

О СУТОЧНОЙ КВАЗИПЕРИОДИЧНОСТИ И СЛУЧАЙНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В ПОТОКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

В.Н. Сычев¹, Л.М. Богомолов², Н.А. Сычева¹

¹ФГБУН Научная станция РАН, г. Бишкек

²ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: sychev@gdirc.ru

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.

Для двух сейсмически активных регионов с различной геодинамической обстановкой (Центральная Азия и Дальний Восток) проведен анализ распределений сейсмичности во времени для выявления квазипериодических вариаций (прежде всего, суточного хода) и последовательностей, соответствующих реализациям случайного процесса. Показано, что фаза суточных вариаций усредненной сейсмической активности синхронизирована с локальным временем, а не с фазой лунно-солнечных приливов. Это свидетельствует в пользу ионосферного влияния, так как именно для ионосферных эффектов характерен суточный ход, привязанный к смене светлого и темного времени суток. Показано, что на коротких временных интервалах последовательность сейсмических событий соответствует реализациям случайного процесса, описываемого распределением Пойа.

Ключевые слова: сейсмическое событие, каталог, энергетический класс, квазипериодичность, распределение случайное, Центральная Азия, Дальний Восток.

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнано, что поток сейсмических событий для конкретного изучаемого региона отражает процесс деструкции геосреды, сочетающей элементы непрерывной во времени пластической деформации и хрупкого разрушения, реализующегося дискретно. Этим предопределено наличие характеристик регулярных (детерминированных) и случайных процессов в последовательностях сейсмических событий, которые описываются региональными каталогами, включающими слабые землетрясения. Вопрос о проявлениях регулярности и случайности представляет интерес в связи с продолжающейся дискуссией о границах применимости для области очага землетрясения модели самоорганизованной критичности (индетерминированного типа, исключающего возможность каких-либо прогнозов). Признаком детерминизма может быть, наряду с элементами памяти, анализируемыми в модели [9], повторяемость максимумов и минимумов сейсмической активности с определенными периодами, в частности, суточная периодичность [1, 3–5].

Целью работы является анализ распределения по времени суток слабых сейсмических событий,

регистрируемых на территории двух регионов Азии, различающихся по геодинамическим условиям (Тянь-Шань – внутриконтинентальный ороген, Дальний Восток, в частности, о. Сахалин, – зона выраженного взаимодействия тектонических плит). Сопутствующая задача – выяснение условий, при которых поток сейсмических событий описывается известными моделями случайных процессов (распределениями Пуассона и Пойа). Эта информация имеет важное значение, поскольку при подготовке сильного землетрясения (с большой очаговой зоной) процесс деструкции геосреды с необходимостью перестает быть случайным. В предшествующих работах проявления регулярности (периодичности) и случайности рассматривались, как правило, независимо друг от друга.

На существование квазипериодичностей с характерными периодами 2–40 суток, а также на изменение периодограмм было обращено внимание в [6, 10, 11]. Распределению сейсмичности по времени суток посвящено большое число работ, обзор и библиография приведены, например, в [1]. Неравномерность распределения и, в частности, максимум сейсмической активности в ночное время суток были отмечены для Центральной Азии, [4, 5, 13] и для Кам-

чатки [1, 3]. Наряду с соответствием результатов упомянутых работ, важно подчеркнуть следующее: хотя обнаруженный в [3, 5] суточный ход с характерным ночным максимумом является несомненным проявлением квазипериодичности, однако для суточной гармоникой относительная плотность распределения по периодам меньше, чем, например, в случае периодичностей, найденных в [10, 11]. Уже в силу этого обстоятельства можно ожидать присутствия случайной составляющей в потоке событий, что отражается на характере распределений по временным интервалам.

Ранее предпринимались попытки рассмотреть распределение сейсмичности как случайный, в частности, как пуассоновский процесс [16]. Из-за ограниченной применимости модели Пуассона (только для случая стационарного потока событий, без последствия) в современных работах также используются распределения с большим числом параметров (биномиальное, бета- и гамма-распределения и др.). В настоящей работе поток сейсмических событий сопоставляется с распределениями Пуассона и Пойа. Распределение Пойа описывает случайный процесс с эффектом последствия, благодаря чему отпадает проблема исключения афтершоков из сейсмических каталогов. Функция плотности распределения Пойа имеет вид [2]:

$$P_m = \left(\frac{t}{1+at}\right)^m \frac{1(1+a)\dots[1+(m-1)a]}{m!} P_0, \quad (1)$$

где P_m – вероятность того, что в единицу времени произойдет m событий, P_0 , a и t – параметры закона распределения Пойа. Вероятность отсутствия событий P_0 и параметр a определяются выражениями

$$P_0 = (1+a \cdot M)^{-1/a}, \quad a = (D/M - 1)/M, \quad (2)$$

в котором M обозначает математическое ожидание ($t = M$), D – дисперсию. В предельном случае, когда $D \rightarrow M$, распределение Пойа переходит в распределение Пуассона. Важно отметить, что применение распределения Пойа показало свою эффективность для анализа наведенной сейсмичности [24]. Однако до настоящего времени не рассматривался вопрос, для какого диапазона энергий поток событий удовлетворяет наилучшим образом модельным случайным распределениям. Априорно можно предполагать, что наиболее слабые события в большей степени отражают псевдопластическое деформирование геосреды, и для них сильнее выражены детерминированные черты (квазипериодичность), а события более высоких классов лучше соответствуют распределениям Пойа или Пуассона. Для проверки этой гипотезы также удобно

использовать данные с цифровых сейсмических сетей, имеющихся в нескольких регионах Азии.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ, МЕТОДИКА

Для настоящего исследования было выбрано два компактных субрегиона Центральной Азии, для которых имеются сейсмические каталоги слабых (локальных) событий, а также территория южной части о. Сахалин и п-ова Камчатка. Каталог землетрясений южной части о. Сахалин составлен в ИМГиГ ДВО РАН, он включает более 5000 событий за 1995–2006 гг. Каталог землетрясений Камчатки выставлен на интернет-сайте Камчатского филиала Геофизической службы РАН [19]. Внутриконтинентальный регион представлен двумя каталогами: каталогом KAZ, для восточного Тянь-Шаня и прилегающей части территории Казахстана (более 15000 событий за период 1996–2006 гг., составлен в Институте сейсмологии МОН РК, Алматы) и каталогом KNET для северной части центрального Тянь-Шаня, полученным по данным одноименной цифровой сейсмической сети (более 6500 событий за 1994–2009 гг.).

По каждому каталогу предварительно были построены карты распределения сейсмичности и графики повторяемости (рис. 1), определены границы представительной части каталогов. Перечень анализируемых каталогов и основные сведения о них приведены в таблице.

Для построения распределений сейсмичности по времени суток необходимо использовать локальное время появления событий (часы, минуты, секунды). Поскольку в сейсмических каталогах время события указывается по Гринвичу, то для каждого каталога время регистрации сейсмических событий было приведено к локальному времени для соответствующей территории. Сдвиг во времени относительно Гринвича задавался по летнему поясному времени: Тянь-Шань – (+5 часов), Сахалин – (+11 часов), Камчатка – (+12 часов). Переход с “летнего” на “зимнее” время не учитывался. Суточные распределения были построены по всему каталогу и по его представительной части (рис. 2). При построении суточного хода по генеральной выборке проведена линия тренда с применением полиномиального сглаживания шестой степени.

По рис. 2а,б прослеживаются следующие общие черты распределений сейсмичности по времени суток в **Центральной Азии**: на ночное время приходится максимум плотности распределения, а минимум наблюдается в утренние часы (при переходе от темного времени к светлому примерно в 8 часов местного времени). После некоторого увеличения

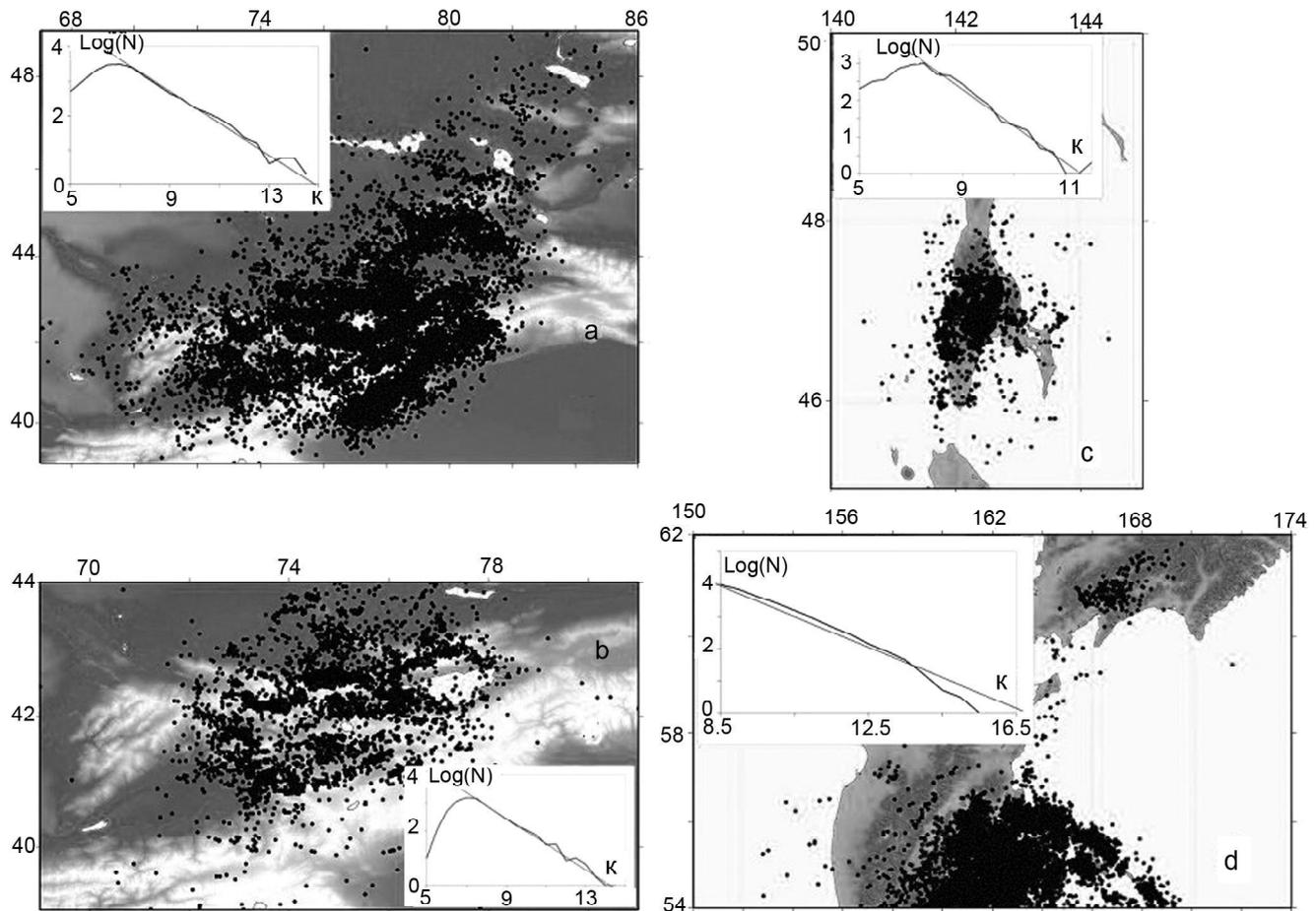


Рис. 1. Расположение рассматриваемых областей с произошедшими на их территориях землетрясениями.

a – каталог KAZ; b – каталог KNET; c – каталог южной части о. Сахалин (ИМГиГ ДВО РАН); d – камчатский каталог (КФ ГС РАН). На врезках – графики повторяемости ($\text{Log}(N)$) с энергетическим классом K по оси абсцисс.

Таблица. Характеристика используемых каталогов.

№	Каталог	Начальная дата	Конечная дата	Количество событий	Представительная выборка по K
1	Сахалин, южная часть	01.01.1995	31.12.2006	~5000	7.5–12.0
2	KNET	01.01.1994	12.31.2009	6548	7.0–12.0
3	KAZ	01.01.1996	12.31.2006	15602	7.0–12.5
4	Камчатка	01.01.1996	12.31.2006	26820	8.5–14.0

плотности числа событий в дневное время происходит вечерний спад, соответствующий переходу от светлого к темному времени суток около 19 часов, и последующее возрастание к ночному максимуму. Суточное распределение сейсмичности, построенное по представительной части каталогов, незначительно отличается от результатов исследования генеральной выборки.

Сахалин (рис. 2с). Для юга Сахалинского региона также наблюдается суточный ход сейсмичности,

но его характер несколько отличается от суточного хода Тянь-Шаньского региона. Возрастающее количество землетрясений также приходится на ночное время суток и его максимум приходится на 3 часа ночи, затем происходит резкое падение сейсмичности до достижения минимума в период около 10–12 часов, далее распределение сейсмичности вновь описывается нарастающим трендом. Как и в предыдущем случае, на фоне тренда можно отметить некоторое уменьшение количества событий в вечернее

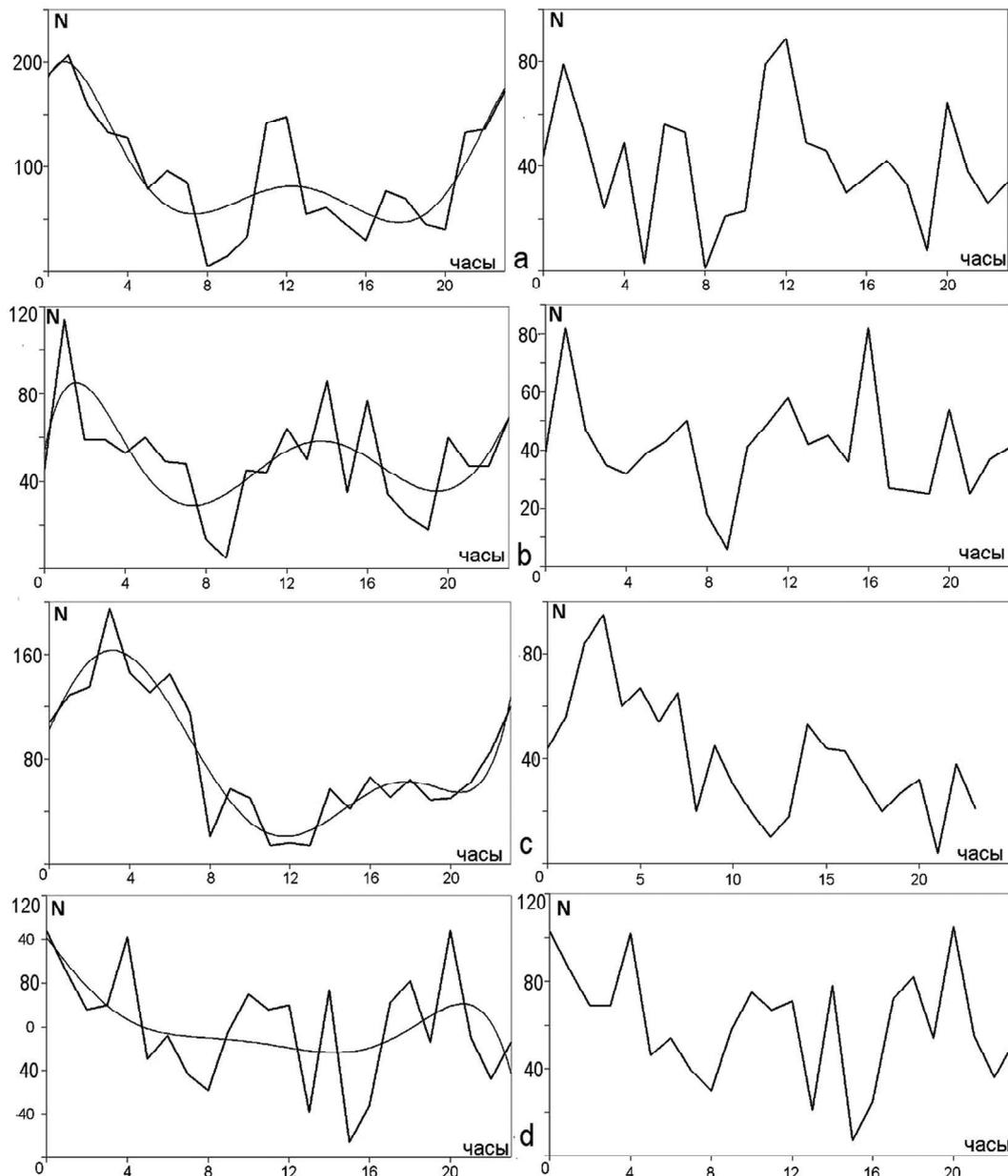


Рис. 2. Суточные распределения количества сейсмических событий (N) для исследуемых субрегионов.

Слева – построения по всему каталогу и полиномиальная регрессия эмпирических зависимостей, справа – суточное распределение N по представительной части каталогов: $a-d$ – обозначают те же каталоги, что на рис. 1.

время – 19 часов. При рассмотрении представительной части каталога в суточном ходе сейсмичности появляется некоторое возрастание сейсмичности в дневное время и снижается скорость возрастания в вечерние часы.

Камчатка (рис. 2d). Каталог сейсмических событий для этого региона начинается с событий 8.5 класса. Несмотря на отсутствие данных о событиях 7–8 классов, суточный ход прослеживается и по данным Камчатского каталога, пусть не такой чет-

кий, как для предыдущих каталогов. Спад сейсмичности проявляется от ночных часов к дневным, и минимумы событий приходятся на светлое время (около 8 и 15 часов). Последующее возрастание до локального максимума около 20 часов сменяется уменьшением, а в целом ночной уровень выше дневного.

Таким образом, предварительное исследование распределений числа сейсмических событий по времени суток подтвердило наличие суточного хода и

его определенное сходство в Центральном-Азиатском и Дальневосточном регионах. Аналогичные результаты по каталогам, заканчивающимся в 2007 г., были изложены в предшествующей работе [13]. Дальнейшая обработка данных для анализа закономерностей суточной периодичности проводилась с применением метода рекуррентных диаграмм [18, 21, 22], разработанного для нелинейных динамических систем. Этот метод основан на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности (повторяемости) состояний [22]. Рекуррентные диаграммы (recurrence plot, в дальнейшем RP) позволяют изучать многомерные процессы через отображение рекуррентностей траектории на двумерную двоичную матрицу размером $N \times N$, в которой 1 (черная точка) соответствует повторению состояния при некотором времени i в некоторое другое время j , а обе оси координат являются осями времени:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j=1 \dots N, \quad (3)$$

где $\Theta(x)$ – функция Хэвисайда, при $x < 0$ $\Theta(x) = 0$, и при $x \geq 0$ $\Theta(x) = 1$; N – длина ряда состояний x_i , ε_i –

размер окрестности, $\|\cdot\|$ – норма. Точки, в которых функция $\Theta(x)$ принимает нулевое значение, изображаются как белые. По определению $R_{i,i} = 1$ – главная диагональ RP, “линия идентичности”, проходящая из угла с координатами $(0, 0)$ в (N, N) под углом $\pi/4$ к осям координат.

Внешний вид RP позволяет достаточно определенно судить о характере протекающих в системе процессов, наличии и влиянии шума, о наличии ламинарных состояний, совершении экстремальных событий, дрейфе. На рис. 3 приведено несколько примеров построений по тестовым сигналам, которые указывают вид диаграмм RP в предельных случаях [18, 20–23].

На рис. 3а показана рекуррентная диаграмма в случае “белого шума” – искусственно сгенерированного предельно неупорядоченного сигнала (кадр слева – вид волновой формы). В этом случае черной является только главная диагональ. Модулирование “белого шума” периодическим сигналом приводит к появлению размытых линейных и кольцевых структур на рекуррентных диаграммах, рис. 3б. Если же сигнал полностью детерминирован и может быть описан с помощью периодических функций, то результаты построений становятся контрастными (рис. 3с, d). Так как рассмотренные тестовые примеры согласуются с материалами работ по применению метода RP для динамических систем [18, 18–23], то расчеты RP по данным каталогов представляют интерес для анализа квазипериодичности и модальности распределений числа событий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для более детального анализа был проведен расчет суточных распределений и рекуррентных диаграмм для выборок землетрясений, отличающихся значением нижней границы по энергиям. Это позволяет проанализировать роль слабых, но наиболее многочисленных событий в возникновении неравномерности распределения по времени суток. С учетом сходства распределений для рассматриваемых областей, отмеченного на рис. 2, построения выполнены для 2 каталогов (KNET и юг Сахалина). Результат показан на рис. 4. Как видно на этом рисунке, для области Тянь-Шаня, контролируемой сетью KNET (случай рис. 4а), диаграммы RP для выборок событий энергетических классов $K > 7$, $K > 8$ описывают шахматные структуры, свидетельствующие о присутствии периодичностей (и, как следствие, модальности распределений по времени суток). Для выборок $K > 8.5$ и $K > 9$ подобных структур не проявляется. Обычные распределения числа событий, построен-

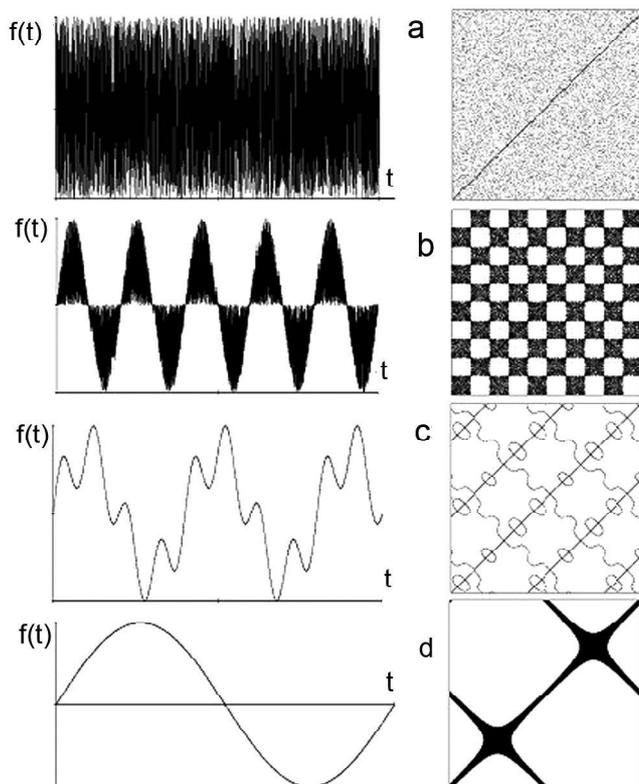


Рис. 3. Тестовые сигналы и вид рекуррентных диаграмм.

а – “белый шум” и соответствующая ему RP, б – “белый шум”, модулированный периодическим сигналом и его RP, в – сумма трех периодических сигналов и соответствующая ему RP, г – периодический сигнал и RP для него.

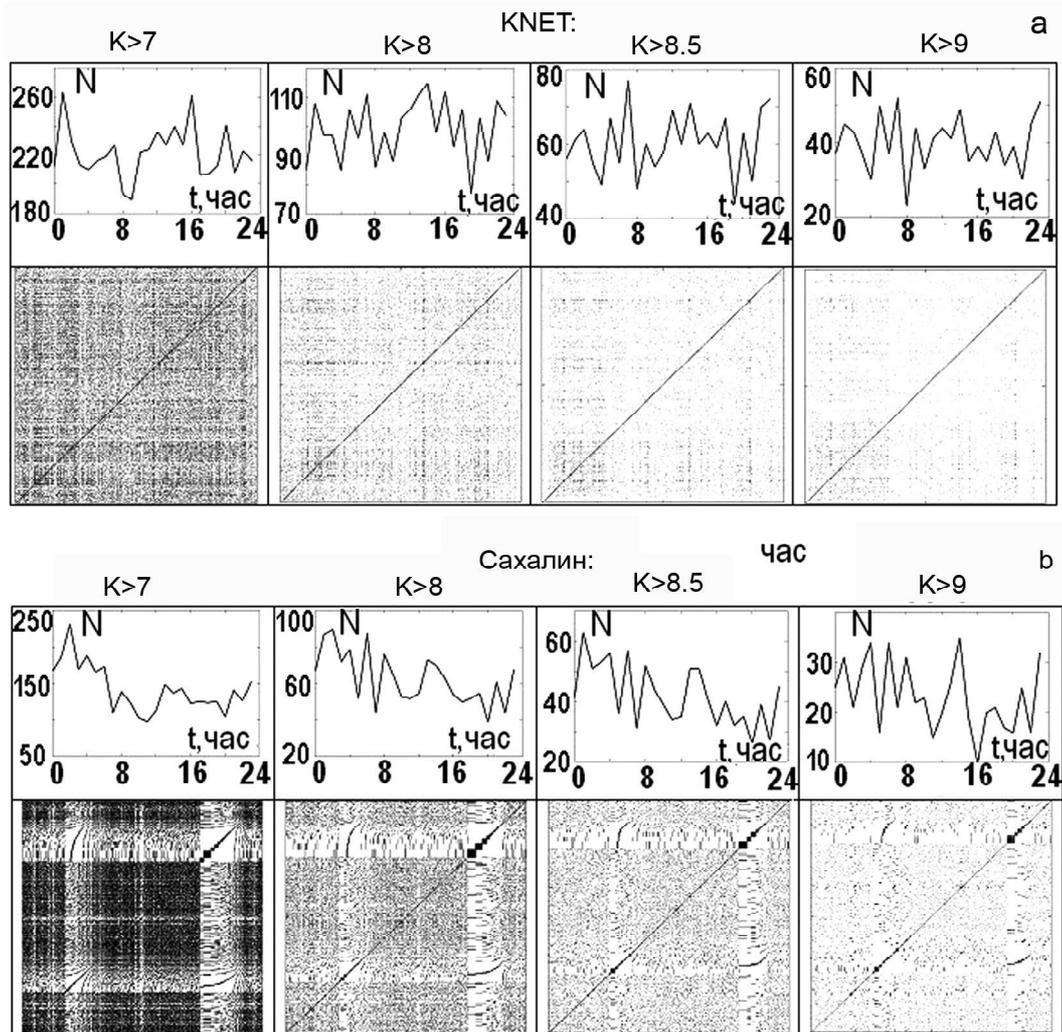


Рис. 4. Распределения числа событий по времени суток и рекуррентные диаграммы для выборок по превышению энергетического порога (нижней граница).

а – для территории Тянь-Шаня, контролируемой KNET, б – для южной части о. Сахалин.

ные для каждой выборки, также указывают на то, что преобладание ночной сейсмичности над дневной определяется событиями низших классов. Для Сахалинского каталога ситуация аналогична (рис. 4b), причем для выборок, включающих низшие классы, неоднородность распределений проявляется более контрастно по сравнению со случаем каталога KNET. Кроме того, рис. 4b демонстрирует наличие суточного хода и для выборки событий с $K > 8.5$.

Результат визуального анализа о более значительных проявлениях суточного хода слабой сейсмичности на Сахалине, чем во внутриконтинентальных регионах, может быть подтвержден количественно. Для этого проводился расчет отношения числа событий, произошедших в светлое время суток (с 8 до 20 часов локального времени) и в темное время

сов до 8 часов следующих суток). Будем обозначать это отношение “день/ночь” как параметр R_{dn} . Разбиение суток на интервалы равной длительности, которое простейшим образом моделирует смену дня и ночи, сделано для исключения случая когда при равномерной плотности распределения числа событий отношение отлично от единицы просто из-за разной длительности дня и ночи. Расчет проводился по всему каталогу (генеральной выборке) и по представительным энергетическим классам. Были получены следующие значения: для Северного Тянь-Шаня (KNET) $R_{dn} \approx 0.9$ для всего каталога, и $R_{dn} \approx 0.99$ для представительной выборки; а для о. Сахалин это отношение $R_{dn} \approx 0.7$ для генеральной выборки, и $R_{dn} \approx 0.8$ для выборки по представительным классам. Полученный результат может быть отражением более упорядоченного харак-

тера геодеформационного процесса в коре Сахалина, что естественно связывать с близким расположением о. Сахалин к зоне взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской плит (зоне субдукции).

Далее рассматривается вопрос о соответствии временных распределений числа событий по временным интервалам, кратным суткам, стандартным моделям случайных процессов – распределениям Пуассона и Пойа. Заметим, что выбор элементарного интервала существенно меньше или больше суток неоправдан из-за суточных периодических зависимостей (означающих присутствие детерминированной компоненты в потоке сейсмических событий) и цикличностей, связанных с астрономическими факторами.

Для сравнения эмпирических распределений с модельными для каждой рассматриваемой выборки вычислялись математическое ожидание M и дисперсия D суточного числа событий. Полученные значения приписывались параметрам теоретического распределения Пойа и по формуле (2) вычислялись параметры a , P_0 . После этого строились графики эмпирического (реального) распределения, распределения Пойа с найденными a , P_0 , а также распределения Пуассона с матожиданием M , совпадающим с эмпирическим. На рис. 5–7 представлены результаты построений для двух субрегионов Центральной Азии (области, покрываемые каталогами KAZ и KNET) и одного Дальневосточного (южная часть о. Сахалин).

Вид распределений на рис. 5, 6 указывает на то, что для двух рассматриваемых зон Центральной Азии поток сейсмических событий аппроксимируется случайным процессом с законом распределения Пойа. Для этих территорий распределение реальных событий энергетических классов $K \geq 8$ также находится в соответствии с Пуассоновским распределением. Для каталога KAZ (Восточный Тянь-Шань и прилегающая часть Казахстана) наилучшее сходство с распределением Пойа получается для выборки событий из представительного диапазона (рис. 5b) и выборки событий с $K \geq 8$ (рис. 5d). Для каталога KNET (Северная часть Центрального Тянь-Шань) подобное различие между распределениями событий с $K < 8$ и $K \geq 8$ не обнаруживается, графики для обоих случаев весьма близки к распределению Пойа (рис. 6). Практически такой же результат дают выборки событий по каталогу KNET классов $K > 8.5$, $K > 9$, ..., которые рассматривались в связи с вопросом о квазипериодичности. Как показывает рис. 7, для Сахалинского каталога в целом за весь период наблюдений эмпирическое распределение суточного числа событий заметно отличается от рассматриваемых случайных распределений. Выше уже упомина-

лось, что для Сахалина детерминированная компонента сейсмического процесса более выражена. Проявлением этого может быть и отличие распределения числа землетрясений от Пуассоновского (или Пойа). А наилучшим свидетельством присутствия определенной доли детерминизма в потоке сейсмических событий в южной части о. Сахалин и ее значимости является уже сам факт успешного прогноза Невельского землетрясения, $M_w = 6.2$ [14].

Представляет интерес рассмотреть, как меняется со временем параметр соответствия реального и модельных распределений в зависимости от изменений сейсмической активности либо стадий подготовки сильного землетрясения. Для этого по используемым каталогам в скользящем окне проведен расчет параметров (χ^2), и λ , фигурирующих, соответственно, в критериях согласия Пирсона и Колмогорова–Смирнова. Размер окна выбирался 50 суток, что значительно короче периодов, охватываемых каталогами. Благодаря этому, для параметров χ^2 и λ можно получить достаточно длинные временные ряды. Значения параметров соответствия отнесены к середине окна. Сдвиг окна задавался в 5 суток, так что сдвиг на всю ширину окна происходит за 10 шагов. Результаты расчетов показаны на рис. 8. Для оценки хода графиков в те или иные интервалы времени можно воспользоваться рекомендациями [15], по которым в качестве критерия для отклонения альтернативной гипотезы (о различии эмпирического и модельного распределений на уровне достоверности 90 %) было выбрано значение $\chi^2 = (\chi^2)_{CR} \approx 2.82$. Как видно на рис. 8a, для территории Северо-Восточного Тянь-Шаня во всех 50-суточных интервалах эмпирическое распределение суточного числа событий соответствует модели Пойа. Для Северного и Центрального Тянь-Шаня (рис. 8b) соответствие с распределением Пойа имеет место “почти всегда”, т.е. в подавляющем большинстве 50-суточных окон. Исключения (два всплеска параметра χ^2 с превышением критерия) приходятся на время, когда произошли Луговское (22.05.2003 г. $M = 5.4$) и Кочкорское землетрясения (25.12.2006 г., $M = 5.8$), отмеченные синими стрелками на рис. 8b.

Аналогичные результаты были получены в работе [12] на основе временного ряда для параметра l (рис. 8b) с применением критерия Колмогорова–Смирнова. Стоит отметить любопытное обстоятельство: временные зависимости параметров χ^2 и l на рис. 8a, b описывают сходство эмпирического распределения с Пуассоновским даже лучше, чем с распределением Пойа. Но, несмотря на это, для сейсмичности Центральной Азии выбор в пользу Пуассо-

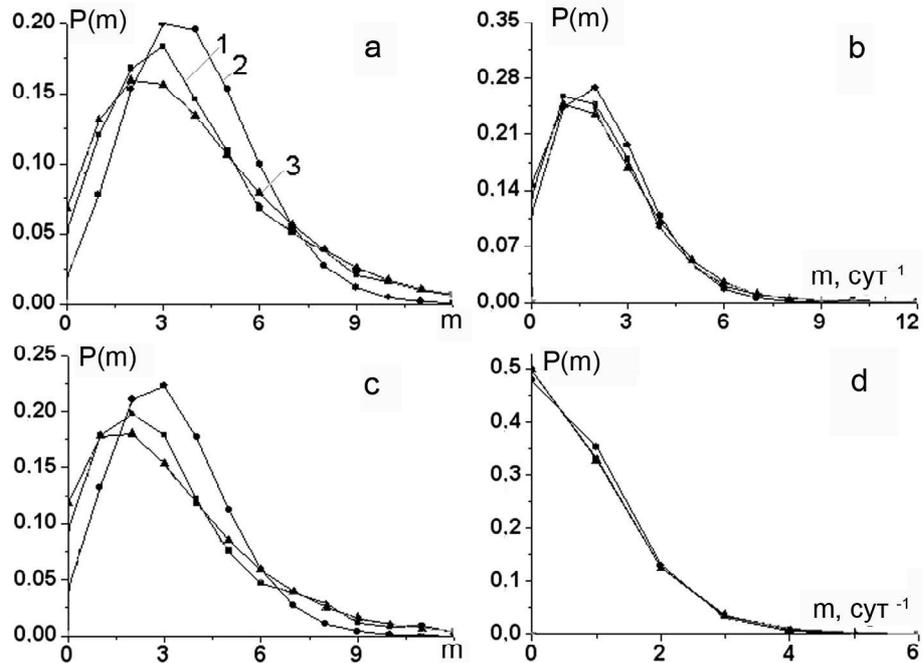


Рис. 5. Графики распределения событий по числу m событий за сутки (1), с нормировкой на полное число событий для выборок из каталога KAZ.

a – все события; b – представительная часть каталога (7–12 класса); c – выборка по классам $K < 8$; d – выборка событий классов $K \geq 8$. Обозначения графиков: 1 – эмпирическое распределение, 2 – Пуассона, 3 – Пойа распределение.

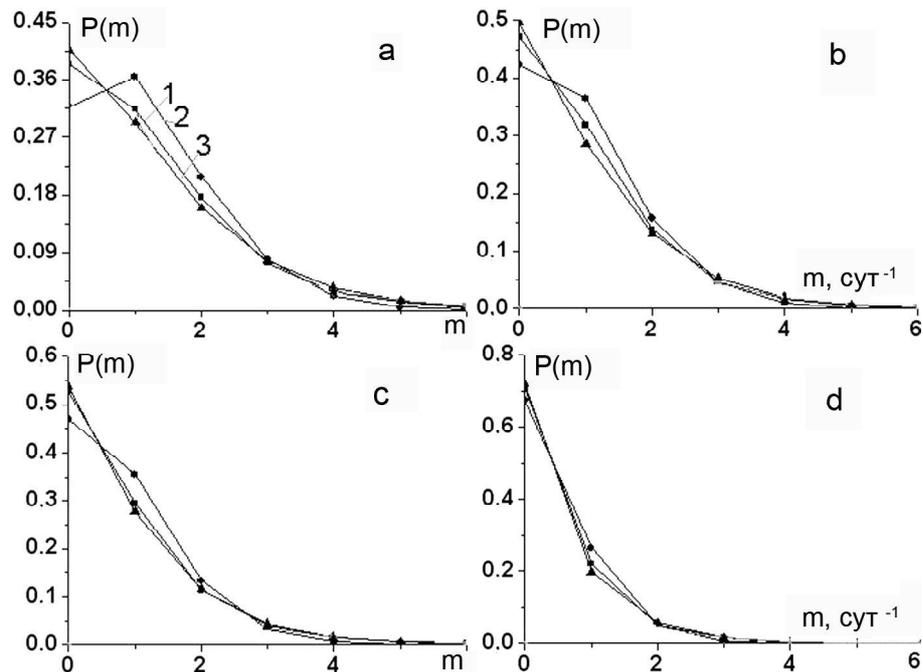


Рис. 6. То же, что на рис.5, но для каталога KNET.

новой модели случайного процесса не оправдан из-за значительного различия между математическим ожиданием и дисперсией для обоих каталогов KAZ и KNET.

Для территории южной части о. Сахалин в асимметричные временные интервалы (50-сут. окна) низкие значения параметра χ^2 (рис. 8с) позволяют говорить о соответствии реального распределения суточного

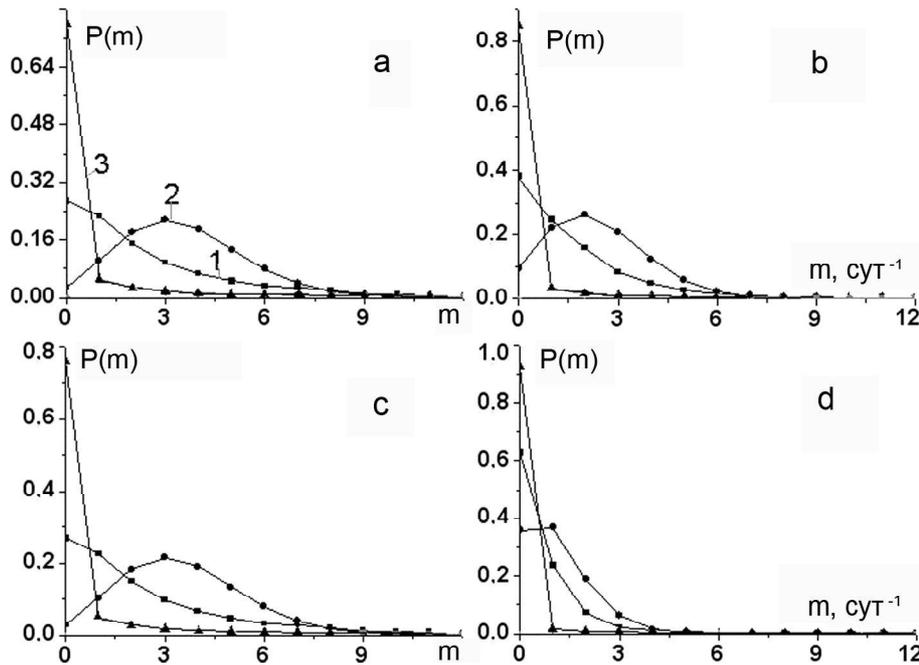


Рис. 7. То же, что на рис. 5, но для каталога южной части о. Сахалин.

числа событий с распределением Пойа. Но как только в скользящее окно попадает дата сильного землетрясения, этот параметр резко возрастает и становится выше уровня $(\chi^2)_{CR} \approx 2.82$, критического для гипотезы соответствия. Три эпизода всплеска c^2 на рис. 8с как раз соответствуют периодам с самыми сильными событиями: Невельскому землетрясению (ЗЛТ), 02.08.2007 г., $M_w = 6.2$, его форшоку с наибольшей магнитудой – Горнозаводскому ЗЛТ 17.08.2006 г., $M_w = 5.6$, а также Костромскому ЗЛТ 30.05.2004 г., $M_w = 4.7$ (время отмечено стрелками). На первый взгляд, временной график на рис. 8b,c согласуется с предсказанием двухстадийной модели разрушения [7, 8] об изменении характера процесса от случайного к более упорядоченному перед возникновением магистрального разрыва (основного толчка). Однако, при более тщательном анализе, учитывая, что разрешение во времени не превышает длины шага (5 сут), упреждающего рассогласования реального и модельного распределений не обнаружено. Известно, что подвижка при сильном землетрясении не обязательно связана с магистральным разрывом; может иметь место проскальзывание по уже имеющемуся нарушению сплошности, как описано, например, в модели стик-слип, [17]. При этом за отклонением эмпирического распределения от стандартных моделей случайных процессов стоит другой смысл, и оно не обязательно должно начинаться раньше основного события.

Расхождение с распределением Пойа с очень высокими значениями χ^2 в периоды с сильными событиями получаются из-за наличия в эмпирическом распределении кластеров, т.е. серий событий, следующих с небольшими интервалами друг за другом. Это проявляется и на графиках на рис. 8, где для всех выборок событий правая, хвостовая часть эмпирического распределения лежит выше графика для распределения Пойа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для регионов Азии, весьма отдаленных друг от друга и различающихся по геодинамической обстановке, отмечено сходное распределение числа сейсмических событий по местному времени суток – суточный ход. Подтвержден результат предыдущих работ [1, 3–5, 13] касательно того, что максимальное количество землетрясений приходится на темное время суток, а минимальное – наблюдается при переходе линии терминатора (от темного к светлому времени суток и наоборот). Суточные распределения сейсмичности реализуются на фоне потока сейсмических событий, который описывается распределением Пойа для случайных процессов. Таким образом, в тех же самых данных содержится информация о детерминированных (синхронизация, суточный ход) и случайных процессах. При этом упорядоченность распределений проявляется, в основном, для слабых событий. Анализ

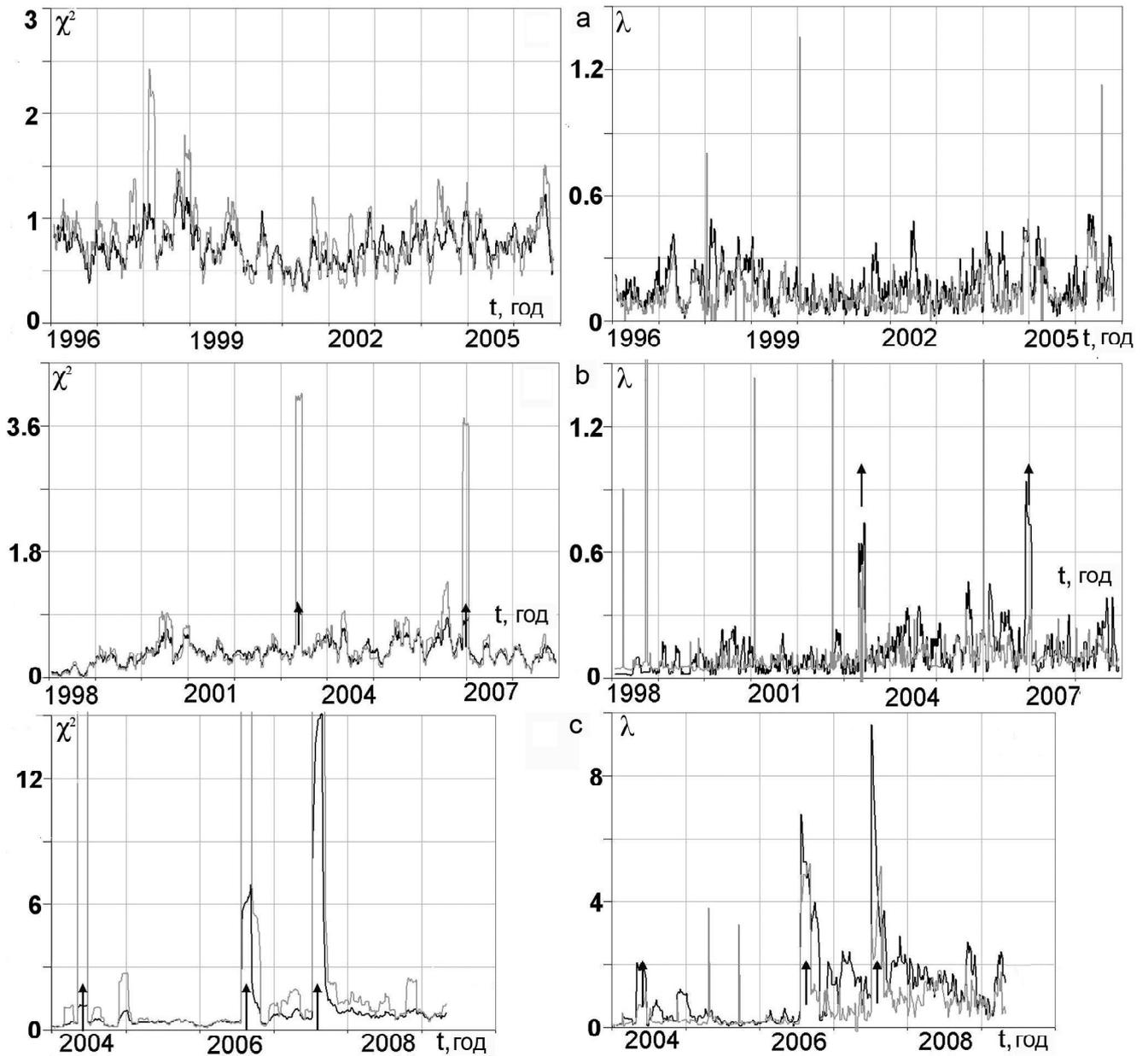


Рис. 8. Изменения параметра соответствия эмпирического распределения сейсмичности рассматриваемых регионов с распределениями Пуассона (черная линия) и Пойа (серая линия) по критериям Пирсона (χ^2), и Колмогорова-Смирнова (λ) для каталогов.

a – KAZ, b – KNET, c – Сахалин. Стрелками отмечены даты землетрясений, указанных в тексте.

временных зависимостей в потоке сейсмических событий высветил методический аспект – в некоторых случаях эти зависимости также могут быть информативными и представлять интерес для современной геодинамики, наряду с распределением гипоцентров по площади и трассированием разломов.

Авторы признательны И.Н. Тихонову и Ч.У. Киму за возможность использования каталога для юга

о. Сахалин и В.Д. Брагину за возможность использовать каталога сети KNET.

Исследование осуществлено при частичной финансовой поддержке государственным контрактом № 02.740.11.0730 Министерства образования и науки РФ, по проекту РФФИ № 09-05-00687а и международному проекту № 262005 по 7-й Рамочной программе ЕС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляков А.С., Журавлев В.И., Лукк А.А. Суточная периодичность слабых землетрясений и высокочастотного под-земного шума на Камчатке Азии // Физика Земли. 2011. № 3. С. 34–54.
2. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
3. Гаврилов В.А., Журавлев В.И., Морозова Ю.В. Закономерности проявления суточной периодичности слабых землетрясений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 60–70.
4. Журавлев В.И., Сидорин А.А. Общие свойства суточной периодичности землетрясений в некоторых регионах мира // Геофиз. исслед. 2005. № 2. С. 61–70.
5. Журавлев В.И., Лукк А.А., Мирзоев К.М., Сычева Н.А. Суточная периодичность слабых землетрясений Средней Азии // Физика Земли. 2006. № 11. С. 29–43.
6. Зотов О.Д. Эффект выходных дней в сейсмической активности // Физика Земли. 2007. № 12. С. 27–34.
7. Куксенко В.С. Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования // Прогноз землетрясений. Душанбе-Москва: Дониш., 1983. № 4. С. 8–20.
8. Куксенко В. С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности / Ред. С.Н. Журков. Л.: Наука, 1986. С. 36–41.
9. Родкин М.В. Модель сейсмического режима как совокупности эпизодов лавинообразной релаксации, возникающих на множестве метастабильных подсистем // Физика Земли. 2011. № 11. С. 18–26.
10. Соболев Г.А. Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения // Физика Земли. 2003. № 2. С. 3–12.
11. Соболев Г.А. Вариации микросейсм перед сильным землетрясением // Физика Земли. 2004. № 6. С. 3–13.
12. Сычева Н.А., Асадулина А.А., Богомолов Л.М. Применение теории случайных процессов для анализа слабой сейсмичности Тянь-Шаня // Вестн. КРСУ (Кыргызско-Российский Славянский университет). 2007. Т. 7, № 12. С. 122–126.
13. Сычева Н.А., Богомолов Л.М. О проявлениях квазипериодичности, синхронизации и реализаций случайного процесса в потоке сейсмических событий // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли / Ред. А.В. Леонтьев. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2010. С. 323–349.
14. Тихонов И.Н., Ким Ч.У. Успешный прогноз Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. $M_{LH} = 6.2$ на юге о-ва Сахалин // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 4. С. 532–536.
15. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1967. 242 с.
16. Шайдеггер А. Физические аспекты природных катастроф. М.: Недра, 1981. 232 с.
17. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as mechanism for earthquakes // Science. 1966. V. 153, N. 3739. P. 62–64; 990–992.
18. Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D., Recurrence plots of dynamical systems // Europhysics Lett. 5. 1987. P. 973–977.
19. EMSD: Интернет-сайт Камчатского филиала Геофизической службы РАН. 2010, www.emsd.ru
20. Gao J., Cai H. On the structures of quantification of recurrence plots // Physics Lett. A. 2000. V. 270. P. 75–87.
21. Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // Physics Reports. 2007. N. 438. P. 237–329.
22. Marwan N.A Historical review of recurrence plots // European Physical Journ. ST. 2008. N. 164. P. 3–12.
23. Sprott J.C., Rowlands G. Chaos data analyzer: the professional version. AIP, NY, 1995.
24. Sychev V.N., Avagimov A.A., Bogomolov L.M. et al. Correlation properties of weak seismicity at Bishkek geodynamic test site in relevance to active monitoring problem // Вестн. КРСУ. 2006. Т. 6, № 3. P. 79–86.

V.N. Sychev, L.M. Bogomolov, N.A. Sycheva

On the daily quasi-periodicity and random component in the flow of seismic events

Distributions of seismic events have been analyzed for two seismically active regions with different geodynamic conditions (Central Asia and the Far East) aiming at distinguishing quasi-periodicity (daily variations, at first) and sequences which correspond to realization of a random process. It has been demonstrated that the phase of daily variations of averaged seismic activity is synchronized with the local time rather than that of lunar-solar tides. This is testimony to an ionosphere origin (triggering) since the regular daily variations coupled with daytime/night time alteration are typical for the effects related to ionosphere. It has also been shown that the series of seismic events in short-term time intervals is correspondent with realization of random process described by Poya distribution.

Key words: seismic event, catalogue, energy class, quasi-periodicity, random distribution, Central Asia, Far East.