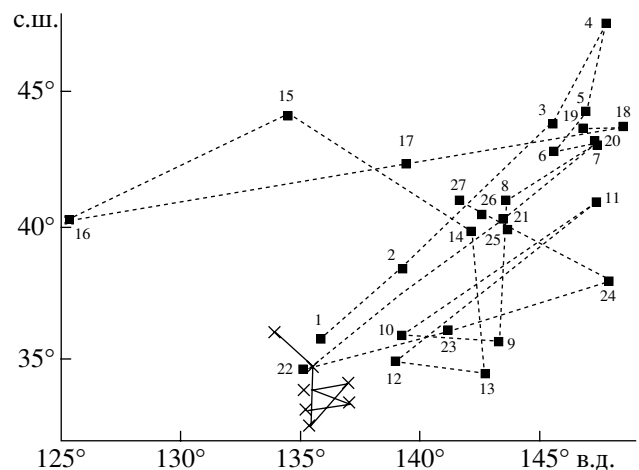


Рис. 4. Пример двух цепочек из японского каталога: квадраты – 27 событий за период с марта 1963 г. по сентябрь 1995 г., крестики – 7 событий за 4 месяца 1983–1984 гг.

словлено особенностями геодформаций и процессов разрушения в земной коре, лучшему пониманию которых, надеемся, и будет способствовать предложенный статистический анализ землетрясений.

Таким образом, с использованием гипотезы связанности землетрясений осуществлено разложение сейсмического процесса на множество последовательностей, каждая из которых представляет собой процесс марковского типа с определенными пространственными, 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 16, часть 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голицын Г.С. // Вычисл. сейсмология. 2002. В. 32. С. 138–161.
2. Лукк А.А., Децеровский 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. Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I. // Pageoph. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
4. Николаевский В.Н. // Вестн. ОГГГН РАН. 2001. № 1. С. 1–17.