

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АФТЕРШОКОВЫХ ПРОЦЕССОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

Баранов С.В.

Кольский филиал Геофизической службы РАН, Апатиты, Россия (184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 15), e-mail: bars.vl@gmail.com

Обосновывается, что моделирование афтершоковых процессов сильных землетрясений является одним из важнейших направлений исследований в области прогноза сейсмической активности. Определяется научная и практическая значимость развития исследований, ориентированных на прогнозирование афтершоков после сильных землетрясений. Приводятся цель и задачи научно-исследовательского проекта РФФИ № 13-05-00158, направленного на получение нового знания в сфере прогноза афтершоков. Подробно описан методический инструментарий исследования этапа 2014 года, приведены особенности использования типовых моделей и методик, а также авторские оригинальные разработки. Приведены результаты применения этого инструментария на этапе исследования 2014 года к изучению афтершоковых процессов сильных землетрясений в районах с различным сейсмогенезом (архипелаг Шпицберген, Камчатка, Алтае-Саянская складчатая область, Северный Кавказ). Подтверждено, что афтершоки, сопоставимые по силе с основным толчком, возникают у афтершоковых последовательностей с различным типом затухания вне зависимости от фрактальности разрывной зоны. Предложено понятие активности афтершокового процесса, основанное на совместном использовании закона Гутенберга-Рихтера и ETAS-модели. Показано, что сильные события происходят либо во время спада активности (затишье), либо сразу после его окончания, то есть фиксируемый спад сейсмической активности может использоваться как предвестник сильного афтершока. Обнаружена связь тензора сейсмического момента с длительностью будущей афтершоковой серии и наличием афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком, что имеет важное значение для прогноза. Разработана методика прогнозирования афтершоковых процессов в различных диапазонах магнитуд, которая уже может быть использована в центрах сейсмологического мониторинга для прогнозирования афтершоковой активности после сильного землетрясения по данным оперативной обработки.

Ключевые слова: моделирование, прогноз, афтершоки, тензор сейсмического момента, сильный афтершок.

MODELING AND FORECASTING AFTERSHOCK PROCESSES DUE TO STRONG EARTHQUAKES: THE RESEARCH METHODOLOGY

Baranov S.V.

Kola Branch of Geophysical Survey of RAS, Apatity, Russia (184209, Russia, Fersmana street, 14), e-mail: bars.vl@gmail.com

The paper argues that modeling aftershock processes of strong earthquakes is an important issue in the field of forecasting seismic activity. It is defined scientific and practical meaning of research aimed at forecasting aftershocks after a strong earthquake. We provide goal and tasks of the research project supported by Russian Foundation of Basic Research (project Nu 13-05-00158) and aimed at obtaining new knowledge in the field of aftershock forecast. Methodologies of the first stage of the research including authors' original developments are provided in detail. The paper provides some results of applying the methodologies in the frameworks of the first stage of the project to studying aftershock processes of strong earthquakes from the regions with different types of seismicity (Spitsbergen Archipelago, Kamchatka, Altay Sayan area, and The Northern Caucasus). We confirm that aftershocks those sizes are comparable with the mainshock occur during aftershock series with different type of decay regardless of the fault fractality. We suggested definition of activity of an aftershock process based on the joint use Gutenberg-Richter law and ETAS model. Using the suggested activity we showed that strong events during either the activity decay (quiescence) or just after the decay ending. Thus, the observed regularity can be used in the work of centers of seismic monitoring as a precursor of strong aftershocks. We observed connection between seismic moment tensor of the mainshock, duration of the future aftershock sequence and occurrence of aftershock which is comparable with the mainshock size. This connection has an important meaning for the forecasting future aftershock activity. The methodology to forecast aftershock processes in different magnitude range using data by operational processing was also developed. This methodology can be directly used in seismic monitoring agencies to forecast aftershock activity after a strong earthquake.

Keywords: modelling, forecast, aftershocks, seismic moment tensor, strong aftershock.

Моделирование и прогнозирование афтершоковых процессов землетрясений является одним из важнейших направлений исследований в области сейсмического прогноза. Это закономерно обуславливается серией обстоятельств. Назовем важнейшие из них. Во-первых, наличие теоретико-методологических разработок, позволяющих достоверно определить вероятные афтершоковые последовательности событий после основных толчков. Во-вторых, несомненное практическое значение. Так, афтершоки после сильного землетрясения нередко оказываются сопоставимы по силе с основным толчком. Следовательно, афтершоки могут быть причиной значительных социальных и экономических потерь. Это определяет общественную значимость подобного рода исследований.

Вместе с тем в настоящее время наблюдается недостаток накопления статистически обоснованных закономерностей протекания афтершоковых процессов после сильных землетрясений, ряд задач методического характера требует своего научного развития. В рамках проекта РФФИ № 13-05-00158 была поставлена фундаментальная задача – моделирование афтершоковых процессов сильных землетрясений в районах с различным сейсмогенезом (архипелаг Шпицберген, Камчатка, Алтае-Саянская складчатая область, Северный Кавказ) с помощью релаксационных моделей, моделей триггерной сейсмичности и моделей механики разрушений с целью выяснения особенностей и прогнозирования афтершоковой активности. В процессе выполнения проекта особое внимание было уделено выделению свойств афтершокового процесса, которые позволят предсказать последующие сильные толчки.

В настоящей статье приведен методический инструментарий исследования и результаты, полученные исполнителями проекта в 2014 г. Такой акцент позволяет выявить определенную оригинальность и научную новизну в развитии методов исследования афтершоковых процессов. А развитие методов, в свою очередь, позволило получить и новые научные результаты, которые также приводятся в настоящей статье.

Задачи исследования этапа 2014 года состояли в следующем.

Первая задача – установить временные свойства афтершоковых процессов, характеристики разрывных зон в каждом районе на основе анализа параметров моделей. Поясним, фактически основное внимание на данном этапе было направлено на выявление свойств афтершокового процесса, определяющих возможность возникновения событий, сопоставимых по силе с основным толчком.

Вторая задача - выполнить моделирование афтершоковых последовательностей в скользящем временном окне с целью проследить изменение свойств афтершоковых процессов в динамике. Новизну этой составляющей определяет ее целевой ориентир -

правило, которое позволит сделать вывод о возможности возникновения афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком.

Третья задача - проверка гипотезы о связи типа деформации в очаге основного толчка, задаваемой тензором сейсмического момента, с длительностью афтершокового процесса.

Четвертая задача - разработка методики прогнозирования афтершоковой активности в различных диапазонах магнитуд, основанной на моделировании афтершоковой последовательности в предыдущие моменты времени.

Рассмотрим методы и подходы, использованные в ходе выполнения этих задач.

Для выявления свойств афтершокового процесса, определяющих возможность возникновения событий, сопоставимых по силе с основным толчком, было выполнено моделирование афтершоковых серий базы данных проекта, сформированной на этапе 2013 г. Моделирование выполнялось по схеме в работе [2] с помощью закона Омори-Утсу [18] обобщенной экспоненциальной модели (MSTREXP; [9]). Оценка параметров моделей выполнялась принятым в сейсмологии методом максимального правдоподобия. Выбор лучшей модели осуществлялся с помощью информационного критерия Байеса [10]. Если для афтершоковой последовательности лучшей моделью оказывался закон Омори-Утсу, то последовательность относилась к гиперболическому типу, если же экспоненциальная модель, то – к экспоненциальному типу. В результате было установлено, что афтершоки, сопоставимые по силе с основным толчком, происходят у последовательностей как гиперболического, так и экспоненциального типов.

Для выявления связи фрактальности разрывной зоны с наличием сильного афтершока было выполнено моделирование афтершоковых последовательностей проекта с помощью ограниченной степенной (LPL) модели П.Н. Шебалина [5; 11]. LPL-модель в зависимости от значений ее параметров описывает как гиперболический, так и экспоненциальный типы затухания афтершоковых процессов. С помощью оценок значений параметров LPL-модели были рассчитаны характеристические времена t_0 и t_1 такие, что при $t < t_0$ афтершокового процесс затухает линейно, при $t_0 < t < t_1$ – по гиперболическому закону, а при $t > t_1$ – экспоненциально [11]. При этом чем меньше время начала экспоненциального затухания афтершокового процесса (t_1), тем больше фрактальность зоны разрыва [12]. В результате сопоставления времен t_1 магнитудами афтершоковых серий из базы данных проекта было установлено, что афтершоки, сопоставимые по силе с основным толчком, возникают как в гладких разломных зонах (низкая фрактальность), так и в разломных зонах со сложной геометрией (высокая фрактальность). Новизна и оригинальность подхода заключается в совместном использовании характера затухания афтершокового процесса и фрактальности

разрывной зоны для выявления связи с наличием афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком.

Моделирование афтершоковых последовательностей в движущемся временном окне выполнялось с помощью релаксационных моделей (закон Омори-Утсу, LPL-модель) и модели триггерной сейсмичности (ETAS) [13]. Релаксационные модели описывают восстановление напряжений в зоне разрыва после основного толчка, модель триггерной сейсмичности – самовоспроизведение афтершоковой последовательности, когда каждое событие, в зависимости от магнитуды, порождает собственную подпоследовательность афтершоков. На каждом шаге окно смещалось и выполнялась оценка параметров моделей методом максимального правдоподобия. Затем временные вариации значений параметров сопоставлялись с графиком временного распределения магнитуд событий с целью выявления закономерностей в поведении параметров моделей перед сильным афтершоком. В результате было установлено, что значения ряда параметров моделей перед сильным афтершоком находятся в зоне своих минимальных значений. Эти параметры следующие: параметр A в законе Омори-Утсу ($n(t) = A/(t+c)^p$); продуктивность афтершокового по ETAS-модели (параметр α); фоновая сейсмичность по EATS-модели (параметр μ).

Такое поведение параметров является ожидаемым и имеет простую интерпретацию – перед сильным афтершоком наблюдается сейсмическое затишье. Отметим, что понятие сейсмического затишья используется в известных методиках выделения предвестников сильного землетрясения. Например, методика Соболева-Тюпкина [17] основана на анализе сейсмического затишья, моделируемого RTL-параметром. Для корректного вычисления RTL-параметра необходимо выполнить декластеризацию каталога (удалить афтершоки), поэтому данная методика не подходит для анализа афтершоковых последовательностей.

Другим примером является методика Утсу-Огаты [14], в основу которой положен анализ отклонений модельной кумулятивной кривой от наблюдаемой кумулятивной кривой в преобразованном специальном масштабе времени. Если наблюдаемая кривая становится значимо меньше модельной, то наблюдается сейсмическое затишье, которое является предвестником сильных афтершоков. Недостатки методики: 1) предвестник является ошибкой прогноза, а не следствием соответствия модели исходным данным; 2) ограниченность информации, используемой для оценки параметров временной модели (после интервала, где оцениваются параметры, должно пройти еще некоторое время, достаточное для оценивания значимости отклонений модельных значений от наблюдаемых, и только после этого принимается решение о возможном сильном афтершоке).

Подчеркнем, что непосредственное использование обнаруженных закономерностей в поведении параметров моделей или некоторой агрегированной функции от них

(произведение, геометрическое среднее и т.д.) не позволяет получить устойчивую картину перед сильным афтершоком. Для устранения этого недостатка было разработано понятие сейсмической активности афтершокового процесса.

Прежде чем приступить к дальнейшему изложению, формализуем понятие сильного землетрясения. Под сильным землетрясением на временном интервале (S, T) будем понимать такое землетрясение, магнитуда которого больше магнитуды 95% землетрясений, произошедших на этом интервале. Магнитуду, начиная с которой землетрясение является сильным, назовем пороговой магнитудой.

Если предположить, что магнитуды события независимы и одинаково распределены, то с помощью закона Гутенберга-Рихтера можно определить вероятность того, что в некотором временном окне хотя бы одно событие будет иметь магнитуду выше пороговой. Назовем эту вероятность P_1 [1]. Использование фоновой сейсмичности, оцененной в окне с помощью ETAS-модели, позволяет определить вероятность того, что событие не является фоновым. Эту вероятность назовем P_2 [1].

Под сейсмической активностью афтершокового процесса на интервале времени $(t-w, t)$, где w – ширина окна, будем понимать вероятность того, что на этом интервале произойдет хотя бы одно сильное землетрясение, которое не является фоновым. Эта вероятность задается произведением вероятностей P_1 и P_2 . Если определённая таким образом активность афтершокового процесса близка к 0, то имеет место затишье, а если к 1, – то сейсмическая активизация. Предложенное понятие активности афтершокового процесса устанавливает связь между энергетическими и временными характеристиками афтершоковой серии.

Новизна нашего подхода заключается в совместном использовании общепринятых в сейсмологии моделей - закон Гутенберга-Рихтера и ETAS-модель для выделения предвестника сильного афтершока. Оригинальность заключается в способе совместного использования параметров этих моделей, который подчиняется не эвристическими соображениями, а положениям теории вероятности. Именно поэтому разработанное понятие активности афтершокового процесса имеет четкий смысл вероятности того, что на некотором интервале времени произойдет именно афтершок, а не фоновое событие, с магнитудой большей, чем у 95% событий на этом интервале.

Расчеты активности для афтершоковых последовательностей из базы данных проекта, сформированной на этапе 2013 г., показал, что сильные события происходят либо во время спада активности (затишье), либо сразу после окончания затишья [1]. Таким образом, фиксируемый методикой спад сейсмической активности может использоваться в работе

центров сейсмического мониторинга после сильного землетрясения, как предвестник сильных афтершоков.

Исследование связи тензора момента основного толчка с длительностью будущего афтершокового процесса и наличием афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком, проводилось следующим образом. Тензор сейсмического момента основного толчка характеризовался типом деформации в очаге (сдвиг, сброс, взброс, взрез) и типом источника (двойной диполь, недвойной диполь). При проведении исследования мы исходили из того, что недвухдипольный источник возникает в случае сложного очага (вспарывание происходит одновременно по нескольким направлениям) и, следовательно, сложной геометрии разрывной зоны. Отметим, что в областях активного вулканизма или активной флюоризации (например, шельф Баренцева моря) это предположение нарушается, и в таком случае недвухдипольность источника определяется воздействием флюидов на процесс образования трещины (эффект Рибиндера). Кроме того, флюидизация оказывает существенное влияние и на поле локальных напряжений, в значительной степени изменяя характеристики афтершокового процесса (теория И.К. Кисина [4]).

Новизна подхода определяется гипотезой исследования - в случае сложного очага основного толчка накопленные напряжения сбрасываются не полностью, следовательно, восстановление поля частично сброшенных напряжений совместно с действием оставшихся напряжений приводит к возникновению афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком. Такое событие фактически начинает новую афтершоковую серию.

Для определения типа источника использовался коэффициент Лоде-Надаи [6], равный отношению утроенного второго собственного числа тензора момента к разнице первых двух собственных чисел. Предполагается, что собственные числа упорядочены по убыванию. Считается, что если абсолютное значение коэффициента Лоде-Надаи близко к нулю, то имеет место двухдипольный источник, если же это значение больше 0.2, то - недвухдипольный источник. При практическом использовании такой способ часто приводит к ложному отнесению источника к недвухдипольному типу из-за ошибок в определении компонент тензора сейсмического момента. Тензоры сейсмического момента основных толчков были взяты из глобального каталога СМТ [8].

В каталоге СМТ содержатся стандартные ошибки определения компонент тензора сейсмического момента. Учет ошибок осуществлялся аналогично работе [19]. Для пяти из шести компонент тензора с помощью обратной функции нормального распределения строились 95%-ные доверительные интервалы, при этом за математическое ожидание принималось значение компоненты тензора, за стандартное отклонение - стандартная ошибка этой компоненты. Перебирая с мелким шагом все возможные значения из

доверительных интервалов для пяти компонент тензора, вычислялась шестая компонента с помощью условия нулевого следа (равенство нули суммы диагональных компонент тензора), затем вычислялись возмущенные значения коэффициента Лоде-Надаи. Если минимальное и максимальное возмущенные значения получались разных знаков или знаки одинаковые, но среднее значение по модулю меньше 0.2, то источник относился к двухпольному типу. Если же знаки оказывались одинаковыми и среднее значение больше 0.2, то коэффициент Лоде-Надаи значимо отличается от нуля и источник относился к недвухдипольному типу. Такая методика учитывает ошибки определения компонент тензора сейсмического момента и позволяет выделять источники, которые действительно относятся к недвухдипольному типу.

В результате определения типов источников основных толчков из базы данных проекта было установлено наличие связи тензора сейсмического момента с длительностью афтершоковой серии и наличием афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком. Афтершок, сопоставимый по силе с основным толчком, наблюдается у взбросовых механизмов и у механизмов с недвухдипольным источником.

В результате было установлено, что к недвухдипольным источникам относятся следующие основные толчки: Рачинское землетрясение 1991/04/29. $M_w=6.9$, 95%-ный доверительный интервал для коэффициентов Лоде-Надаи: (-0.42, -0.29); Первое Тувинское землетрясение, $M_w=6.7$, 95%-ный доверительный интервал для коэффициентов Лоде-Надаи: (0.30, 0.39); землетрясение в Камчатском проливе в районе острова Беринга 1999/11/26, $M_w=6$, 95%-ный доверительный интервал для коэффициентов Лоде-Надаи: (-0.49, -0.33); землетрясение в Беринговом море севернее острова Беринга 2003/12/05, $M_w=6.6$, 95%-ный доверительный интервал для коэффициентов Лоде-Надаи: (0.41, 0.55).

Новизна подхода заключается в использовании типа источника основного толчка (двойной диполь или нет) для сопоставления с наличием сильного афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком. Оригинальность заключается в использовании методики учета ошибок определения компонент тензора сейсмического момента с целью предотвращения ложного отнесения источника к недвухдипольному типу.

В рамках достижения задачи 4 была предложена методика прогнозирования афтершоковой активности в различных диапазонах магнитуд, которая является развитием методики из работы [3; 7]. В основе методики лежит представление афтершокового процесса в виде произведения временной модели и закона Гутенберга-Рихтера (идея Ризенберга и Джонс [15]). Методика основана на оценивании параметров двух составляющих (закон Омори и закон Гутенберга-Рихтера) модели афтершокового процесса на некотором возрастающем интервале времени, называемом базисным, и переносе оцененных значений для расчета ожидаемого количества афтершоков заданной магнитуды, которые могут

произойти в течение прогнозного интервала времени. С учетом степенного характера спада афтершоковой активности (закон Омори) в данной работе предлагается использование длительности прогнозного интервала, пропорциональной длительности базисного интервала. В данной работе мы используем коэффициент пропорциональности равный 1.41 с тем, чтобы через каждые два шага интервал удваивался. Новая итерация производится каждый раз по окончании прогнозного интервала. На каждой итерации уточняются оценки всех параметров, и прогноз на новый прогнозный интервал делается с использованием уточненных оценок. Такой адаптивный подход учитывает вариацию параметров закона повторяемости и практически неизбежную неполноту каталога землетрясений в начале афтершоковой серии.

Для измерения качества прогноза по разработанной методике использовались оценки правдоподобия, называемые L-тестом [16]. При сравнении двух разных методов или версий прогноза удобной является величина, которую называют «выигрыш по правдоподобию на одно событие» (probability gain per event). Модификация этого теста, S-тест [16], использовалась для условного случая, когда важно правильно предсказать распределение событий по элементам сетки.

При тестировании методики прогнозирования количества афтершоков выполнялось по рассмотренной схеме для магнитуд больших или равных M_p . Для всех серий было рассмотрено три варианта: $M_p = M_c$, $M_p = M_m - 2$ и $M_p = M_m - 1$, где M_c - магнитуда представительности, M_m - магнитуда основного толчка. В результате было установлено, что лучший результат достигается при использовании скользящего (в логарифмическом масштабе) окна $(t_0 + 0.05t, t)$ для оценивания параметров закона Омори-Утсу, параметр b закона Гутенберга-Рихтера оценивался на (t_0, t) , где $t_0 = 0.03$ сут. Таким образом, исключение, по мере поступления новых данных, начала афтершоковой серии улучшает оценки.

Главным новшеством предлагаемого подхода является последовательное уточнение параметров обеих составных частей метода. Такой подход позволяет в значительной степени учесть вариацию параметров закона Гутенберга-Рихтера, часто проявляющуюся, в частности, в уменьшении с течением времени доли более сильных афтершоков. Оригинальность заключается в способе оценки прогнозного количества афтершоков с магнитудой больше заданной, который учитывает возможную ошибку оценки параметров модели и возможное отклонение афтершоков от прямой Гутенберга-Рихтера.

Применение этого методического инструментария позволило исполнителям проекта РФФИ № 13-05-00158 получить в 2014 году следующие важнейшие результаты.

Во-первых, установлено, что афтершоки, сопоставимые по силе с основным толчком, возникают у афтершоковых последовательностей с затуханием как гиперболического, так и экспоненциального типов вне зависимости от фрактальности разрывной зоны.

Во-вторых, выявлены закономерности в вариациях параметров моделей афтершоковых процессов перед сильным событием. Данные закономерности являются ожидаемыми, исходя из физического смысла параметров моделей, и характеризуют сейсмическое затишье афтершокового процесса перед сильным событием.

В-третьих, предложено понятие активности афтершокового процесса, основанное на совместном использовании закона Гутенберга-Рихтера и ETAS-модели. Закон Гутенберга-Рихтера используется для характеристики распределения магнитуд афтершоков в некоторый момент времени, ETAS-модель - для оценки сейсмичности, которая не является частью афтершокового процесса. Расчеты активности для афтершоковых процессов проекта показали, что сильные события происходят либо во время спада активности (затишье), либо сразу после его окончания. Таким образом, фиксируемый спад сейсмической активности может использоваться как предвестник сильного афтершока.

В-четвертых, установлена связь тензора сейсмического момента с длительностью будущей афтершоковой серии и наличием афтершока, сопоставимо по силе с основным толчком. Данный результат имеет важное значение для прогнозирования афтершоковой активности.

В-пятых, разработана методика прогнозирования афтершоковых процессов в различных диапазонах магнитуд, основанная на совместном использовании временной модели афтершокового процесса и закона Гутенберга-Рихтера. Проверка методики на афтершоковых сериях из базы данных проекта показала высокую степень реализации прогнозов. Уже на этом этапе методика может быть использована в центрах сейсмологического мониторинга для прогнозирования афтершоковой активности после сильного землетрясения по данным оперативной обработки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 13-05-00158).

Список литературы

1. Баранов С.В. Оценка активности афтершокового процесса с помощью закона Гутенберга-Рихтера и ETAS-модели // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12 (4). – С. 9-17.

2. Баранов С.В., Габсатарова И.П. Афтершоковые процессы сильных землетрясений Западного Кавказа // Физика Земли. – 2015. – № 3. – С. 134-144.
3. Баранов С.В., Шебалин П.Н. Методика краткосрочного прогноза афтершоковой активности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных : материалы Девятой международной сейсмологической школы (Обнинск: ГС РАН, 8-12 сентября 2014 г.) / отв. ред. А.А. Маловичко. – С. 64–68.
4. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. – М. : Наука, 2009. – 328 с.
5. Шебалин П.Н. Афтершоки как индикаторы напряженного состояния в системе разломов // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 398. – № 2. – С. 249-254.
6. Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1979. – № 10. – С. 7-25.
7. Baranov S.V. Shebalin P.N. Aftershock process forecast // 34th General Assembly of the European Seismological Commission. Istanbul, Aug. 25–29. – 2014. – P. 1–2.
8. Global CMT Catalog. - URL: <http://www.globalcmt.org/> (дата обращения: 09.07.2015).
9. Kisslinger C. The Stretched Exponential Function as an Alternative Model for Aftershock Decay Rate // Journal of Geophysical Research. – 1993. – V. – 98. – № B2. – P. 1913–1921.
10. Leonard T., Hsu J.S.J. Bayesian Methods, An analysis for statisticians and interdisciplinary researchers. – Cambridge : Univ. Press, 1999. – 335 p.
11. Narteau C., Shebalin P., Hainzl S., Zöller G., Holschneider M. Emergence of a band-limited power law in the aftershock decay rate of a slider-block model // Geophysical Research Letters. – 2003. – V. 30. – №. 11. – P. 22-1 – 22-4. doi:10.1029/2003GL017110.
12. Narteau C., Shebalin P., Holschneider M. Temporal limits of the power law aftershock decay rate // Journal of Geophysical Research. – 2002. – V. 107. – № B12. doi:10.1029/2002JB001868.
13. Ogata Y. Seismicity Analysis through Point-process Modeling: A Review // Pure appl. geophys. – 1999. – V. 155. – № 2-4. – P. 471-507.
14. Ogata Y. Monitoring of anomaly in the aftershock sequence of the 2005 earthquake of M7.0 off coast of the western Fukuoka, Japan, by the ETAS model // Geophysical Research Letters. – 2006. – V. 33. – L01303. doi:10.1029/2005GL024405.
15. Reasenberг P.A., Jones L.M. Earthquake Hazard After a Mainshock in California // Science. – 1989. – V. 242. – No. 4895. – P. 1173-1176. DOI: 10.1126/science.243.4895.1173.
16. Schorlemmer D., Gerstenberger M., Wiemer S., Jackson D.D., Rhoades D.A. Earthquake likelihood model testing // Seismol. Res. Lett. – 2007. – V. 78. – P. 17–29.
17. Sobolev G.A., Tyupkin Yu.S. New method of intermediate-term earthquake prediction // Seismology in Europe. – 1996. - P. 229-233.

18. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // *Geoph. Magazine.* – 1961. – V. 30. – P. 521–605.
19. Yunga S., Lutikov A., Molchanov O. Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* – 2005. – V. 5. – P. 11–15.

Рецензенты:

Олейник А.Г., д.т.н., заместитель директора по научной работе ФГБУН «Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра Российской академии наук», г. Апатиты;

Скуфьин П.К., д.г.-м.н., ведущий научный сотрудник ФГБУН «Геологический институт Кольского научного центра Российской академии наук», г. Апатиты.