

## НЕРАВНОМЕРНОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКА ОСНОВНЫХ СОБЫТИЙ, ПРИМЕР НЕГЛУБОКОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ РЕГИОНА КАМЧАТКИ

© 2022 г. М. В. Родкин<sup>1, 2, \*</sup>, Е. В. Липеровская<sup>3, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН (ИМГиГ ДВО РАН), г. Южно-Сахалинск, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

\*E-mail: rodkin@mitp.ru

\*\*E-mail: liper@ifz.ru

Поступила в редакцию 06.09.2021 г.

После доработки 03.02.2022 г.

Принята к публикации 11.02.2022 г.

На примере неглубоких землетрясений Камчатского региона для трех разных методов удаления афтершоков показано существование значительных отклонений режима основных событий от стационарного Пуассоновского процесса; причем характер отклонений не зависит от метода удаления афтершоков. Величина отклонений имеет тенденцию к росту с увеличением времени осреднения. Сравниваются тенденции изменения характерного пространственно-временного расстояния между землетрясениями для искусственных стационарных последовательностей независимых событий, реальных основных событий и афтершоковых последовательностей. Параметры кластеров основных событий сильно отличаются от характеристик афтершоковых последовательностей, что, видимо, указывает на различие физических механизмов возникновения афтершоковых последовательностей и кластеров основных событий. Выявлена тенденция роста характерного расстояния между последовательными землетрясениями в группах основных событий при увеличении интенсивности потока событий. Такая тенденция, видимо, отвечает опережающему росту активности более крупных сейсмогенных структур и вероятности возникновения более сильных землетрясений с ростом интенсивности потока основных событий. Описанная существенная нестационарность потока основных событий указывает на определенную ограниченность общепринятого подхода к оценке сейсмической опасности.

**Ключевые слова:** нестационарность режима основных землетрясений, кластеры основных землетрясений, доминирование длиннопериодных компонент, сейсмическая опасность.

DOI: 10.31857/S000233372204007X

### ВВЕДЕНИЕ

Общепринято разделение сейсмических событий на основные, предположительно независимые землетрясения и на зависимые события, формирующие рои, форшоки и афтершоки. Среди зависимых событий наиболее значителен вклад афтершоков (достигает до половины всех сейсмических событий). Далее (по аналогии с англоязычным термином *main earthquake*) для не афтершоков будем использовать термин основные события. Основные события принято полагать независимыми, распределенными по закону Пуассона. В реальности, однако, такое предположение не вполне точно; разные авторы неоднократно отмечали существенные неоднородности

в потоке сейсмических событий. Указывалось на существование циклов сейсмической активности разной длительности и на коррелированность моментов времени сильных, иногда и достаточно удаленных, землетрясений, в частности, на существование дублетов сильных землетрясений [Gardner, Knopoff, 1974; Вадковский и др., 1978; Одинец, 1983; Рыкунов, Смирнов, 1992; Любушин и др., 1998; Kagan, Jackson, 1991; 1999; Левин, 2006; Lombardi, Marzocchi, 2007; Викулин и др., 2008; McMinn, 2014; Kagan, 2014; Герман, 2021; Rodkin et al., 2021; и многие др.]. Рядом авторов (см., например, монографии [Баранов, Шибалин, 2019; Смирнов, Пономарев, 2020]) исследовалась структурированность переходных процессов сейсмичности; в связи с тем, что для анализа афтер-

шоковых последовательностей и случаев вызванной сейсмичности часто разворачивают плотные локальные сети наблюдений, подобные режимы удается исследовать более детально. Существенное отклонение потока сильных  $M \geq 6.3$  землетрясений Камчатки и Северных Курильских островов от распределения независимых событий было показано в работе [Родкин и др., 2020]; в последовательности таких событий типичны компактные по времени кластеры, в том числе включающие и сильно удаленные друг от друга землетрясения.

В перечисленных и других аналогичных по теме публикациях обычно рассматривалась или нестационарность сейсмического режима без выделения афтершоков, или коррелированность в режиме сильных событий, по закону Бота [Bath, 1965] не являющихся афтершоками друг друга. Но в первом случае нестационарность может породиться возникновением особенно сильных и продолжительных афтершоковых последовательностей, а при втором подходе число сильных землетрясений заведомо не велико, что ограничивает убедительность статистического анализа.

Для уточнения характера группирования землетрясений необходим анализ потока основных событий после удаления афтершоков. При этом следует иметь в виду, что алгоритма однозначного отнесения землетрясения к афтершокам или к независимым событиям не существует, и можно считать, что различные алгоритмы реализуют отбор как бы независимых событий с различной погрешностью.

Ниже, по данным о неглубокой сейсмичности Камчатки и прилегающих областей, с использованием ряда широко используемых алгоритмов идентификации афтершоков проводится выделение основных событий и анализ рядов этих событий с целью выявить существование кластеров сейсмичности. Обсуждаются устойчивость получаемых результатов и характеристики выявляемых кластеров основных событий в сравнении с модельным потоком независимых событий и с афтершоковыми последовательностями. Повторимся: под основными событиями далее понимаются все землетрясения после удаления, тем или иным методом, афтершоков. Возможный вклад афтершоков полагается при этом пренебрежимо малым.

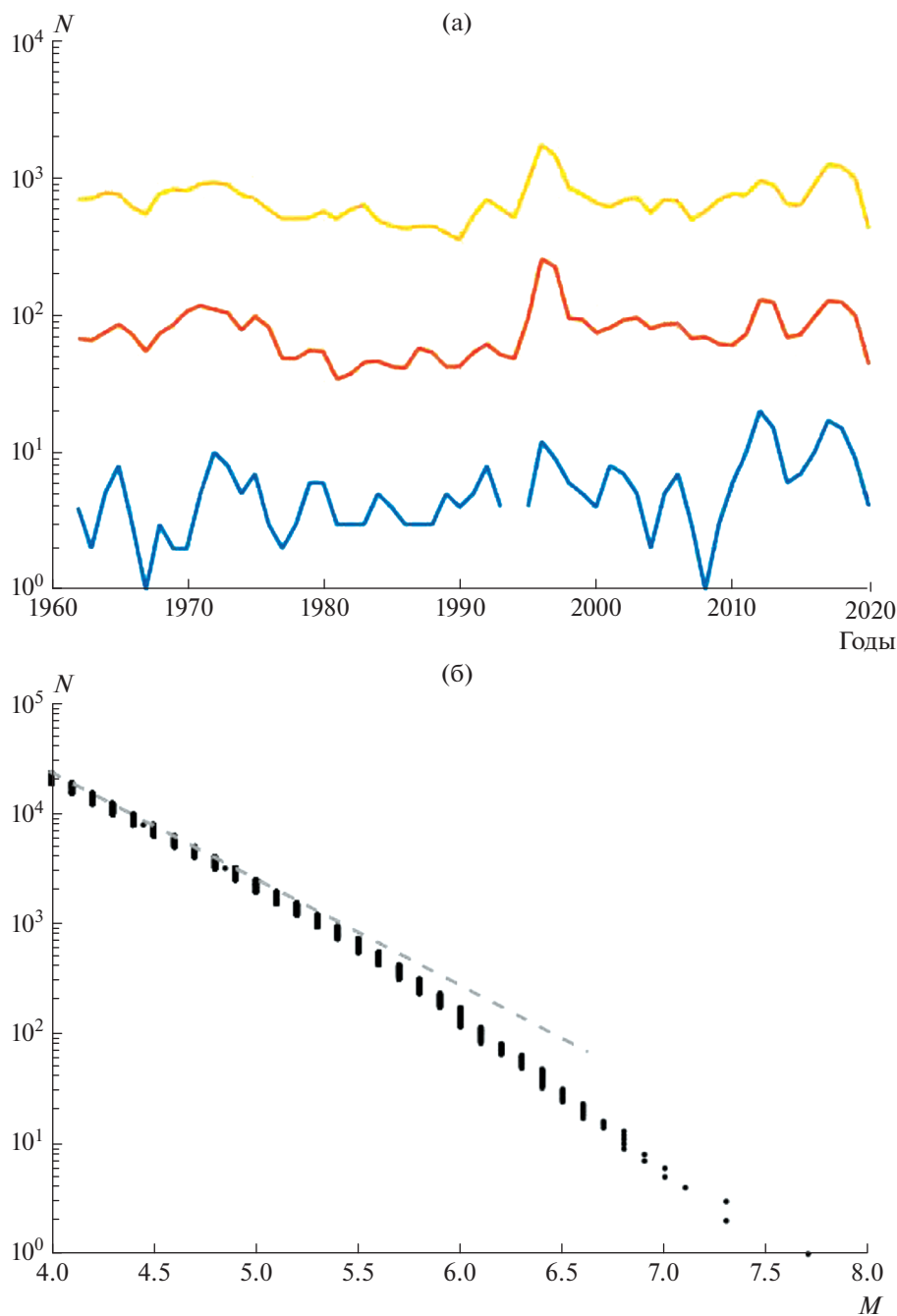
## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ПРОГРАММЫ ВЫДЕЛЕНИЯ АФТЕРШОКОВ

Нами использовался региональный каталог Камчатки с 01.01.1962 по 30.10.2020 гг., включающий, кроме собственно Камчатки, район Командорских островов и Северных Курил (см., описание базы данных в работах [Чеброва и др., 2013;

Чебров, 2020]. Наиболее полно в каталоге представлены магнитуды  $M_L$ , пересчитанные из энергетического класса. Если не оговорено иначе, ниже рассматриваются землетрясения с  $M \geq 4.0$  и глубиной очага  $H \leq 70$  км в области, ограниченной координатами  $155^\circ\text{--}173^\circ$  Е и  $48^\circ\text{--}60^\circ$  N. Согласно приведенному в работе [Смирнов и др., 2019] анализу, такие землетрясения являются представительными на всем интервале времени. На рис. 1а приведено распределение по годам числа землетрясений с магнитудами  $M \geq 6.0$ ,  $\geq 5.0$  и  $\geq 4.0$ . На рис. 1б представлен график повторяемости. Видно, что используемый каталог можно считать удовлетворительно полным для магнитуд  $M \geq 4.0$ . Заметим, однако, что так как нас интересует статистика относительно более сильных основных событий, точная граница значимости для нас не столь критична.

На настоящее время наибольшее распространение имеют несколько программ выделения афтершоков. Исторически первым и по-прежнему широко используемым методом выделения афтершоков является оконный метод в различных его модификациях [Knopoff, Gardner, 1974; Gardner, Knopoff, 1974; Uhrhammer, 1986; и др.]. В этом методе все события, следующие за сильным землетрясением в некотором пространственно-временном окне (зависящем от магнитуды данного сильного землетрясения) полагаются афтершоками. Оконные методы просты в реализации и достаточно эффективны. Но они логически ущербны. Эти методы заведомо убирают некоторые независимые события, которые, пусть и с невысокой вероятностью, попадают в пространственно-временные окна сильных землетрясений. При этом их приходится реализовывать не в соответствии с принципом причинности (от ранних событий к поздним), а в порядке уменьшения магнитуд. Иначе типично повторяющейся будет ситуация, когда сильные события объявляются афтершоками предыдущих более слабых землетрясений. В результате сравнения расчетов оконными методами Урхаммера и Гарднера—Кнопова для набора разных регионов выяснилось [Писаренко, Родкин, 2019], что вариант Гарднера—Кнопова дает, в среднем, меньшее рассогласование с потоком независимых событий; ниже мы используем этот вариант оконного метода.

Другим, возможно не менее популярным, является метод, предложенный в работе [Molchan, Dmitrieva, 1992] и программно реализованный В.Б. Смирновым. Программа выложена в общее пользование. Этот метод также используется ниже. В последние годы значительное развитие получил метод, основанный на выборе “ближайшего предка” данного землетрясения и на разделении по величинам условного расстояния от этого предка на зависимые и независимые события [Zalyapin et al., 2008; Zalyapin, Ben-Zion, 2013;



**Рис. 1.** Наполненность каталога. Изменения числа в год землетрясений с магнитудой  $M \geq 6.0$ ,  $\geq 5.0$  и  $\geq 4.0$ , нижняя, средняя и верхняя кривые соответственно (а) и график повторяемости землетрясений (б).

2020; и др.]. Данный метод, возможно более корректен теоретически, но и более сложен в практической реализации. В качестве упрощенного варианта этого подхода в работе [Писаренко, Родкин, 2019] был предложен и реализован метод выделения афтершоков на основе условного пространственно-временного расстояния  $h$  между данным землетрясением с магнитудой  $M_k$  и по-

следующим сейсмическим событием  $i$ , которое рассчитывается по формуле:

$$h = 10^W = R (T_i - T_k) r^d 10^{-bM_k}, \quad (1)$$

где:  $T_k, T_i$  – моменты времени этих землетрясений (годы);  $r$  – расстояние между ними в км;  $b$  – коэффициент наклона графика повторяемости Гутенберга–Рихтера;  $d$  – фрактальная размерность;  $R$  – коэффициент.

Распределение величин расстояний  $h$  обычно двугорбое; один максимум связывается с потоком независимых событий, с большими условными расстояниями  $h$  между землетрясениями; другой горб объясняется связанными событиями (преимущественно, афтершоками) с меньшими условными расстояниями. Распределения предположительно независимых и зависимых землетрясений сильно перекрываются. Решается задача на оптимальное разделение двух подмножеств независимых и зависимых событий неким пороговым значением расстояния  $h$ . В работе [Писаренко, Родкин, 2019] было оценено это расстояние и показано, что небольшое (в пределах порядка величины) варьирование величины порога  $h$  несущественно. Стандартно принимается  $W = -5$ ,  $d = 1.6$ ,  $R = 1$ . В данной работе были проведены расчеты для значений порога близости  $h$ , перекрывающих диапазон получаемого числа основных событий в рамках двух других алгоритмов [Gardner, Knoroff, 1974; Molchan, Dmitrieva, 1992]. Как и ранее в работе [Писаренко, Родкин, 2019], оказалось, что варьирование значений порога не приводит к заметным изменениям качества работы алгоритма.

Результаты отбора основных событий и афтершоков различными алгоритмами, естественно, различаются. Минимальное число основных событий обычно дает оконный метод; видимо, это связано с тем, что в пространственно-временные области, вырезаемые оконным методом, заведомо попадает некоторое число фоновых землетрясений. В нашем случае число основных событий по разным алгоритмам из общего числа 22732 землетрясений, оказалось равным 11679 при выделении оконным методом, 13327 по методике [Писаренко, Родкин, 2019] и 16865 по алгоритму [Molchan, Dmitrieva, 1992]. Далее, для краткости, будем обозначать оконный метод [Gardner, Knoroff, 1974] как ГК, метод [Molchan, Dmitrieva, 1992] как МД и алгоритм из работы [Писаренко, Родкин, 2019] как ПР.

Ниже рассматриваются результаты выделения основных событий перечисленными методами. Полученные ряды основных событий сравниваются с аналогичными модельными рядами, построенными в предположении статистической независимости основных событий. Мы исходили из того, что единообразие характера отклонений распределения основных событий, полученных разными методами, от модели их случайной независимой реализации, будет являться указанием, что такие отклонения не связаны с конкретным алгоритмом разделения основных событий и афтершоков. В результате сравнения выявляется довольно широкий набор отличий реальной последовательности основных событий от стационарного Пуассоновского процесса.

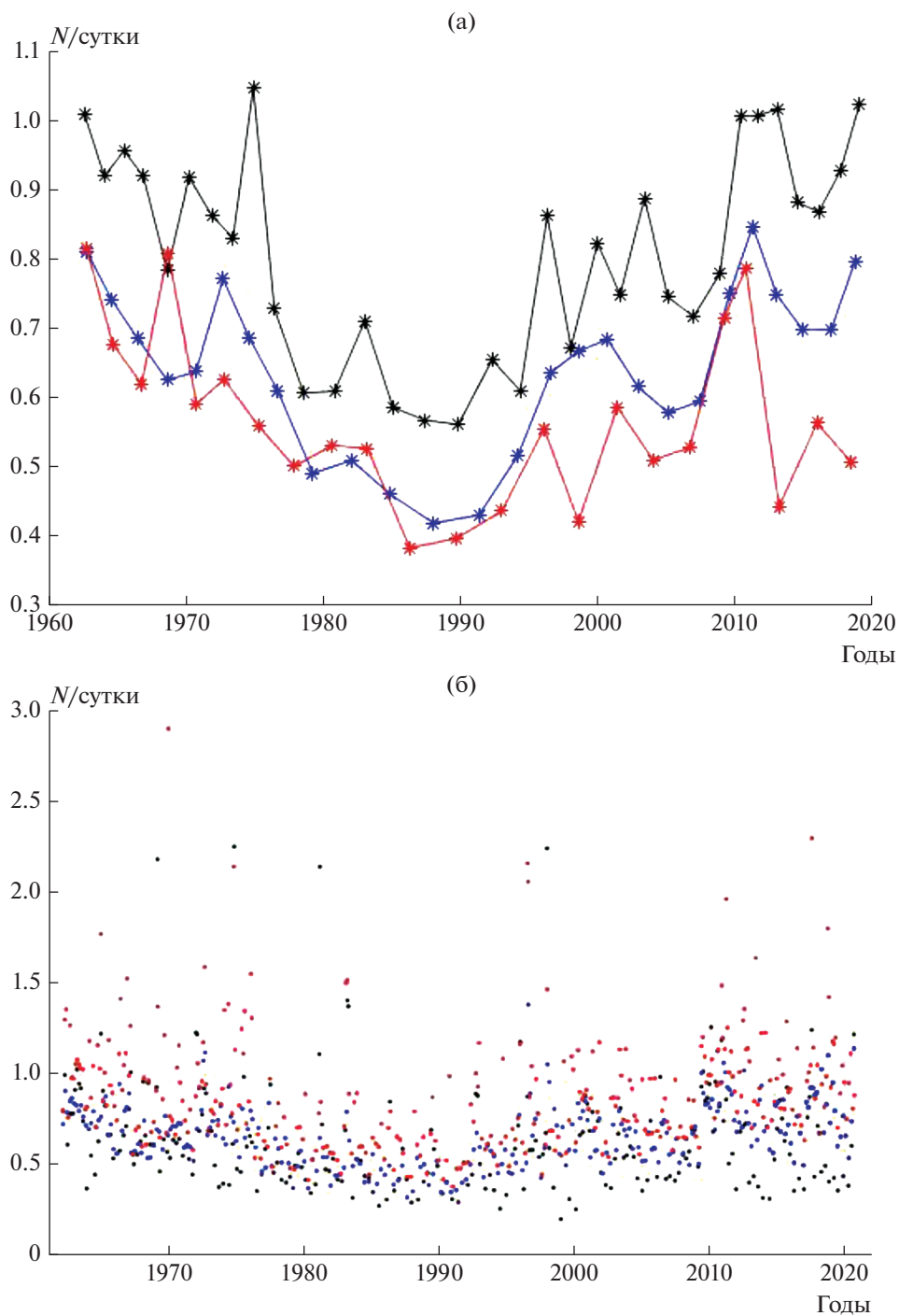
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Прежде всего продемонстрируем существенную нестационарность потока основных событий (рис. 2а, 2б). На рисунках “а” и “б” представлены средние плотности числа основных событий в день для последующих по времени непересекающихся групп землетрясений из 500 и 50 событий для трех указанных выше способов выделения основных событий. При заметно различающемся числе основных событий (при использовании разных методов выделения афтершоков) общий характер изменения во времени потока основных толчков сохраняется. Хорошо видна изменчивость потока основных событий на масштабе времени нескольких десятков лет. Максимумы сейсмической активности рассматриваемого региона приходятся на 1960–1970 гг. и с 2010 г. по настоящее время. Заметим, что менее определенно нестационарность сейсмичности (рост числа сильных  $M6+$  землетрясений) видна и на рис. 1а.

Дополнительная проверка нестационарности была проведена по критерию Колмогорова–Смирнова. Группы по 500 событий реализуются для данных трех методов отбора основных событий, в среднем за 920, 806 и 636 дней (по алгоритмам ГК, ПР и МД соответственно). Вероятность случайной реализации наблюдаемых за такие последовательные интервалы времени значений числа основных событий составляет менее 3%, менее 1%, и менее 0.1% для этих методов выделения афтершоков. Достоверность отклонений от модели стационарного Пуассоновского процесса ожидаемо растет с ростом числа основных событий.

Для групп из 50 последующих событий средние интервалы времени равны 92, 81 и 64 дням. Проверка для соответствующих интервалов времени показала, что для оконного метода полученная последовательность основных событий может реализоваться при стационарном Пуассоновском процессе с вероятностью менее 1%; последовательности основных событий полученные двумя другими методами могут реализоваться в стационарном случае с вероятностью менее 0.1%.

Аналогичная нестационарность сейсмичности по мировым данным отмечалась ранее в работах [Lombardi, Marzocchi, 2007; Левин, Сасорова, 2015; и др.]. Согласно работе [Lombardi, Marzocchi, 2007], анализ последовательностей сильных ( $M7+$ ) землетрясений показал, что в 4 регионах из 16 рассмотренных возможность описания режима сильных землетрясений стационарным законом Пуассона должна быть отвергнута (в случае выполнения модельного закона распределения вероятность реализации наблюдаемого и большего отклонения составляет менее 0.1). По данным работы [Левин, Сасорова, 2015], по мировым дан-



**Рис. 2.** Средняя плотность числа основных событий ( $M \geq 4.0$ ) для последовательных по времени групп из 500 (а) и 50 (б) землетрясений; черные точки – выделение афтершоков по оконному методу [Gardner, Knopoff, 1974], красные – по алгоритму в работе [Molchan, Dmitrieva, 1992], синие – по методу в работе [Писаренко, Родкин, 2019].

ным намечается рост сейсмичности в близкие к указанным выше интервалам времени.

Из вышесказанного следует, что получаемый разными методами поток основных событий существенно не стационарен. Значительная величина и единообразие отклонений для разных ме-

тодов декластеризации дает основания полагать, что нестационарность и независимость ряда основных событий не порождается несовершенством конкретного алгоритма выделения афтершоков, а является характерной чертой сейсмического режима. Такой вывод не нов, ранее

кластеризация основных событий отмечалась в работах [Kagan, Jackson, 1991; 1999; Lombardi, Marzocchi, 2007; и др.]. В нашем случае продемонстрировано единообразие характера кластеризации для разных алгоритмов отбора основных землетрясений. При этом отклонение оказывается статистически намного более убедительным за счет большего числа событий (все основные события, а не только сильнейшие землетрясения, по закону Бота [Bath, 1965] не могущие быть афтершоками).

Далее, мы почти не будем касаться долговременной изменчивости потока основных событий, и сосредоточимся на исследовании более коротких кластеров повышенной сейсмичности. Для этого сравним эмпирические распределения интервалов времени между последовательными главными событиями и теоретическое распределение, получаемое для того же числа событий, случайным равномерным образом распределенных на том же интервале времени. На рис. 3 дано сравнение 500 таких случайных выборок и последовательности основных событий для случая применения алгоритма Молчана–Дмитриевой (1992); видно очевидное различие модельных и эмпирических распределений. Из рисунка видно, что для эмпирического распределения существенно сильнее представлены относительно меньшие временные интервалы между землетрясениями, когда красная эмпирическая кривая в левой части графика идет много ниже полосы распределений для случайных стационарных реализаций. Как компенсация этого различия, в эмпирической выборке реже встречаются и большие интервалы между последовательными событиями. Четкое различие имеем для 500 случайных выборок; отсюда вероятность случайной реализации наблюдаемого распределения много меньше 0.2%.

Заметим, что различие в области малых интервалов времени между последовательными событиями лучше видно при логарифмическом масштабе по оси  $y$  (рис. 3а), а различие в области больших значений лучше видно при линейном масштабе по оси  $y$  (рис. 3б). Достоверность различия соответствующих модельных распределений и реального распределения статистически высокозначима и по критерию Колмогорова–Смирнова. Вероятность реализации эмпирического распределения для модельных зависимостей фактически равна нулю для левого края распределения (рис. 3а) и менее 0.1% для правого его края (рис. 3б).

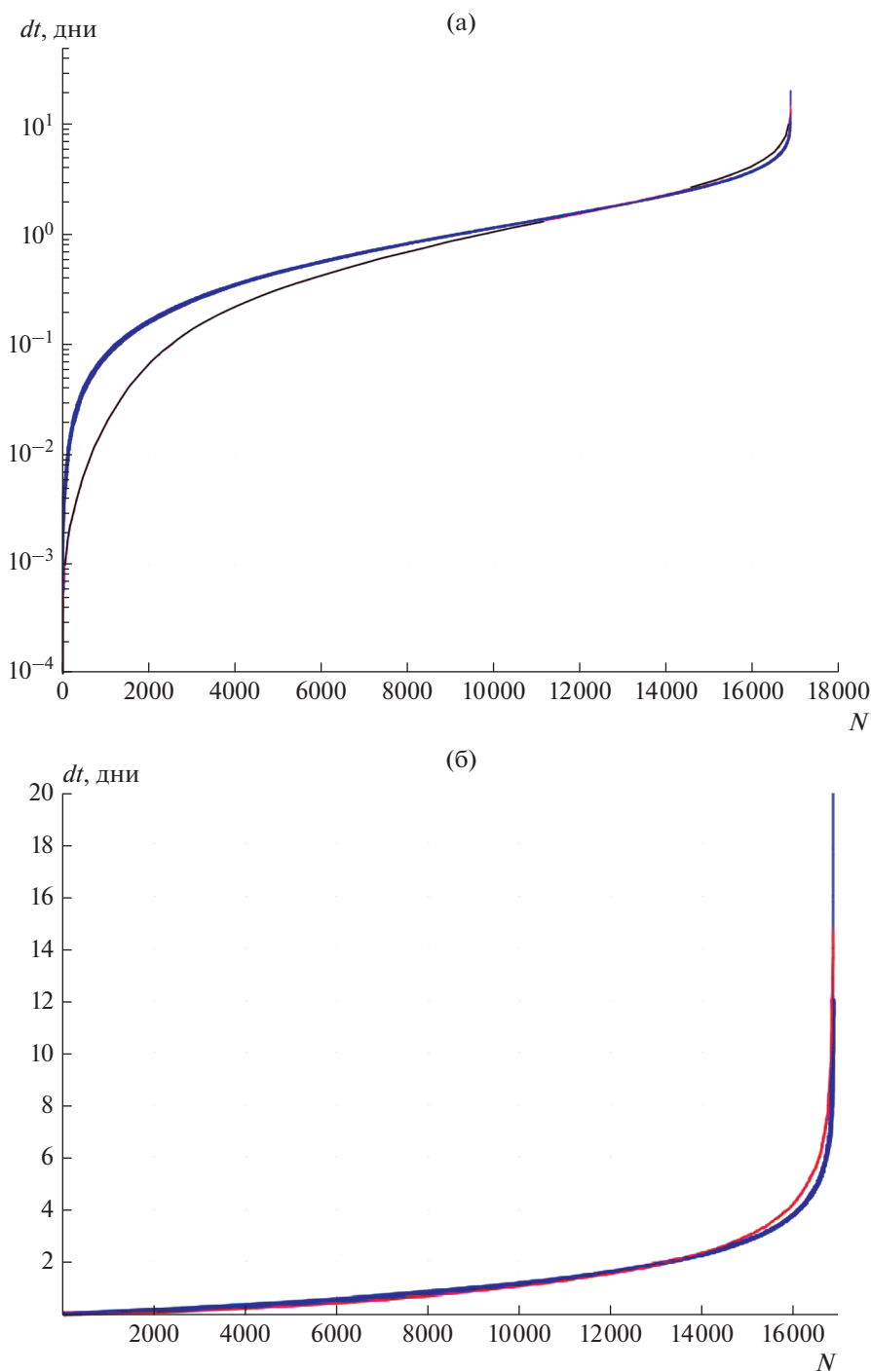
Аналогичные различия имеют место и для двух других методов декластеризации. В качестве примера, на рис. 4 дан график для случая выделения афтершоков по ПР алгоритму. С целью проверки устойчивости результатов сравнение выполнено для основных событий с  $M \geq 5.0$ . Таких землетрясений примерно на порядок меньше, соответ-

ственно и значимость различия также меньше. На рис. 4, как ранее на рис. 3а, даны 500 модельных кривых. Получаем, что на уровне 0.2% различие значимо. При росте числа модельных случайных реализаций до 10000 наблюдается перекрытие модельных и фактической зависимостей. Оценка различия эмпирического и теоретического распределений по критерию Колмогорова–Смирнова дает значимость различия  $\alpha = 0.1\%$ .

В совокупности рис. 3, рис. 4 демонстрируют единообразие характера отклонения при различных методах выделения афтершоков и с разным ограничением на порог магнитуд основных событий.

Сравнение графиков рис. 3 и рис. 4 позволяет выделить интервалы времени между последующими основными событиями, в которых различие модельных и эмпирических кривых устойчиво наблюдается для разных методов и для разных выборок данных. Для рассмотренных случаев этот интервал простирается от нескольких минут до 1.0–1.5 суток. Кластеры включают группу событий, поэтому минимальная длительность кластера будет в разы больше. Сравним степень проявленности кластеров основных событий, попадающих в интервалы времени продолжительностью 15, 30 и 60 дней (рис. 5). Начало интервала времени будем относить к моменту времени каждого очередного основного события, таким образом объем выборок на рис. 5 составит чуть более 11, 13 и 16 тысяч для трех используемых методов выделения афтершоков. Снова будем сравнивать реальный ряд основных событий и его модельные аналоги с тем же числом событий, равномерно случайным образом распределенных на таком же интервале времени.

Из рис. 5 видно, что во всех рассмотренных случаях реальное распределение числа основных событий, попадающих в интервал времени от двух недель до двух месяцев шире модельного, получаемого для случайного стационарного распределения основных землетрясений по времени. Для реальных последовательностей характерны реализации с аномально большой (и аномально низкой) концентрацией землетрясений. Характер отклонений аналогичен для разных методов выделения афтершоков и для разных интервалов времени (15, 30 и 60 дней). Проверка возможности реализации эмпирически наблюдаемых распределений на основе модельного равномерного по времени закона распределения с использованием критерия Колмогорова–Смирнова приводит к выводу о высокой статистической значимости отклонений от закона Пуассона. Возможность случайного возникновения наблюдаемых различий пренебрежимо мала, если интервалы времени начинаются в момент времени каждого очередного основного землетрясения и чуть ме-

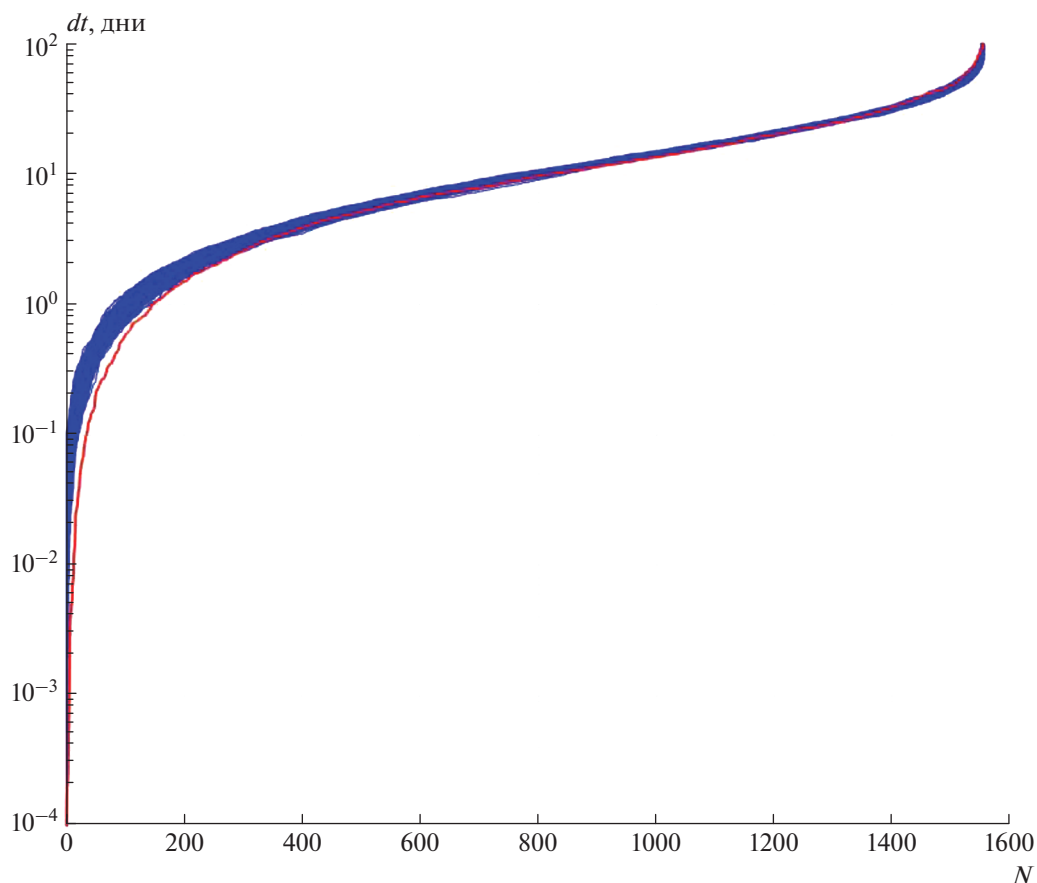


**Рис. 3.** Различие эмпирического распределения интервалов времени  $dt$  между последовательными основными событиями с  $M \geq 4.0$  (красная линия) и 500 случайными стационарными реализациями такого же числа событий на том же интервале времени (синие кривые), ось  $y$  дана в логарифмическом (а) и линейном масштабе (б). Афтершоки выделены по алгоритму в работе [Molchan, Dmitrieva, 1992].

нее 0.1, если анализируются непересекающиеся интервалы времени указанной длительности.

При сравнении графиков на рис. 5 для разных интервалов времени складывается представление, что отклонения от Пуассоновского закона

распределения возрастают с ростом интервала времени (15, 30 и 60 дней). Количественно это различие можно сравнивать, исходя из оценок близости эмпирически получаемого и модельного Пуассоновского распределения. Но удобнее



**Рис. 4.** Различие эмпирического распределения интервалов времени между последовательными основными событиями с  $M \geq 5.0$  (красная линия) и 500 случайными реализациями такого же числа событий на том же интервале времени (синие кривые), Афтершоки выделены по методу в работе [Писаренко, Родкин, 2019].

для такого сравнения нам представляется другой способ. Как известно, для Пуассоновского закона распределения параметр распределения  $\lambda$  и дисперсия  $\sigma$  равны. Эмпирические распределения на рис. 5 шире модельного пуассоновского распределения, соответственно дисперсии  $\sigma$  для этих распределений больше значений  $\lambda$ . Сравним

тогда величины отношения  $\sigma/\lambda$  для разных алгоритмов выделения афтершоков (ГК, МД и ПР) и для разных последовательных непересекающихся интервалов времени (длительностью 15, 30, 60, 120, 240 и 480 дней); результаты расчетов приведены в табл. 1. Дальнейшее увеличение интервала времени нецелесообразно, так как количество не-

**Таблица 1.** Отличие потока основных событий от закона Пуассона для разных интервалов времени усреднения и разных алгоритмов декластеризации

Методы, параметры	Интервалы времени, дни					
	15	30	60	120	240	480
ГК, $\lambda$	8.2	16.3	32.6	65.2	130.1	260.7
$\sigma$	35.4	88	218.5	633.5	1792	4690
$\sigma/\lambda$	4.32	5.4	6.7	9.72	13.8	18
МД, $\lambda$	11.2	23.5	47.1	94.2	188.3	375.9
$\sigma$	33.8	83.15	212.9	574.4	1764	6036
$\sigma/\lambda$	3.02	3.54	4.52	6.1	9.38	16
ПР, $\lambda$	9.3	18.6	37.2	74.4	148.6	297
$\sigma$	14.9	39.7	108.9	320	1038	3758
$\sigma/\lambda$	1.6	2.13	2.93	4.3	6.99	12.6



пересекающихся интервалов становится недостаточным для хорошей статистической оценки.

Из таблицы видно, что для всех методов выделения афтершоков величины отношения  $\sigma/\lambda$  систематически возрастают с увеличением интервала времени. Видно также, что эти отношения максимальны при использовании оконного (ГК) метода удаления афтершоков и минимальны при использовании метода ПР выделения афтершоков на основе расчета условного расстояния (1). Метод Молчана–Дмитриевой (МД) дает максимальное число основных событий и занимает промежуточное положение по степени близости к Пуассоновскому закону распределения. Данные таблицы подтверждают результат работы [Писаренко, Родкин, 2019], что метод ПР дает лучшее приближение к случайному процессу, чем оконный алгоритм ГК.

Понятия пространственно-временного расстояния  $D$  между разными землетрясениями  $i, j$  было введено в работе [Frohlich, Davis, 1990]. Исходно оно было введено как:

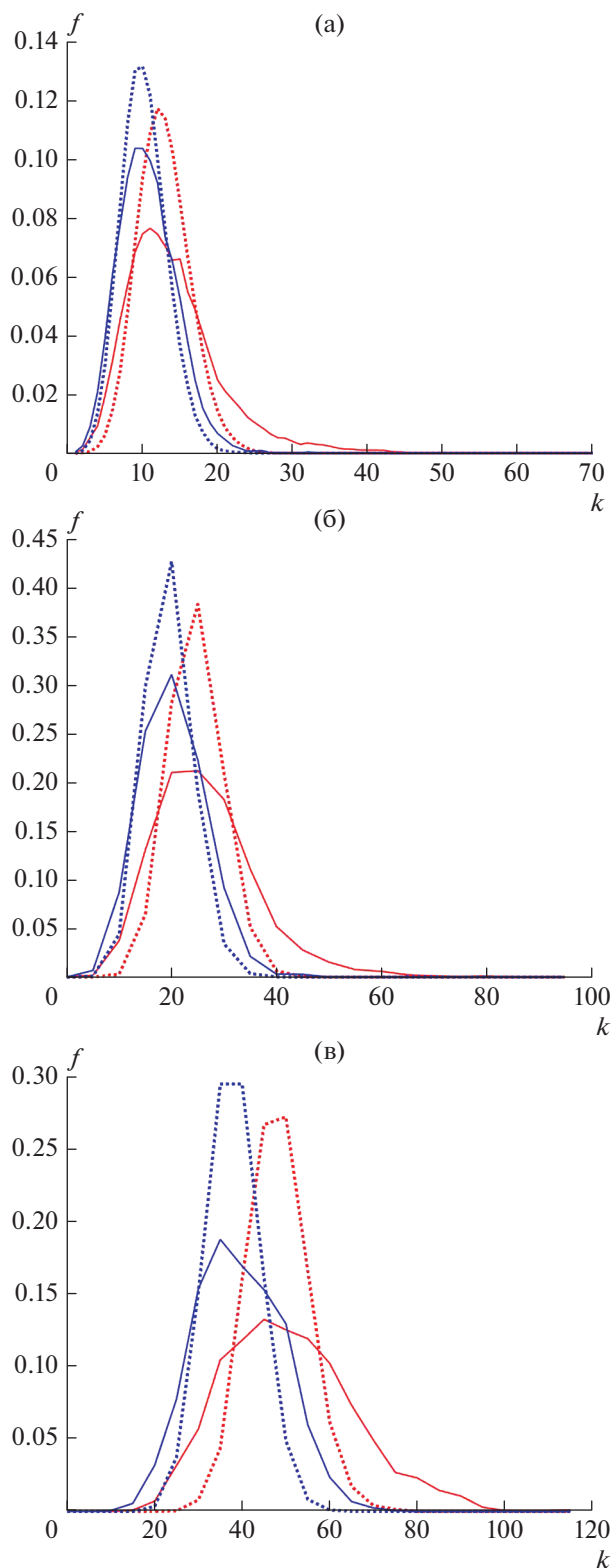
$$D_{ij} = \sqrt{\{r_{ij}^2 + C^2(t_i - t_j)\}}, \quad (2)$$

где коэффициент  $C = 1$  км/день.

В дальнейшем понятие такого условного расстояния уточнялось и детализировалось разными авторами [Davis, Frohlich, 1991; Baiesi, Paczuski, 2004; Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2020; и др.]; в разной постановке задачи предлагались разные варианты соотношения (2). Заметим, что более сложным вариантом задания условного расстояния между сейсмическими событиями является и соотношение (1), используемое в методе ПР выделения афтершоков.

В данной работе в качестве характеристики пространственно-временного расстояния между основными событиями мы будем использовать соотношение (2). Такой выбор обуславливается двумя обстоятельствами. Во-первых, предположительно независимые основные события, исходно понимаются как бы равноценными. Соответственно, величина их магнитуды представляется второстепенной характеристикой, и она не должна играть существенной роли. Во-вторых, соотношение (2) наиболее просто, а на первом этапе анализа предпочтительно использование более простых вариантов.

Проведем сравнение распределения величин среднего расстояния  $D$  для реальных и искусственных рядов основных событий (сравнения проводились для всех трех указанных выше алгоритмов выделения афтершоков). На рис. 6 приводится сравнение распределения величин условного расстояния  $D$  для реального каталога основных событий и для его модельных аналогов с тем же числом событий, равномерно случайным образом распределенных по такому же интервалу



**Рис. 5.** Сравнение плотностей распределений  $f$  для числа реальных (сплошная линия) и модельных (пунктир) основных событий  $k$ , попадающих в интервалы длительностью 15 (а), 30 (б) и 60 (в) дней. Красные линии – для выделения основных событий по методу в работе [Molchan, Dmitrieva, 1992], синие – по работе [Писаренко, Родкин, 2019].

времени; случайным образом задавалось время, координаты событий не менялись. Результаты приведены для методов выделения афтершоков по алгоритмам МД и ПР. Как и на рис. 5, сравнение проведем для интервалов времени 15, 30 и 60 дней.

Результаты качественно похожи на результаты рис. 5, но различия модельных распределений и реального распределения визуально выражены сильнее. Для всех трех интервалов времени распределения величин условных расстояний характеризуются большей долей малых и больших значений условного расстояния  $D$ , что и отвечает существованию кластеров сейсмичности. Так же как и ранее на рис. 5 и в табл. 1, величина отклонений от случайного распределения имеет тенденцию роста с увеличением времени осреднения (15, 30, 60 сут). Формальная проверка по критерию Колмогорова–Смирнова подтверждает это наблюдение.

Используя рис. 5 и рис. 6 можно выбрать диапазоны значений числа событий в кластере  $k$  и средних значений расстояния между событиями кластера  $D$ , которые с весьма малой вероятностью могут реализоваться в стационарном Пуассоновском процессе, и потому с большой вероятностью отвечают кластерам повышенной сейсмичности. Но удобнее выделить такие значения, исходя из рис. 7, где дано распределение величин  $k$ ,  $D$  для реальных данных и для модели независимых событий для интервалов времени 15 и 30 дней (афтершоки удалены по методу в работе Molchan, Dmitrieva, 1992] и для интервала 60 дней, по оконному методу в работе [Gardner, Knopoff, 1974]. Снова видим качественное единообразие результатов для разных методов удаления афтершоков.

Видно, что для реальной последовательности основных землетрясений множество значений  $\{k, D\}$  существенно шире, чем для модельных последовательностей независимых событий. В плане выделения кластеров основных событий интерес представляют области с большими значениями  $k$  и невысокими значениями среднего расстояния  $D$ , далеко отступающими от области значений  $\{k, D\}$  параметров для случайного модельного процесса.

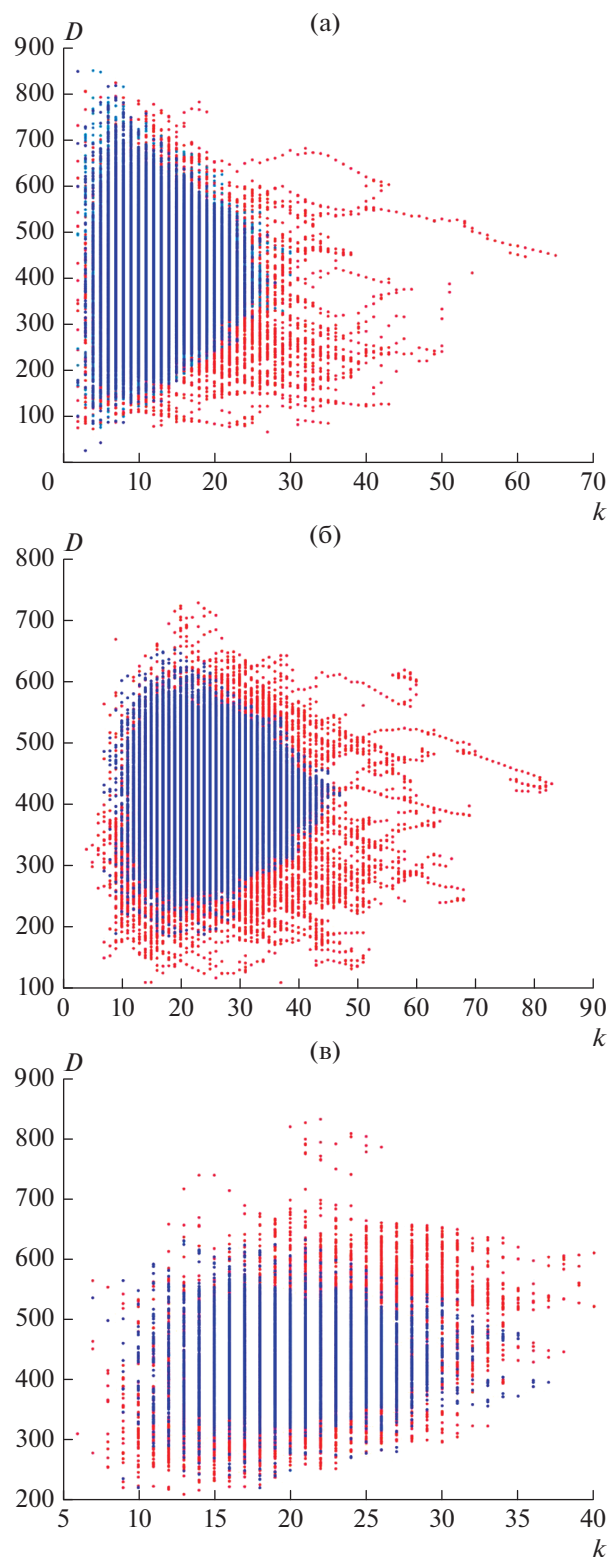
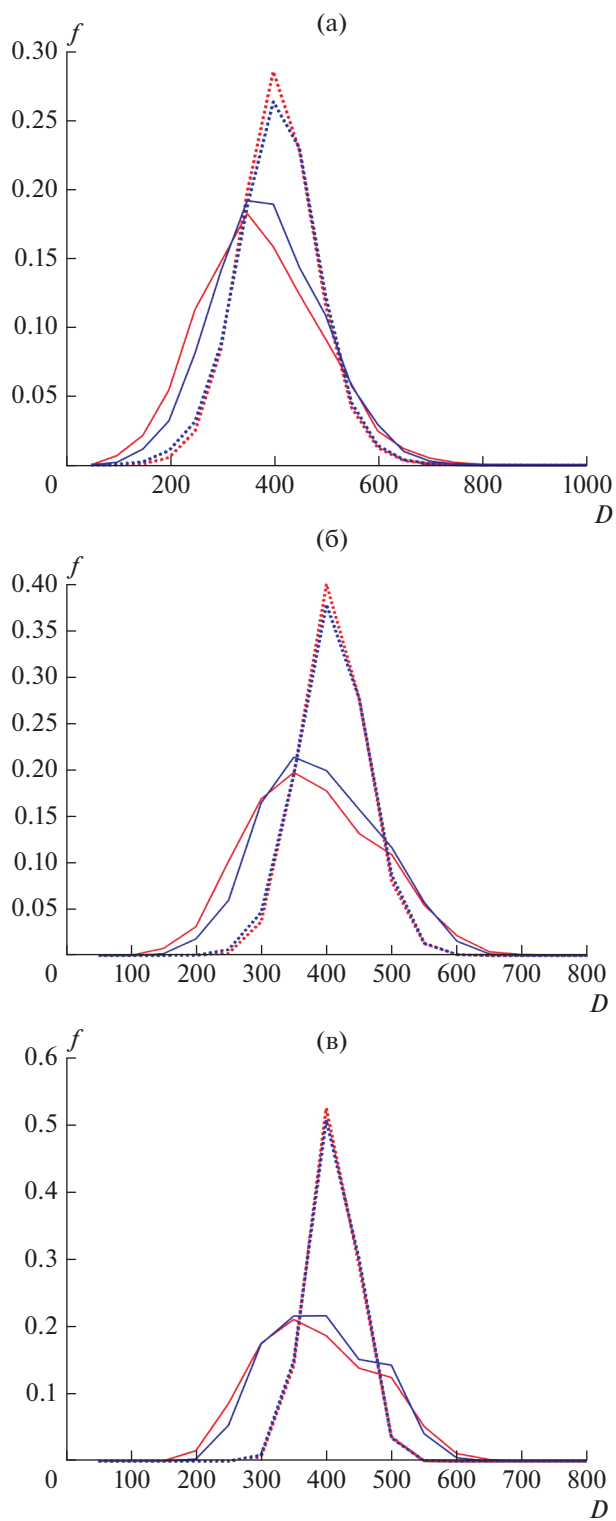
Специально отметим характер изменчивости средних значений расстояний (рассчитанных по формуле (2) во времени. На рис. 8 приведен график изменения среднего расстояния  $D$  для интервалов времени 15 сут, начинающихся в момент каждого очередного главного события по МД-алгоритму. Для интервалов времени 30 и 60 дней результаты качественно аналогичны. Получаемые ряды существенно не стационарны. Сравнивая рис. 8 и рис. 2, видим, что временная изменчивость величин  $D$  коррелирует с изменением интенсивности потока основных событий. Значимость корреляции достаточно высокая; так, на-

пример, для ПР-метода выделения афтершоков и непересекающихся интервалов времени 60 дней коэффициент корреляции между потоком событий и средним расстоянием (2) между событиями  $R = 0.37$ ; при 357 непересекающихся интервалах дает вероятность неслучайности корреляции 99%. Близкие оценки имеем и для других случаев.

Заметим, что положительный знак выявленной корреляции не был ожидаем. Действительно, рост числа событий приводит к добавлению более малых интервалов времени и расстояний между событиями; это скорее должно было привести к уменьшению, а не увеличению среднего расстояния между основными землетрясениями. Полученный результат предположительно можно интерпретировать в том плане, что с ростом интенсивности потока основных событий происходит прогрессирующая активизация структур большего пространственно-временного масштаба, что и обеспечивает рост среднего пространственно-временного расстояния  $D$  между последовательными событиями.

Сравним теперь пары значений среднего расстояния  $D$  и числа событий  $k$  для кластеров основных землетрясений, для модельного варианта независимых событий, и для афтершоковых последовательностей. В качестве набора данных по афтершоковым последовательностям будем использовать результаты применения МД-метода удаления афтершоков. Для большей статистической обеспеченности характеристик афтершоковых последовательностей ограничимся случаями, когда последовательность афтершоков включает не менее 15 событий. Характер изменчивости величин среднего пространственно-временного расстояния между афтершоками, насколько нам известно, ранее не исследовался.

Расположение областей  $\{k, D\}$  для модельных случайных примеров и реальных основных событий заметно различаются для интервалов времени 15, 30 и 60 дней (рис. 7). Для определенности сравним с данными по афтершокам наборы данных для интервалов длительностью 30 дней. Неким основанием для такого выбора является то, что характерное среднее время для выбранных афтершоковых последовательностей составляет около 40 дней (под характерным временем имеем в виду средний интервал времени между моментом основного события и его афтершоками). Тогда, исходя из рис. 7б для интервалов времени 30 дней, за кластеры основных событий примем кластеры, отвечающие одному из частично перекрывающихся условий  $D < 200$  или  $k > 35$  и  $D < 300$ . Как видно из рисунка, такие кластеры практически не могли возникнуть случайной флуктуацией потока независимых событий; так как  $\{k, D\}$  область таких кластеров сильно отличается с областью  $\{k, D\}$  значений для модельных случайных реализаций.



**Рис. 6.** Сравнение плотностей распределений  $f$  для средних условных расстояний  $D$  для реальных (сплошная линия) и модельных (пунктир) основных событий, попадающих в интервалы длительностью 15 (а), 30 (б) и 60 (в) дней. Красные линии – выделение афтершоков по методу в работе [Molchan, Dmitrieva, 1992], синие – по работе [Писаренко, Родкин, 2019].

**Рис. 7.** Сравнение числа событий ( $k$ ) в последовательных интервалах времени длительностью 15 (а), 30 (б) и 60 (в) дней со средним расстоянием между событиями ( $D$ ), для эмпирической совокупности основных событий (красные точки) и для искусственной модели (синие). Афтершоки удалены по МД-методу (а), (б) и по оконному ГК-методу (в).

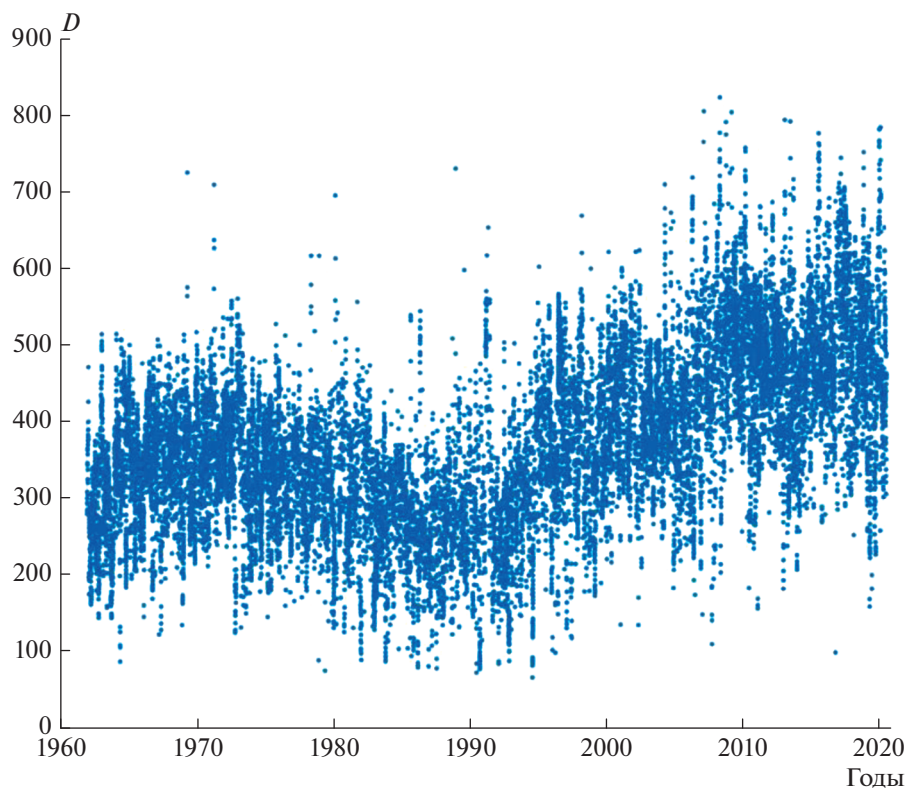


Рис. 8. Изменчивость среднего расстояния  $D$  между основными событиями в интервалах времени длительностью 15 сут.

На рис. 9 в двойном логарифмическом масштабе дано сравнение средних расстояний и числа событий  $\{k, D\}$  в кластерах основных событий, в афтершоковых последовательностях и для случайного равномерного распределения. Для афтершоковых последовательностей наблюдается устойчивая тенденция роста величин среднего расстояния  $D$  с ростом числа событий в кластере  $k$ .

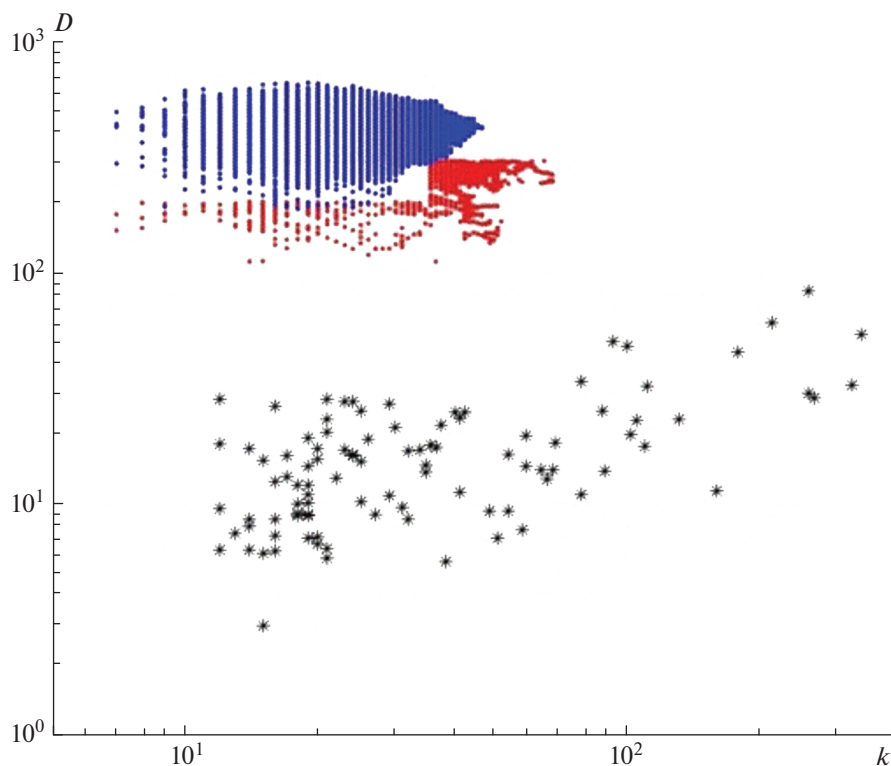
Представляется существенным, что область значений  $\{k, D\}$  для кластеров основных событий существенно отличается от таковой для афтершоковых последовательностей и примыкает к области модельных случайных событий. Значительное различие расположения  $\{k, D\}$  областей указывает на различие физических механизмов возникновения афтершоковых последовательностей и кластеров основных событий.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Выше приведены свидетельства в пользу существенно больших, чем это обычно предполагается, отличий режима основных землетрясений (после исключения афтершоков) от стационарного Пуассоновского процесса. Возникает естественный вопрос, как это согласуется с результатами других исследований, в частности, с недавней статьей одного из авторов работы [Писаренко, Родкин,

2019]. В этой статье был предложен новый алгоритм выделения афтершоков. По результатам расчетов для 17 регионов четырьмя разными методами, было получено, что примерно в трети случаев методы выделения афтершоков дают временные ряды основных событий, не согласующиеся с моделью стационарного Пуассоновского процесса. Аналогично, в работе [Lombardi, Marzocchi, 2007] двумя разными методами оценивалась стационарность режима  $M_s7+$  землетрясений для 15 регионов с лучшей статистикой таких событий и для Земли в целом. В 4-х случаях эмпирические данные не могли быть интерпретированы в рамках закона Пуассона. Был сделан вывод, что широко используемое или молчаливо подразумеваемое предположение о возможности описания потока сильных землетрясений законом Пуассона следует считать, по меньшей мере, не точным. Для более точного описания сейсмического режима предлагается использовать модель ETAS с изменяющимися параметрами. К аналогичному выводу о предпочтительности описания режима сейсмичности с использованием модели с пространственно и/или во времени изменяющимися параметрами приходят авторы [Kattanmachi et al., 2017; Nandan et al., 2019].

В нашем случае, по данным регионального каталога Камчатки, Командорских островов и Се-



**Рис. 9.** Соотношение между числом событий  $k$  и средним расстоянием  $D$  для афтершоковых последовательностей (черные звездочки), для кластеров основных событий и для случайных реализаций для 30-дневных интервалов (красные и синие точки соответственно); резкие прямолинейные границы  $\{k, D\}$  области кластеров основных событий обусловлены ограничениями, принятыми при отборе кластеров.

верных Курил ( $M4+$ ,  $H \leq 70$  км), отклонения режима основных землетрясений от стационарного потока независимых событий выражено существенно сильнее, чем в большинстве цитируемых выше работ. Это может быть связано как с большим числом событий (использовался региональный каталог  $M4+$ ), так и с особенностью сейсмического режима данного региона; из шести землетрясений с  $M7+$  четыре произошли здесь в узкий интервал времени 2006–2010 гг. (аналогичный всплеск сейсмичности имеет здесь место по данным о величинах сейсмического момента, мировой GCMT-каталог).

Представляется существенным, что отличие режима основных событий от стационарного Пуассоновского процесса единообразно при различных методах выделения афтершоков. Такие отличия выявлены на временных масштабах от десятков минут до десятков лет. Видимо они имеют место и на больших временах. В этой связи сошлемся на палеосейсмические данные, свидетельствующие о кластеризации сильных землетрясений в районе Мертвого моря на интервалах времени около 10 тысяч лет [Marco et al., 1996]. В настоящей работе более подробно исследованы неоднородности потока основных событий на

интервалах 15, 30 и 60 дней и менее детально до 480 дней. Наблюдается тенденция роста величин отклонения от модельного случайного распределения с увеличением интервала времени осреднения. Такая тенденция вполне ожидаема. Сейсмичность является динамическим неравновесным процессом, а для таких процессов типичен  $1/f$  характер спектра, с сильным доминированием низкочастотных компонент [Turcotte, 1997; Sornette, 2000; и др.]. Ранее иерархичность сейсмического режима с ростом амплитуд гармоник на больших периодах отмечалась в работах [Вадковский и др., 1978; Родкин, Слепнев, 2008; и др.].

Более детально рассмотрены взаимосвязи между характеристиками кластеров основных событий на интервалах времени 15, 30 и 60 дней. Изменения среднего пространственно-временного расстояния между основными очагами в группах землетрясений такой продолжительности, несколько неожиданно, оказались коррелированными с изменениями средней интенсивности потока сейсмических событий во времени. Похожая тенденция наблюдается для афтершоковых последовательностей, в которых среднее пространственно-временное расстояние между афтершоками растет с ростом числа событий в аф-

тершоковой последовательности (рис. 9). Полученную тенденцию можно интерпретировать в том смысле, что при увеличении интенсивности потока событий и числа событий в кластерах опережающими темпами растет активизация, отвечающая относительно большим пространственным масштабам.

В координатах “число событий в кластере  $k$  – среднее пространственно-временное расстояние  $D$  между событиями” кластеры основных землетрясений занимают промежуточное положение между значениями для афтершоковых последовательностей и для модельных примеров, отвечающих потоку независимых событий, примыкая к этим последним. Значительное различие областей  $\{k, D\}$  для афтершоковых последовательностей и для кластеров концентрации основных событий свидетельствует в пользу различия физических механизмов формирования афтершоковых последовательностей и процессов группирования основных землетрясений.

Наличие существенной, в том числе долговременной, коррелированности в потоке основных землетрясений указывает на возможную значительную погрешность общепринятого подхода к расчету сейсмической опасности. Если сильные основные события заметно кластеризуются во времени и пространстве, то ущерб от последующего сильного события, учитывая повреждения, нанесенные ранее происшедшим сильным землетрясением, может оказаться аномально сильным. Ранее такая опасность уже отмечалась в работах [Lombardi, Marzocchi, 2007; Герман, 2021].

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Института физики Земли РАН и Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rg.ru/usu/507436/>).

Авторы признательны куратору и рецензентам, замечания и вопросы которых способствовали уточнению и большей доказательности ряда положений статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баранов С.В., Шебалин П.Н. Закономерности постсейсмических процессов и прогноз сильных афтершоков. М. 2019. 218 с.

Вадковский В.Н., Ляховский В.А., Тюпкин Ю.С. Временная эволюция сейсмической активности Балканского региона. Алгоритмы и результаты обработки в МЦД. М. 1978. С. 11–23.

Викулин А.В., Викулина С.А., Водинчар Г.М. Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений – закономерность сейсмического процесса. Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РА. 2008. С. 145–149.

Герман В.И. Учет группировки землетрясений во времени при оценке сейсмической опасности. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений. тезисы докладов II всероссийской конференции с международным участием. М. 2021. С. 32–33

Левин Б.В. О природе некоторых периодических изменений в сейсмическом режиме Земли // Вестник ДВО РАН. 2006. № 1. С. 51–58.

Левин Б.В., Сасорова Е.В. Динамика сейсмической активности Земли за 120 лет // Докл. РАН. 2015. Т. 461. № 1. С. 82–87.

Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

<https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>

Любушин А.А., Писаренко В.Ф., Ружич В.В., Буддо В.Ю. Выделение периодичностей в сейсмическом режиме // Физика Земли. 1998. № 1. С. 62–76.

Одинец М.Г. Статистический анализ последовательности землетрясений Дальнего Востока и Средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1983. № 8. С. 20–29.

Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Декластеризация потока сейсмических событий, статистический анализ // Физика Земли. 2019. № 5. С. 1–15.

Родкин М.В., Андреева М.Ю., Григорьева О.О. Анализ обобщенной окрестности сильного землетрясения по региональным данным, Курило-Камчатский регион // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 67–77.

Родкин М.В., Слепнев А.С. О прогнозе значительных изменений в поведении динамических систем – модели и признаки развития неустойчивости. Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск. 2008. С. 54–63.

Рыкунов Л.Н., Смирнов В.Б. Сейсмология микромасштаба // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 3–15.

Смирнов В.Б., Отти С., Потанина М.Г., Михайлов В.О., Петров А.Г., Шапиро Н.М., Пономарев А.В. Оценки параметров цикла разрушения литосферы по данным региональных каталогов землетрясений // Физика Земли. 2019. № 5. С. 3–21.

Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с. ISBN 978-5-907036-90-1.

Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21.

- № 3. С. 66–91.  
<https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>  
 Чебров В.Н., Дрожнин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеников С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 18–40.  
<https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>  
 Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // *Phys. Rev. E*. 2004. V. 69. P. 66–106.  
 Bath M. Lateral inhomogeneities in the upper mantle // *Tectonophysics*. 1965. V. 2. P. 483–514.  
 Davis S.D., Frohlich C. Single-link cluster analysis, synthetic earthquake catalogues, and aftershock identification // *Geophys. J. Int.* 1991. V. 104 P. 289–306.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb02512.x>  
 Frohlich C., Davis S.D. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues // *Geophys. J. Int.* 1990. V. 100. P. 19–32.  
<https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.1990.TB04564.X>  
 Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // *Bull. Seis. Soc. Am.* 1974. V. 64. № 5. P. 1363–1367.  
 Kagan Y., Jackson D. Long-term earthquake clustering // *Geophys. J. Intern.* 1991. V. 104. № 1. P. 117–133.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb02498.x>  
 Kagan Y.Y., Jackson D.D. Worldwide doublets of large shallow earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1999. V. 89. P. 1147–1155.  
 Kagan Y.Y. Earthquakes. Models, Statistics, Testable Forecasts. John Wiley & Sons Limited. 2014. 306 p. ISBN: 978-1-118-63792-0  
 Kattamanchi S., Tiwari R.K., Ramesh D.S. Non-stationary ETAS to model earthquake occurrences affected by episodic aseismic transients // *Earth Planets and Space*. 2017. V. 69(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40623-017-0741-0>  
 Knopoff L., Gardner J. K., Higher Seismic Activity During Local Night on the Raw Worldwide Earthquake Catalogue // *Geophys. J. Int.* 1972. V. 28. № 3. P. 311–313.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb06133.x>  
 Lombardi A.M., Marzocchi W. Evidence of clustering and nonstationarity in the time distribution of large worldwide earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112 (B2). B02303  
<https://doi.org/10.1029/2006JB004568>  
 Marco S., Stein M., Agnon A., Ron H. Long-term earthquake clustering: A 50 000-year paleoseismic record in the Dead Sea graben // *J. Geophysical Research Atmospheres*. 1996. V. 101. № 3. P. 6179–6191.  
<https://doi.org/10.1029/95JB01587>  
 Molchan G., Dmitrieva O. Aftershock identification and new approaches // *Geophys. J. Int.* 1992. V. 109. P. 501–516.  
 McMinn D. 9/56 Year Cycle: Earthquakes in the Pacific Rim of South America // *New Concepts in Global Tectonics Newsletter*. 2014. V. 2. № 3. P. 10–18.  
 Nandan S., Ouillon G., Sornette D., Wiemer S. Forecasting the Rates of Future Aftershocks of All Generations Is Essential to Develop Better Earthquake Forecast Models // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2019.  
<https://doi.org/10.1029/2018JB016668>  
 Rodkin M.V., Andreeva M.Yu., Liperovskaya E.V. Types of strong earthquake precursor behavior obtained from world and regional catalogs of earthquakes // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 946. 012008  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/946/1/012008>  
 Sornette D. Critical phenomena in natural sciences. Springer. 2000. Berlin. 434 p.  
 Turcotte D.L. Fractals and chaos in geology and geophysics. (2nd ed.) Cambridge Univ. Press. 1997. 398 p.  
 Uhrhammer R. Characteristics of Northern and Central California Seismicity // *Earthquake Notes*. 1986. V. 57. № 1. P. 21.  
 Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H. Clustering Analysis of Seismicity and Aftershock Identification // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101. № 1. P. 1–4.  
 Zalyapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in Southern California I: Identification and stability // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 2847–2864.  
<https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>  
 Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake declustering using the nearest-neighbor approach in 426 space- time- magnitude domain // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2020. V. 125. № 4.  
<https://doi.org/10.1029/2018JB017120>

## Irregularities in the Intensity of the Flow of Main Events: an Example of the Shallow Seismicity in the Kamchatka Region

M. V. Rodkin<sup>a, b, \*</sup> and E. V. Liperovskaya<sup>c, \*\*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences (IEPT RAS), Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (IMGG FAB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

<sup>c</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia*

\*e-mail: rodkin@mitp.ru

\*\*e-mail: liper@ifz.ru

The paper shows that there are significant deviations between the regime of main events and the stationary Poisson process for three different aftershock removal methods, using shallow earthquakes in the Kamchatka region as an example; the pattern of these deviations does not depend on which aftershock removal method is used. The value of the deviations tends to grow as the averaging time increases. The work compares the trends in the characteristic spatiotemporal distance between earthquakes for artificial stationary sequences of

independent events, real main events, and aftershock sequences. The parameters of the main event clusters are very different from those of the aftershock sequences, which apparently indicates a difference in how aftershock sequences and main event clusters physically emerge. It is found that the characteristic distance between consecutive earthquakes in groups of main events tends to grow as the intensity of the flow of events increases. Apparently, this trend is consistent with the fact that as the intensity of the flow of main events increases, the activity of larger seismogenic structures and the probability of larger earthquakes grow faster. The described significant non-stationarity of the flow of main events indicates a certain limitation of the generally accepted approach to seismic hazard assessment.

*Keywords:* non-stationarity of the regime of main earthquakes, clusters of main earthquakes, dominance of long-term components, seismic hazard