

УДК 550.34.01

ДИФFUЗИОННЫЙ ПОДХОД В СТАТИСТИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ СЕЙСМИЧНОСТИ КАМЧАТКИ

© 2012 г. Б. М. Шевцов, Р. Н. Сагитова

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034 Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, e-mail: raya@ikir.ru*

Поступила в редакцию 08.10.2008 г.

На основе диффузионного подхода построена статистическая модель сейсмичности и выполнен анализ камчатских землетрясений с целью выявления особенностей в изменениях, характерных для процессов случайного блуждания. С использованием гипотезы связанности событий и энергетического критерия осуществлено разложение каталога землетрясений на множество последовательностей, каждая из которых представляет собой броуновский процесс с определенными пространственными, временными и энергетическими масштабами. Построены статистические распределения последовательностей по числу их членов и суммарным энергиям, а также распределения в последовательностях по расстояниям, времени и скоростям пролета между событиями. Обсуждаются нелокальные свойства и эффекты памяти в особенностях случайных блужданий при различных условиях.

ВВЕДЕНИЕ

Идея создания динамической модели землетрясений на основе статистического подхода [Голицын, 2001], который широко и эффективно используется в различных областях физики, давно обсуждается в литературе, но 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.

Как правило, малая часть теплового потока Земли и энергии геодинамических процессов в регионе преобразуется в локальные разрушения и акустические колебания, возникающие при землетрясениях [Голицын, 2001]. Это говорит о том, что сейсмические явления можно рассматривать как слабые флуктуации и описывать в рамках диффузионного приближения [Голицын, 2001; Лукк и др., 1996]. Чтобы пояснить эту мысль, сопоставим пространственные масштабы землетрясения с заданной энергией: размер его очага и радиус области влияния, в которой сбрасываются напряжения, с размером региона, в котором развивается геодинамический процесс. Последний масштаб обычно значительно превосходит два первых, за исключением редких случаев катастрофических землетрясений, у которых радиус зоны влияния сравним с размерами региона. Для таких событий применимость обсуждаемого представления нарушается.

Сейсмическое событие состоит из дислокационного смещения в очаге и сброса напряжений в области влияния. Диффузионное описание мо-

жет быть применено к любому из этих двух связанных изменений в среде, если выполняется критерий малости их приращений, обсуждавшийся выше.

Но возникает важный вопрос при статистическом описании: можно ли эти приращения считать независимыми? Зависимость может возникнуть, как по времени, так и по пространству. В первом случае, когда имеют место эффекты памяти, процесс называется немарковским. Во втором случае, когда проявляются дальние корреляции, процесс называется нелокальным. В данной работе будут рассмотрены оба вида зависимостей.

В случае малости приращений описание немарковских и нелокальных процессов сводится к приближению, математическим аппаратом которого являются дифференциальные уравнения диффузионного типа в дробных производных [Учайкин, 2003; Metzler, Klafter, 2000; Saichev, Zaslavsky, 1997].

Диффузионный подход используется для описания геофизических процессов [Лукк и др., 1996], в том числе и сейсмических [Голицын, 2001]. Возможно представление диффузионных процессов с памятью и нелокальностью в виде случайных блужданий на фрактальном множестве [Заславский, 2004]. При этом свойства среды определяют характер блужданий и показатели дробности диффузионных уравнений.

В случае фракталов флуктуации среды представлены степенными корреляционными функциями по времени и пространству. Свойства памяти и нелокальности проявляются, когда корреляционные функции медленно спадают, при этом

и возникают эффекты аномальных запаздываний и дальних корреляций.

Если имеют место эффекты статистической зависимости изменений, то процесс блужданий называется обобщенным броуновским движением, для которого наряду с обычными перескоками характерны топтания на месте с возвратами и затяжные пролеты, называемые “полетами Леви” [Заславский, 2004; Лукк и др., 1996; Учайкин, 2003; Metzler, Klafter, 2000]. Топтания представляют режим субдиффузии, связанный с памятью в системе, а полеты — случай супердиффузии, обусловленной нелокальностью. Аномальное поведение блужданий является характерным признаком их статистической связанности. А смена режимов блужданий говорит об изменениях свойств среды и напряжений.

Топтания в некоторых приложениях, например, в теории диффузии вещества в пористых средах, ассоциируются с наличием ловушек, которые объясняют прилипаниями молекул к стенкам пор, что и приводит к сильным запаздываниям. А значение “полетов Леви” — свободный пролет молекул через поры.

В пластических процессах скорость движений в дислокациях меняется в широких пределах относительно среднего значения. Замедления и ускорения можно рассматривать как отклонение от нормального режима. В ансамбле дислокаций в условиях близких к критическим могут возникать коллективные явления с памятью или нелокальностью. В зависимости от того, которые из них преобладают, меняется и характер процесса.

В работе [Helmstetter, Sornette, 2002], согласно представлениям теории критических явлений, отклонения от нормального поведения сейсмичности именуется как суб- и суперкритические режимы землетрясений. В рамках теории пластичности это ассоциируется с усилением вязких и хрупких процессов, а с точки зрения статистической теории это — проявления аномальных запаздываний и дальних пространственных корреляций. В диффузионных уравнениях при этом начинают играть значимую роль слагаемые с дробными временными и пространственными производными.

“Полеты Леви” в сейсмичности, как следствие дальних корреляций, проявляются при формировании трещин или разломов, а сильные запаздывания и топтания на месте с возвратами — в афтершоках (закон Омори), акустическом затишье (эффект Кайзера) и сейсмических брешах [Федотов, 1968]. В рое землетрясений на смену первому режиму приходит второй, что связано с изменением свойств среды и напряжений.

Сложность описания пластических процессов обусловлена их самовоздействием. Разрушения меняют свойства среды, в том числе и ее фрак-

тальные характеристики, в результате чего меняются корреляционные функции неоднородностей среды, а те, в свою очередь, влияют на показатели дробности уравнений и характер пластического процесса.

Если фрактальность среды и показателей дробности уравнений достигают критических значений, то возникает явление самоорганизованной критичности и, как результат, развитие разрушений. При этом, как и в любой нелинейной системе, происходит взаимодействие между масштабами. Это свойство разрушений используется, например, для прогноза землетрясений [Shebalin, 2006].

Диффузионный подход позволяет для описания сейсмичности использовать математический аппарат, развитый в статистической теории. Но чтобы иметь на то основания, необходимо рассмотреть последовательность землетрясений как процесс случайных блужданий с целью исследования в нем свойств связанности, эффектов памяти и нелокальности. Как будет показано ниже, такое представление сейсмичности эквивалентно разложению по пространственно-временным и энергетическим масштабам, что может быть использовано при построении статистической теории пластичности и разрушений.

Следует, однако, принять во внимание, что статистики в сейсмических каталогах, тем более в их частях, связанных с критическими режимами, недостаточно, чтобы строить гладкие статистические распределения с переменными во времени и пространстве коэффициентами. Поэтому для анализа связанности, а также эффектов памяти и нелокальности в сейсмичности требуется построение модели процесса, позволяющей исследовать коллективные явления, хотя бы на уровне параметрических оценок. Этот подход принципиально отличается от использования искусственных каталогов землетрясений [Helmstetter, Sornette, 2002], поскольку основан только на данных наблюдений.

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 пластических процессов, но внешне связанность выступает как корреляция событий на определенных пространственных и временных масштабах. Встает вопрос, как определить зависимость этих масштабов от энергии события?

Для оценки масштаба по времени можно использовать обратную величину частоты повторяемости событий, которую нетрудно найти при заданной энергии события из закона Гуттенберга-Рихтера. Заметим, что среднее время ожидания бесконечно в случае аномального запаздывания и не равно обратной частоте повторяемости, поэтому использование его в качестве временного масштаба некорректно.

В случае дальних корреляций пространственный радиус корреляции бесконечен, поэтому его, как и среднее время ожидания использовать нельзя.

Пространственный масштаб можно оценить через радиус зоны влияния, в качестве которой можно использовать неоднородность среды [Dobrovolsky et al., 1979; Добровольский, 2009], область разрушений или дилатансии [Алексеев и др., 2001], область, соизмеримую с очагом землетрясения [Шебалин, 2005, 2006; Shebalin, 2006], область, ограниченную расстоянием, на котором уровень деформаций уменьшается до заданного значения [Пережогин и др., 2007].

Очевидно, что размеры этих областей связаны между собой и зависят от энергии землетрясения. Для оценок пространственного масштаба выбор одной из них особого значения не имеет, поэтому используем, например, радиус зоны влияния Добровольского, поскольку для него есть удобная формула: $R = 10^{0.43M}$ км [Dobrovolsky et al., 1979], где M – локальная магнитуда Рихтера, связанная с энергетическим классом K соотношением $K = 4.8 + 1.5M$ [Касахара, 1985].

Более строго пространственная зона влияния землетрясения, которая в общем случае не имеет сферической формы, может быть найдена по заданному уровню деформаций, например, приливных, с помощью моделирования [Пережогин и др., 2007]. При таком последовательном подходе, учитывающем не только энергию события, но и свойства среды, результаты, которые будут рассмотрены ниже, разумеется, могут быть скорректированы. Однако столь детальный анализ выходит за рамки данной статьи, в которой будут рассмотрены лишь основные принципы построения модели случайных блужданий.

Для любого сейсмического события в зависимости от его энергии с помощью пространственного и временного масштабов, определенных выше, и с соблюдением принципа причинности будем находить ему партнеров, которые могут быть им инициированы. Будут рассматриваться те землетрясения, которые находятся в непосредственной пространственно-временной близости и в будущем по отношению к исходному событию.

Суть алгоритма вычислений заключается в следующем. Вокруг каждого из событий можно построить четырехмерный эллипсоид с осями,

равными пространственным и временному радиусам влияния. Те события, которые попадают в часть эллипсоида, обращенную в будущее, могут быть инициированы исходным событием. Так устанавливается возможная причинно-следственная связь в последовательности событий. Далее можно исследовать ветвление процесса или ограничиться рассмотрением только главной энергетической ветви. Последний подход предпочтительней, поскольку сильные события доминируют по энергии и имеют наибольшие радиусы влияния.

Заметим, что эллипсоид может быть усечен дневной поверхностью, если глубина землетрясения меньше радиуса влияния. Будем выбирать в его хронологической части, т. е. в той, которая обращена в будущее, событие с максимальной энергией, у которого радиусы влияния наибольшие, а значит, на наибольшем интервале времени и расстоянии от выбранного события будет производиться поиск следующего партнера. Процесс вычислений запускается с первого события в каталоге, чтобы охватить его целиком. На каждом шаге вычислений рассмотрение связанности продолжается вокруг события с максимальной энергией, а если зона влияния пуста, то процесс останавливается.

В результате анализа всего каталога с помощью данного алгоритма землетрясения объединяются в цепочки, под которыми подразумеваются группы из трех и более событий, удовлетворяющих указанным выше критериям. Связанная пара событий, представляющая собой лишь одно звено, в качестве цепочки не рассматривалась. Собранные в цепочку события вычеркиваются из каталога, и вычисления повторяются.

Построенный по предложенной схеме алгоритм в общих чертах работает следующим образом. Вначале он связывает в цепочку события с нарастанием по их энергиям, потом начинает выбирать крупные землетрясения, а когда они заканчиваются, происходит опускание по энергиям событий. У событий с малой энергией радиус влияния мал, и в зоне их влияния может не оказаться ни одного события. Тогда вычисления и останавливаются.

Основной вклад в суммарную энергию цепочки дают крупные землетрясения. Они в процессе блуждания, который реализуется в цепочке, соответствуют перескокам на большие расстояния по истечению длительных интервалов времени, а слабые землетрясения – малым перемещениям через короткие промежутки времени. Такое поведение блужданий соответствует разложению по масштабам. Каждая из цепочек может рассматриваться как случайным образом возникающий, блуждающий и исчезающий объект.

При запуске вычислений не с первого события в каталоге, а с любого другого недалеко от начала, цепочки будут повторяться в целом, но не в деталях. Это обусловлено хаотическими свойствами сейсмичности, выступающими как проявление в упругих колебаниях нелинейного динамического процесса разрушений [Kagan, 1994]. При выделении цепочки событий из каталога с помощью предложенного алгоритма получается хаотическая последовательность, в которой возникает неустойчивость, связанная с изменением начальных условий [Заславский, 2004]. Это одно из свойств хаотических процессов.

Поскольку нет повторяемости при нахождении цепочек, об устойчивости работы алгоритма можно говорить лишь в статистическом смысле, да и то, только для цепочек с событиями низких энергий. Ведь число цепочек с сильными событиями невелико, и только с уменьшением энергии в цепочках их число возрастает.

Число членов в цепочках не превышает 56 событий, поэтому статистика в отдельных цепочках непредставительна, но их длина вполне может быть использована в качестве характеристики связанности каталога на различных пространственно-временных и энергетических масштабах.

Если алгоритм разложения в цепочки запускать далеко не с начала каталога или отфильтровать каталог каким-то образом, опустив, например, в нем форшоки и афтершоки, то и разложения будут заметно трансформироваться. Препарирование каталога приводит к утрате деталей истории сейсмического процесса. Так, при сокращении каталога, что эквивалентно изъятию крупных масштабов, начнут укорачиваться и исчезать цепочки с событиями больших энергий. А если не рассматривать малые энергетические классы, их удаление из каталога эквивалентно сглаживанию, то исчезнут цепочки слабых событий. Это говорит о том, что представление каталога землетрясений в виде цепочек эквивалентно масштабному разложению.

Возникновение цепочек определяется связанностью событий, которая обусловлена перекрытием четырехмерных областей влияния землетрясений. Если их стянуть к гипоцентрам и моментам времени возникновения землетрясений, то каталог распадется на независимые события. Но пространственно-временные масштабы — не искусственно настраиваемые параметры разложения, а являются величинами, которые определяются характеристиками среды и самим сейсмическим процессом. Масштабы, на которых устанавливается связь между событиями, определяются на основании хорошо известных соотношений: формулы Добровольского и закона Гуттенберга-Рихтера.

В нашем подходе и в работах [Шебалин, 2005, 2006; Shebalin, 2006] при построении цепочек общим является критерий пространственной бли-

зости между событиями. Однако цели построений различные, поэтому и соотношения во времени между событиями существенно отличаются. В наших цепочках выявляется причинно-следственная связь между событиями, а в цепочках Шебалина такой связи нет. В них по количеству почти одновременных событий в линейных конструкциях оценивается пространственный радиус корреляции. То, что он отличается от масштаба и стремится к бесконечности в критических условиях, было сказано выше. Термин “почти одновременные события” означает, что они должны рассматриваться в пределах интервала времени, который не превышает временной масштаб, определяемый энергиями событий в цепочке, поэтому пары событий в цепочках Шебалина и не имеют причинно-следственной связи. Такие цепочки, по существу, являются почти одновременной перфорацией среды, по длине которой и оценивается пространственный радиус корреляции и дается прогноз масштаба разрушений.

Но как можно оценить время ожидания событий в цепочке? В работе [Shebalin, 2006] интервал времени, который называется временем наблюдения, не масштабируется (см. первое предложение на стр. 337). Но на наш взгляд, масштаб этого интервала времени можно установить из средней энергии событий, входящих в цепочку, и закона Гуттенберга-Рихтера. Этот принцип временной близости событий используется в нашем алгоритме.

Цепочки Шебалина можно представить себе как одновременную перфорацию среды, понижающую ее прочность. Они выявляют намечающийся разлом, который должен возникнуть на более высоком масштабном уровне, что определяется механизмом взаимодействия масштабов. Число событий в цепочке может служить характеристикой повреждений среды или изменений ее фрактальности, а также параметром консолидации трещин, который в теории критических явлений называется параметром ренормгруппы [Sornette, 2006]. Нарастание скорости разрушений в цепочке рассматривается как суперкритический режим [Helmstetter, Sornette, 2002], а по его экстраполяции в критическую точку, где производная процесса обращается в бесконечность, прогнозируется главный удар. К сожалению, статистики в реальных каталогах для оперативного и надежного выявления критического режима не достаточно. С этим и связаны трудности его прогноза. То, что критическому режиму соответствуют быстрые пролеты, обсуждалось выше.

Принимая во внимание инвариантность свойств фрактальных сред на различных масштабах, цепочки можно искать на любом энергетическом уровне, а не только на том, на котором они тестировались для прогноза крупных землетрясений.

В цепочках Шебалина исследовались нелокальные свойства, а эффекты памяти — в афтершоковых последовательностях. Но подобные эффекты могут существовать не только в таких коротких рядах событий, но и в более широком временном интервале, который охватывает весь период наблюдений. Обобщая метод работы [Shebalin, 2006], можно исследовать как нелокальные свойства, так и эффекты памяти во всем каталоге землетрясений. Для этого при построении алгоритма нами вводится дополнительно принцип временной близости с целью выявления не только пространственной, но и временной связанности событий.

В процессе работы предложенного алгоритма на каждом шаге вычислений меняются пространственные и временные масштабы, определяемые энергией рассматриваемого события, а с помощью найденного ему партнера устанавливается связанность на данном шаге, и выявляются изменения в характере случайных блужданий. Возникновение аномальных режимов блужданий в цепочках и взаимодействие между ними обусловлены нелокальными свойствами и эффектами памяти. Если пренебречь ими, то выделенные цепочки можно считать независимыми, а блуждания в них нормальными. Основную роль при этом в цепочках будет играть связь между ближайшими соседями. Такой процесс называется процессом с независимыми приращениями. Очевидно, что эффект ближних корреляций зависит от пространственной плотности событий и от их средней частоты. Если события редкие, т.е. разнесены в пространстве и времени, то их области влияния не перекрываются, и пары между ними не образуются. Это случай независимых событий.

При увеличении плотности событий они сближаются, что приводит к перекрытию их зон влияния, в результате чего образуются пары. Это дает возможность для перехода от дискретного представления процесса к непрерывному его описанию. При возникновении связанности событий процесс может выглядеть вполне дискретным (последовательность редких коротких импульсов, разнесенных в пространстве), а его свойства непрерывности могут быть установлены лишь по перекрытию зон влияния.

Когда образуются достаточно длинные цепочки, выполняется условие малости приращений на одном шаге по сравнению с размером всей последовательности, при этом возможно диффузионное описание и представление сейсмичности в виде случайных блужданий.

Когда корреляции в цепочках нарастают, то возникают особенности в блужданиях, которые указывают на наличие эффектов нелокальности и памяти, называемых иначе эффектами дальних корреляций по пространству и времени. Нело-

кальность и память процесса связаны с ослаблением и упрочнением среды. Изменения свойств среды и приводит к смене этих двух эффектов, которые перемежаются еще и с эффектом ближних корреляций.

Таким образом, с помощью предложенного алгоритма можно выделить три режима сейсмичности: последовательности независимых случайных событий, процесс с независимыми приращениями (образуются пары и цепочки, эффект ближних корреляций) и проявление эффектов нелокальности и памяти (цепочки с эффектами дальних корреляций). В принципе, этот подход при его модификации позволяет выделить и четвертый режим сейсмичности, в котором существенную роль играет ветвление.

Хорошо известны феноменологические модели для описания перечисленных статистических режимов: пуассоновский процесс, диффузионное приближение, мелко-диффузионное представление и его обобщение с учетом ветвления. В статье на основе данных наблюдений рассматривается возможность использования диффузионного подхода.

Ниже, на примере каталога землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН, будет показана возможность представления сейсмического процесса в виде связанных последовательностей простейшего типа, без ветвления. Это разложение позволяет получить данные о динамике сейсмического процесса и выделить пространственно-временные и энергетические структуры деформационных возмущений.

В следующих разделах будут рассмотрены статистические характеристики, как отдельных цепочек, так и их ансамблей. Для анализа использовался указанный каталог землетрясений за период с 1 января 1962 г. по 31 декабря 2002 г. без ограничений на координаты событий с энергией не меньше 8 класса. Слабые землетрясения не рассматривались из-за их низкой статистики, более того, при анализе результатов принималась во внимание недостаточная представительность энергетических классов ниже 9.

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

1. Сейсмические события делятся на связанные и одиночные элементы каталога. На долю связанных сейсмических событий приходится около 30% каталога землетрясений.

2. Связанные события образуют между собой цепочки с определенными пространственно-временными и энергетическими масштабами.

3. Длина цепочек по числу событий в них варьируется от 3 до 56.

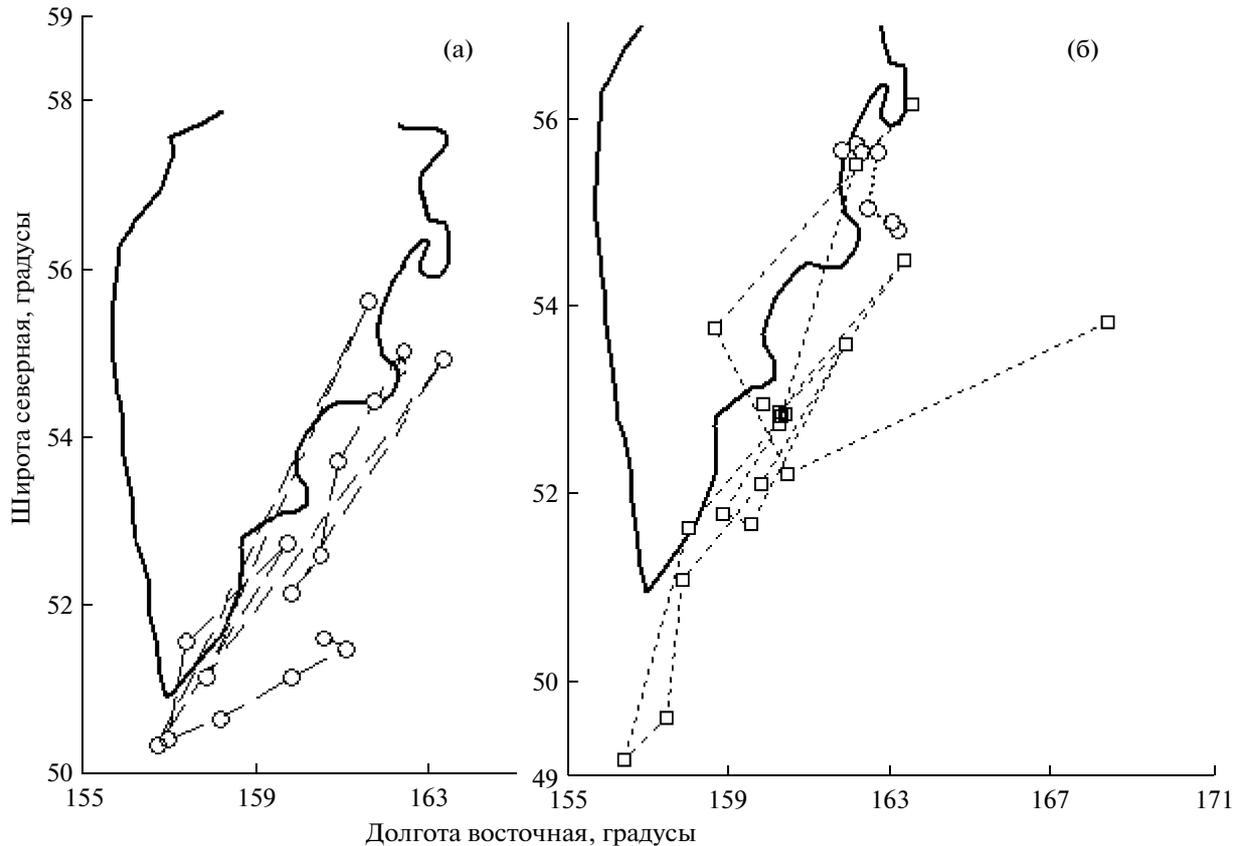


Рис. 1. Примеры цепочек: а – из 18 событий за период с января 1962 г. по декабрь 2002 г., суммарная энергия – $1.57E + 16$ Дж (кружки); б – из 21 события за период с декабря 1962 г. по декабрь 2002 г., суммарная энергия – $3.19E + 15$ Дж (квадраты) и из 7 событий за 6 месяцев 1962 г., суммарная энергия – $2.52E + 12$ Дж (кружки).

4. В каждой из цепочек реализуется процесс случайных блужданий.

Результат разложения определился самим процессом. Объединение событий в цепочки показывает, что сейсмические изменения имеют непрерывную составляющую, для описания которой возможно применение диффузионного подхода. Коллективные явления или связанные события в сейсмичности дают вполне определенный вклад (см. п. 1 результатов анализа и следующий раздел) и представляют собой процесс случайных блужданий, особенности которых позволяют судить о нелокальных свойствах и эффектах памяти. Получено разложение процесса по пространственно-временным и энергетическим масштабам. По свойствам связанности процесса возможна классификация его режимов, о которых сказано выше.

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 количеством звеньев, временем начала и конца ее существования, положением среднегеометрического центра блуждания, средним радиусом блуждания, суммарной и средней энергией.

Геометрические характеристики: положение центра и радиус области блужданий в цепочках, изображенных на рис. 1, можно определить из графической информации, а остальные их параметры даны в подписи к рисунку.

На рис. 2 показан 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, видимо, когда создавший ее локальный деформационный процесс снизил свою активность. Такое поведение с осцилляциями характерно для всех цепочек, отличия могут быть только в числе периодов колебаний и их амплитудах.

Изображенные на рис. 1а и 1б две продолжительные цепочки существовали в одно время и сгруппировались примерно в одном районе,

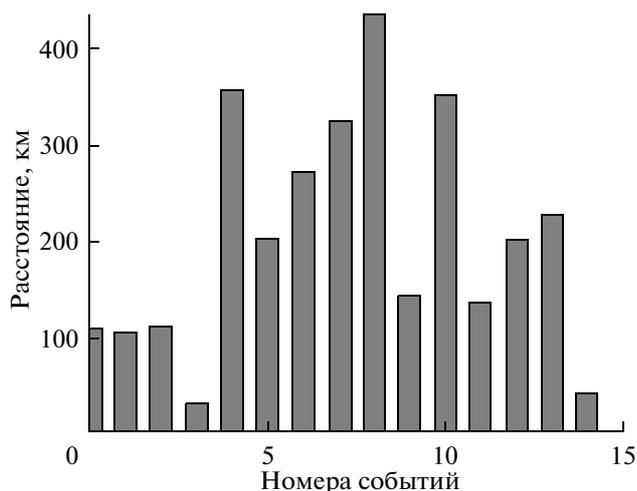


Рис. 2. Зависимость расстояния между событиями от номера пары в цепочке, представленной на рис. 1а.

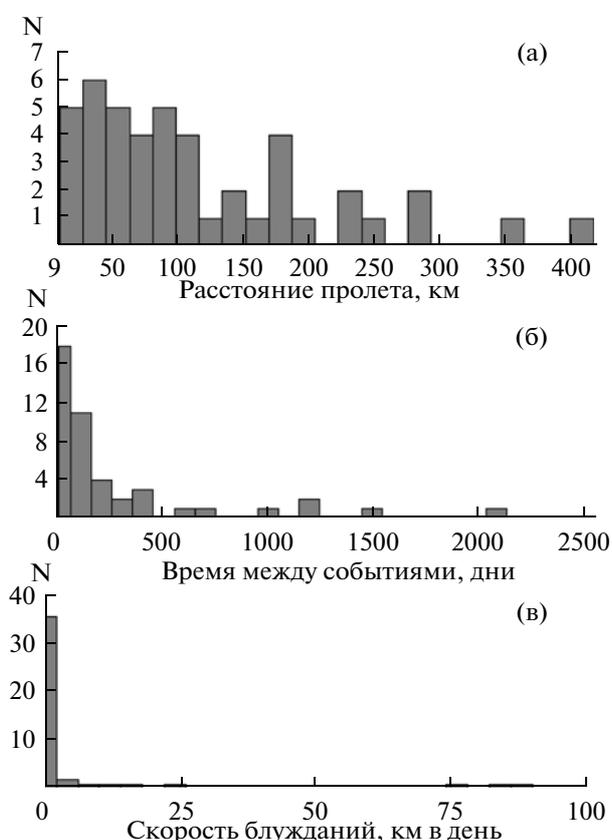


Рис. 3. Примеры частотных распределений по длинам пролетов (а), временам между событиями (б) и скоростям блужданий (в) в цепочке за период с августа 1965 г. по ноябрь 2002 г., суммарная энергия – $1.2E + 15$ Дж.

лишь их среднегеометрические центры не совпали. Примечательно то, что, имея область перекрытия, они не объединились в связи с тем, что представляют различные энергетические уровни.

На рис. 1б представлена короткая по времени цепочка, которая охватывает область с размером на порядок меньше по сравнению с большой цепочкой на том же рисунке. Отношение площадей, энергий и времен блуждания в цепочках можно оценить как отношение квадратов пространственных масштабов. Такие мелкие, но более многочисленные образования, в совокупности с более крупными пространственно-временными структурами, напоминают многомасштабную турбулентность [Голицын, 2001], а сейсмические события в ней представляются как блуждающие маркеры. Аналогию с турбулентностью можно усилить, если вспомнить, что дислокационные изменения в очаге землетрясений содержат, кроме деформаций, еще и вихревую составляющую. Разумеется, полной аналогии между сейсмичностью и гидродинамической турбулентностью быть не может, поскольку имеют место различия в природе нелинейности процессов. Тем не менее, по характеру развития неустойчивости, от малых масштабов к большим, разрушения сопоставимы с двумерной турбулентностью. А с учетом ветвления процесса и развития неустойчивости вниз по каскаду масштабов, можно провести аналогии с трехмерной турбулентностью.

Видно, что случайное блуждание реализуется неравномерно: топтания в ограниченной области сменяются длинными пролетами. О тех и других, а также о том, с чем они связаны, шла речь во введении. Чтобы убедиться в неравномерности блужданий, необходимо рассмотреть их скорости.

На рис. 3 приведены примеры частотных распределений по длинам пролетов, временам между событиями и скоростям блужданий в цепочках. Рис. 3 соответствует длинной цепочке из 46 звеньев, однако малая статистика даже в этом случае, к сожалению, не позволяет получить более гладких распределений. Хотя эта цепочка одна из самых длинных, но она не имеет наибольшую суммарную энергию.

Средние скорости блужданий в цепочках соответствуют скоростям медленных деформационных (тектонических) волн [Николаевский, 2001], однако имеют место редкие и сильные выбросы скорости, поэтому распределение (см. рис. 3в) получилось двухмасштабным. При этом масштаб в диапазоне 75–90 км в день, соответствующий выбросам, достаточно хорошо локализован.

Сильные выбросы скорости соответствуют “полетам Леви”, которые обусловлены дальними пространственными корреляциями. Аномальные запаздывания наоборот приводят к понижению скорости блужданий.

Принимая во внимание особенности характера случайных блужданий в сейсмичности, можно обратить внимание на то, что в ее поведении как случайного импульсного процесса с элементами

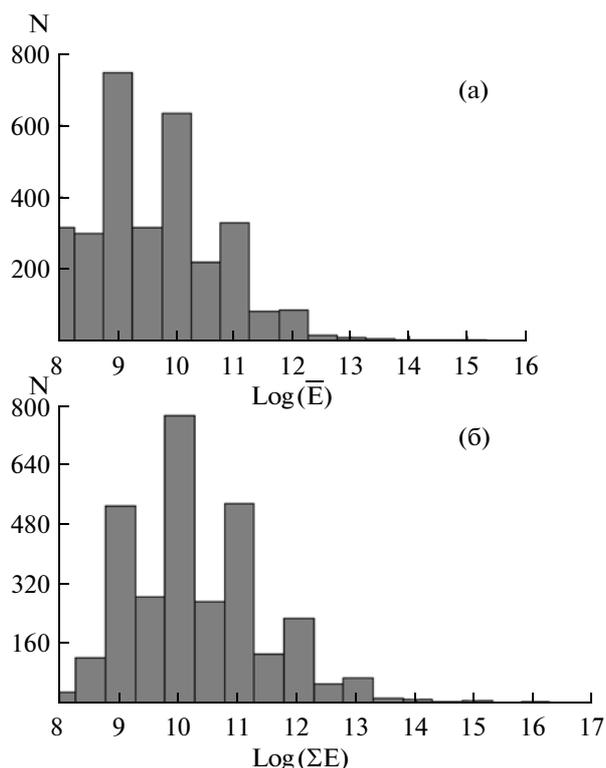


Рис. 4. Распределение числа цепочек по средним (а) и суммарным (б) энергиям.

памяти проявляется эффект мерцаний [Лукк и др., 1996]. Память возникает, когда время τ между наступлением событий распределено по степенному закону как $1/(1 + \bar{\nu}\tau)^{1+\alpha}$, где $\bar{\nu}$ – средняя частота событий, $0 < \alpha < 1$. Тогда корреляционная функция процесса зависит от времени как $1/(1 + \bar{\nu}\tau)^\alpha$ при $t \rightarrow \infty$, а спектр мощности на низких частотах будет $1/f^{1-\alpha}$, что соответствует определению фликкер-эффекта, который проявляется, например, в афтершоках.

Свойства нелокальности возникают, когда расстояния между событиями распределены по тому же степенному закону. При этом возникает пространственный фликкер-эффект, который со-

ответствует “полетам Леви” и обусловлен формированием разрыва. Объединения нелокальных свойств с эффектами памяти и создают особенности случайных блужданий.

На рис. 4 представлены распределения цепочек по их средним \bar{E} (а) и суммарным ΣE (б) энергиям, $\bar{E} = \Sigma E/n$, где n – число звеньев в цепочке, а $\Sigma E = \sum_{i=1}^n E_i$, где E_i – энергия i -го события в цепочке, которая определяется по каталогу в Дж. Полное число цепочек дается интегралом от этих распределений.

Отличие в графиках а и б на рис. 4 говорит о важности выбора энергетической характеристики цепочки. Причина отличия заключается в том, что среди цепочек с определенной суммарной энергией попадаются как короткие, так и длинные последовательности, и при переходе к средней энергии цепочек их распределения заметно трансформируются.

Число звеньев в цепочках с фиксированной их суммарной энергией может варьироваться от единиц до десятков. Количество звеньев, временные интервалы, средние координаты, максимальные и средние радиусы влияния шести цепочек с наибольшими суммарными энергиями приведены в таблице. Первые две цепочки из таблицы использовались для построения рис. 1, а статистика третьей отображена на рис. 3.

Суммарная энергия в группе цепочек с одинаковой суммарной энергией нарастает примерно как суммарная энергия цепочки, умноженная на 10. Эту зависимость можно получить, умножая значения гистограммы на рис. 4б по осям абсцисс и ординат.

На рис. 5а представлено распределение числа цепочек по количеству их звеньев. Как отмечалось выше, длина цепочек не зависит от их суммарной энергии, но отражает связанность событий в каталоге, которая не является устойчивой по отношению к начальным условиям вычислений.

Результаты выделения цепочек зависят от того, с какого места начинаются вычисления, и как

Таблица. Численные характеристики длинных цепочек

число звеньев	год	месяц	день	год	месяц	день	широта, градус	долгота, градус	глубина, км	радиус макс., км	радиус сред., км	суммарная энергия, Дж
21	1962	12	26	2002	12	8	52.65	160.01	40.35	673.56	290.24	1.57×10^{16}
33	1962	12	26	2002	12	19	52.75	160.39	40.04	975.36	302.07	3.19×10^{15}
46	1965	8	27	2002	12	25	53.39	162.06	34.57	766.4	259.32	1.14×10^{15}
4	1971	1	29	1972	11	11	51.78	159.3	32.35	746.9	249.26	1.2×10^{15}
25	1972	5	27	1999	5	21	52.17	151.88	487.5	240.11	163.67	1.26×10^{16}
18	1962	1	4	2002	4	24	53.87	160.35	82.2	1082.83	333.98	1.53×10^{15}

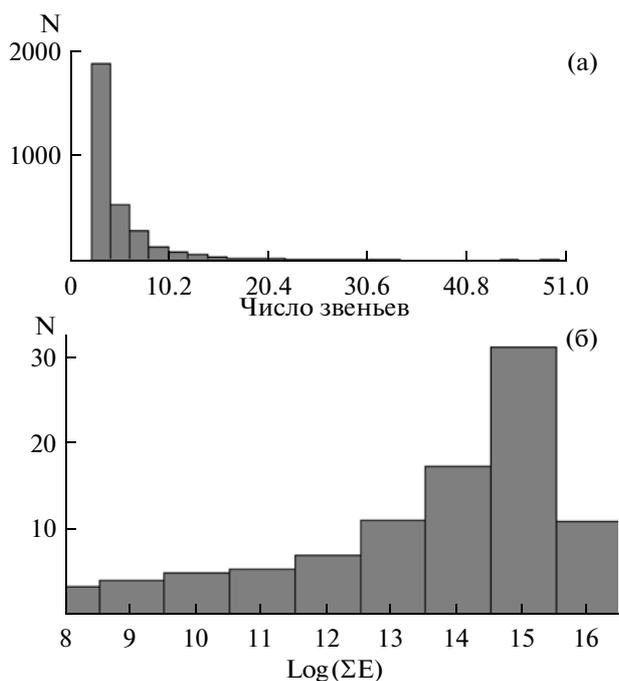


Рис. 5. Распределение числа цепочек по числу их звеньев (а) и среднее число звеньев в цепочках с заданной суммарной энергией (б).

подготовлен каталог для анализа, например, события какого класса отфильтрованы, как непредставительные или слабосвязанные (понятие связанности см. ниже, рис. 6). Все это является следствием случайных и хаотических свойств каталога, которые обсуждались выше.

На рис. 5б представлено среднее число звеньев в цепочках в зависимости от их суммарной энергии. Примечательно то, что средняя длина цепочек нарастает с увеличением суммарной энергии ΣE и достигает максимума при значениях $\lg \Sigma E = 14-15$. В двойном логарифмическом масштабе рост будет линейным. Остановка роста и заметный спад обусловлены, видимо, ограничением энергетического интервала сверху, связанным с конечностью размера сейсмического полигона и неприменимостью диффузионного приближения для событий с большой энергией. Верхние энергетические классы непредставительны из-за малого числа событий в них.

После подготовки каталога к анализу в него вошло 55816 событий с энергией не меньше 8 класса. Нижняя граница выбрана из соображений малой связанности слабых событий, а не потому, что исключаются из рассмотрения малопредставительные классы, роль которых в исследуемых разломах также интересна. После анализа каталога в нем несвязанными (одиночными) осталось 39685 событий, что от исходного числа составляет 71%, см. рис. 6а, 6б.

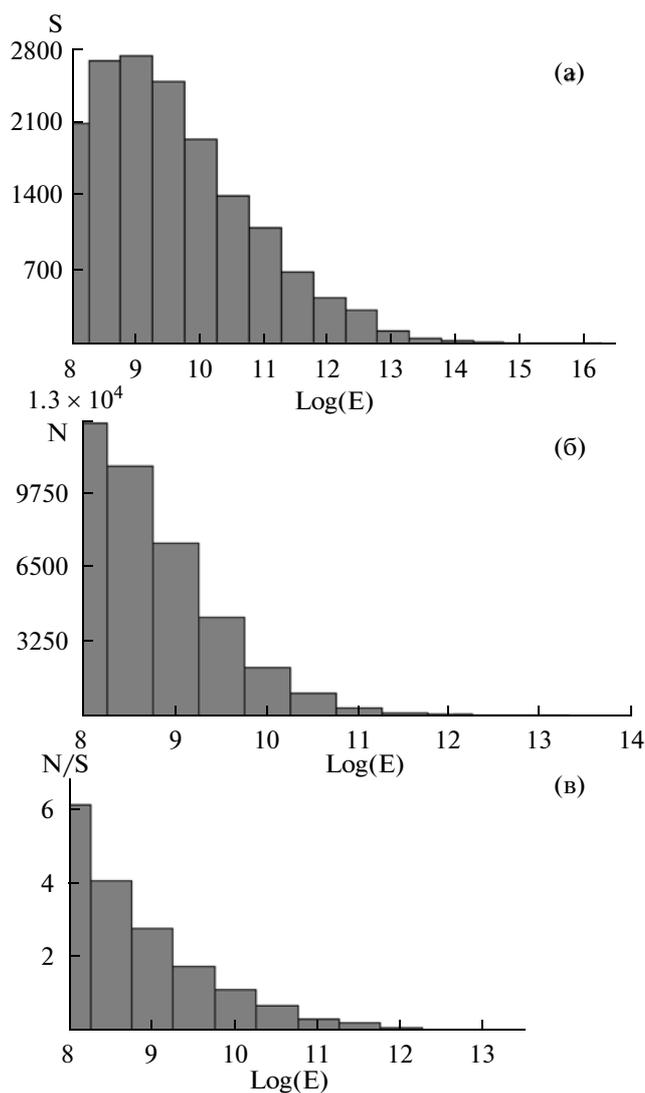


Рис. 6. Распределение по энергиям связанных (а) и несвязанных (б) событий в каталоге и отношение несвязанных к связанным событиям (в).

В основном это землетрясения с энергетическим классом меньше 9.5, в чем можно убедиться по распределению, представленному на рис. 6б. Значение 9.5, при котором распределение на рис. 6б спадает в e раз, можно назвать границей связанности событий в каталоге. Согласно рис. 6в, отношение несвязанных к связанным событиям в зависимости от их энергии E имеет тот же характер спада, что и на рис. 6б.

Радиус влияния для событий класса ниже 9.5 менее 24 км, а время ожидания меньше 9 дней. Такой малый размер области влияния и приводит к слабой связанности событий. Отфильтровать события с классом меньшим, чем 9.5, все-таки нецелесообразно, поскольку среди них еще попадаются группы, объединяющиеся в достаточно длинные цепочки, которые соответствуют малым

перемещениям. Граница фильтрации каталога по 8 классу наиболее оптимальна, на ней, согласно рис. 6в, число несвязанных событий уже существенно превосходит количество тех, которые вошли в цепочки. Улучшение аппаратных наблюдений может сделать класс 8 более представительным, что, разумеется, отразится на деталях рис. 6а, б, но не изменит отношения на рис. 6в.

Можно сделать вывод о нарастании связанности землетрясений с увеличением их энергии, что хорошо видно, как по отношению числа событий, рис. 6в, так и по длине цепочек, рис. 5б. Это можно рассматривать как усиление эффектов памяти и нелокальности с повышением масштабов событий и как характеристику взаимодействия между уровнями энергии.

Что касается статистики в цепочках, представленных на рис. 1–3, то при нескольких десятках событий, когда вполне применимы методы параметрических оценок, характер полученных распределений хорошо определен.

На рис. 4–6 представлены результаты статистической обработки большого массива данных, поэтому их представительность сомнений не вызывает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена модель сейсмического процесса, позволяющая исследовать связанность событий, особенностями которой характеризуются нелокальные свойства и эффекты памяти. Осуществлено разложение сейсмического процесса по пространственно-временным и энергетическим масштабам. Связанные события представляют непрерывную компоненту процесса, для описания которой применимо диффузионное приближение. По результатам разложения возможно определение различных режимов сейсмичности.

Блуждания в цепочке визуализируют коллективную пространственно-временную область влияния входящих в нее землетрясений, которые образуют кластер связанных событий, представляющих локальный пластический процесс, специфика которого определяется особенностями случайных блужданий. Нарастание связанности событий с увеличением их энергии обусловлено взаимодействием между масштабами с развитием неустойчивости вверх по каскаду. Главную роль в формировании неустойчивости играют нелокальные свойства и эффекты памяти.

Стохастичность броуновского движения не позволяет прогнозировать направления и скорости развития сейсмического процесса, однако возникают и определенные закономерности, связанные с особенностями случайных блужданий. Например, замедление их на определенных пространственно-временных и энергетических мас-

штабах можно рассматривать как накопление сейсмической энергии в области пространства, в которой активность процесса понизилась, что соответствует “сейсмической брешии” [Федотов, 1968]. Акустическое или сейсмическое затишье, локализованное в некоторой области, называется эффектом Кайзера, который возникает в результате упрочнения среды и роста там упругой энергии, что неизбежно приводит к разрушениям на более высоком масштабном уровне.

Подготовка разрушений проявляется в эффекте дальних корреляций, наблюдаемых по формированию цепочек Шебалина, понижающих прочность среды. Как следствие, возникает форшоки, главный удар, афтершоки и возвращение к нормальному режиму сейсмичности. Заметим, что главный удар и остальная совокупность событий в рое землетрясений принадлежат различным энергетическим уровням, между которыми происходит взаимодействие. Эти изменения в пластическом процессе и находят отражение в особенностях случайных блужданий.

Рассмотренная модель сейсмичности, основанная на использовании связанности событий, в рамках диффузионного подхода дает общее статистическое описание хрупких и вязких процессов, специфика которых представлена особенностями случайных блужданий. Модель нетрудно обобщить с учетом ветвлений процесса, роль которых также может иметь определенный интерес. Однако не так просто будет получить обоснование этой модели в рамках динамической теории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Белоносов А.С., Петренко В.Е.* О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. Вып. 32. М.: ГЕОС, 2001. С. 81–97.
- Голицын Г.С.* Место закона Гуттенберга-Рихтера среди других статистических законов природы // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. Вып. 32. М.: ГЕОС, 2001. С. 138–161.
- Добровольский И.Р.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 236 с.
- Заславский Г.М.* Физика хаоса в гамильтоновых системах. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 288 с.
- Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
- Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А.* Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИ-ФЗ РАН, 1996. 210 с.
- Николаевский В. Н.* Разломы земной коры и тектонические волны // Вестник ОГГГН РАН. 2001. № 1. С. 1–17.

- Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н., Вединчар Г.М.* Моделирование зон геоакустической эмиссии // Математическое моделирование. 2007. Т. 19. № 11. С. 59–64.
- Учайкин В.В.* Автомодельная аномальная диффузия и устойчивые законы // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 8. С. 848–876.
- Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.
- Шебалин П.Н.* Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 3–15.
- Шебалин П.Н.* Методология прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания меньше года // Алгоритмы прогноза землетрясений. Вычислительная сейсмология. Вып. 37. М.: ГЕОС, 2006. С. 5–180.
- Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pageoph. 1979. V. 117. P. 1025–1044.
- Helmstetter A., Sornette D.* Sub-critical and Super-critical Regimes in Epidemic Models of Earthquake Aftershocks // Journal of Geophysical Research. 2002. B 107. P. 2237–2265.
- Kagan Y.Y.* Observational evidence for earthquakes as non-linear dynamic process // Physica D. 1994. V. 77. P. 160–192.
- Metzler R., Klafter J.* The random walk's guide to anomalous diffusion: a fractional dynamics approach // Physics Reports. 2000. V. 339. P. 1–77.
- Saichev A.I., Zaslavsky G.M.* Fractional kinetic equations: solutions and applications // Chaos. 1997. V. 7. № 4. P. 753–764.
- Shebalin P.N.* Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains // Tectonophysics. 2006. V. 424. P. 335–349.
- Sornette D.* Critical phenomena in Natural Sciences. Berlin: Springer, 2006. 528 p.

A Diffusion Approach to the Statistical Analysis of Kamchatka Seismicity

B. M. Shevtsov and R. N. Sagitova

*Institute of Space Physics Research and Radio-Wave Propagation, Far East Branch, Russian Academy of Sciences,
7 Mirnaya ul., village of Paratunka, Kamchatskii Krai, 684034 Russia*

e-mail: raya@ikir.ru

Abstract—A diffusion approach was used to develop a statistical model of seismicity and to analyze Kamchatka earthquakes in order to detect features in the changes that are typical of random walk processes. We proposed a hypothesis of relationships among events and used an energy criterion to decompose the earthquake catalog into a set of sequences, with each being a Brownian process with definite spatial, temporal, and energy scales. We constructed statistical distributions for these sequences over the number of their terms and total energies, as well as distributions of the sequences over distance, time, and flight times between events. We discuss non-local properties and memory effects in the random walk under different conditions.