

К ВОПРОСУ О КВАЗИ-ПУАССОНОВСКОМ РЕЖИМЕ СЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ И АКУСТОЭМИССИОННЫХ СОБЫТИЙ И ОТКЛОНЕНИЯХ ОТ НЕГО

Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов, В.Н. Сычев

Анализируется соответствие потоков сейсмических и акустоэмиссионных событий с моделями случайных процессов. Продемонстрирована возможность получения новых результатов при использовании вновь разработанной ГИС REFStat-Info, в которой применены современные Case-технологии.

Ключевые слова: сейсмическое событие; каталог; распределение случайное; акустическая эмиссия.

Введение. Известны попытки рассматривать последовательность возникновения сейсмических событий во времени как случайный процесс, описываемый, в частности, распределением Пуассона [1, 2]. В соответствии со сложившимися в прошлом веке представлениями о стадийности подготовки сильного землетрясения (ЗЛТ) считалось, что аппроксимация эмпирического распределения событий во времени пуассоновским свидетельствует о начальной стадии процесса с диффузным режимом накопления разрывов. А вот существенное отклонение реального распределения от модели Пуассона может указывать на стадию кластеризации и формирования магистрального разрыва (когда процесс явно перестает быть случайным). Тем самым изменение режима следования событий несет предвестниковую информацию, имеющую ясный физический смысл (в отличие от множества предвестников землетрясения). Аналогичный сценарий с изменением характера потока событий проверялся по данным акустической эмиссии (АЭ) образцов горных пород, испытываемых на прессах [3, 4]. Однако развитие этого направления столкнулось с трудностью – во многих случаях для потока сейсмических событий численные значения дисперсии и математического ожидания существенно отличаются друг от друга, поэтому распределение Пуассона, для которого

эти статистические моменты совпадают [5] неприменимо. На примере данных сейсмической сети KNET (Северный Тянь-Шань) было показано, что из известных дискретных распределений случайных величин, распределение Пойа хорошо согласуется с наблюдениями слабой сейсмичности. Это модельное распределение выводится из так называемой “урновой схемы Пойа” и описывает случайный процесс с эффектом последствия [5]. Последнее обстоятельство особенно важно для потока сейсмических событий, для которых афтершоки и рои землетрясений являются очевидным признаком последствия. При применении распределения Пойа вместо пуассоновского отпадают ограничения в интерпретации сейсмических рядов как простейшего потока случайных событий, характеризуемого как стационарный ординарный поток без последствия [6]. В некоторых случаях для достаточно больших промежутков времени может быть эффективным и гамма-распределение [6, 7]. Для оценки соответствия модельных случайных распределений с эмпирическим, наиболее часто рассматривается критерий согласия Колмогорова–Смирнова и хи-квадрат (χ^2) [5, 7]. Создание специализированного ПО с адаптацией для работы с сейсмическими каталогами или с потоками событий АЭ, может способствовать более широкому применению случайных рас-

пределений Пойа и гамма, выражающихся более громоздкими формулами по сравнению с простейшим распределением Пуассона, для анализа и интерпретации вариаций сейсмичности.

Цель данной работы – создание такого программного обеспечения, которое будет удобным как для сейсмологов, так и механиков. При разработке ПО с опциями для потоков сейсмических событий и сигналов АЭ было принято во внимание, что при исследованиях сейсмического процесса проводится много лабораторных экспериментов на образцах горных пород, испытываемых на прессах с регистрацией акустической эмиссии [8–10]. Создание унифицированного средства исследований закономерностей в распределениях потоков событий, связанных с разрушением среды на натурном (землетрясения) и лабораторном масштабах весьма актуально. Таким средством и является программный продукт REFStat-INFO, разработанный в ИС РАН. Возможности REFStat-INFO были продемонстрированы на примерах расчетов параметров распределения Пойа, аппроксимирующего эмпирические данные, а также вероятностей реализации специальных выборок с неравномерными распределениями событий по интервалам времени. Случай наблюдаемого прироста количества событий может быть отнесен за счет включения дополнительного источника, в частности триггерного эффекта [11, 12], при условии, если закон случайного дискретного распределения дает пренебрежимо малую вероятность появления такой выборки. Регистрация затишья, т.е. спада числа событий в течение нескольких последовательных интервалов, может более обоснованно идентифицироваться как сейсмический или акустический предвестник [13, 14], если согласно модельному распределению (пуассоновскому, Пойа, гамма-распределению) вероятность реализации незаполненной выборки достаточно мала. Таким образом, представляет интерес как поиск законов распределения потоков сейсмических и акустоэмиссионных событий по данным для относительно длительных периодов наблюдений, так и анализ кратковременных отклонений эмпирического распределения от модельного.

Теоретические основы и методика. Выбор модельного распределения Пойа для анализа эмиссионных сигналов при разрушении материалов земной коры (сейсмичность, акустическая эмиссия) является вполне естественным, так при этом учитывается наличие эффекта памяти среды (афтершоки – простейшие проявления такого эффекта). Теоретически распределение Пуассона

описывает случайный процесс без последствий, тем самым, исключая описание эффектов памяти. Альтернативное случайное распределение, также представляющее интерес – это гамма-распределение. Для случайного распределения Пойа функция плотности распределения имеет следующий вид [5]:

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

где: P_m – вероятность того, что в единицу времени произойдет m событий, причем 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 которых M обозначает математическое ожидание, D – дисперсию.

В случае, когда $M=D$, закон распределения Пойа переходит в закон распределения Пуассона [5], соответствующее выражение получается из (1, 2) в пределе $a \rightarrow 0$ и записывается в форме

$$P_m = (1/m!) \xi^m \cdot e^{-\xi}, \quad (3)$$

где ξ – параметр распределения Пуассона, совпадающий с матожиданием и дисперсией.

Для гамма-распределения функция плотности, зависящая от двух параметров α , β и определяющая вероятность появления m событий в единицу времени имеет вид:

$$P_m = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} m^{(\alpha-1)} e^{-\beta m}, \quad (4)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера [5]. В выражении (4) параметр α контролирует форму распределения, а параметр β – амплитуду. В частном случае, когда $\alpha=1$, гамма-распределение переходит в экспоненциальное. Для гамма-распределения матожидание M_Γ и дисперсия D_Γ определяются формулами [5]

$$M_\Gamma = \alpha / \beta, \quad D_\Gamma = \alpha / \beta^2, \quad (5)$$

из которых легко получаются выражения для параметров α , β через моменты M_Γ , D_Γ :

$$\alpha = (M_\Gamma / D_\Gamma)^2, \quad \beta = M_\Gamma / D_\Gamma^2. \quad (6)$$

При использовании каждого из случайных распределений для анализа реальных последовательностей событий длительность единичного интервала выбиралась таким образом, чтобы получающаяся выборка интервалов была достаточно заполненной, т.е. количество пустых интервалов было заведомо меньше половины. Для исследуемых каталогов, бюллетеней и др. упо-

рядоченных последовательностей известно число всех событий (или число событий, выделенных по некоторому признаку) и время наблюдения, так что можно оценить характерное время между хронологически последовательными событиями τ_1 . Простой способ обеспечить выполнение условия заполнения – выбрать единичный интервал, несколько превышающий по длительности τ_1 . Во многих случаях таким интервалом оказываются привычные единицы времени: сутки для случая сейсмических каталогов и минуты либо секунды для потоков событий АЭ.

Для указанных дискретных распределений с достаточным заполнением выбранных элементов в качестве критерия согласия фактически наблюдаемых и модельных распределений можно использовать критерии Колмогорова–Смирнова и Пирсона [5]. Этот подход был опробован в [12, 15], где критическое значение параметра Пирсона принято равным $(\chi^2)_{CR} = 2,82$. После того, как при помощи критериев Колмогорова–Смирнова и/или Пирсона для генеральной выборки (всего каталога, бюллетеня, перечня...) будет установлено согласие экспериментального распределения с модельным, например, распределением Пойа, дальнейший анализ в типовом случае будет направлен на выявление выборок событий (подкаталогов), где это согласие нарушается. Результат указывает на признак частной выборки, при наличии которого следование событий перестает быть случайным. Это может быть участок территории, или какой-либо отрезок времени, либо иной признак.

По данным каталога сейсмической сети KNET (Северный Тянь-Шань) за 1998–2007 гг. в сутки в среднем происходит 1–2 события, поэтому при выборе единичного интервала, совпадающего с суточным, можно принять $M \approx 1$. Фактическое распределение чисел землетрясений в сутки хорошо описывается моделью Пойа (1), так как, согласно [12], значение доверительной вероятности соответствия между распределениями составляет $P = 0,99$ по критерию Пирсона. Вероятность реализации случайного всплеска, представляющего собой последовательность $\{m_i, m_{i+1}, \dots, m_{i+k}\}$ чисел событий, произошедших в течение $i, i+1, \dots, i+k$ суток соответственно, определяется произведением:

$$P_{\text{ran}} = P(m_i) P(m_{i+1}) \dots P(m_{i+k}). \quad (7)$$

В выражении (7) подразумевается, что m_j , $j = i, i+1, \dots, i+k$ превышает матожидание M хотя бы для некоторых j , а значения сомножителей $P(m_j)$ вычисляются по формулам (1, 2). Поскольку

математическое ожидание M близко к единице, то для оценки значимости случая, описываемого вероятностью P_{ran} , информативным может быть отношение $z_{\text{ran}} = P_{\text{ran}} / (P_1)^k$. Эта нормировка показывает насколько вероятность флуктуации с рассматриваемым приростом числа событий меньше вероятности того, что в каждом из k интервалов будет по одному событию, $P_1 = P_0 M / (1+a M)$. Малость z_{ran} , например, $z_{\text{ran}} \sim 0,01-0,001$, как в случае работы [12], свидетельствует о высокой значимости реализации распределения с приростом событий, поэтому оно должно быть отнесено к проявлениям неслучайных факторов.

Специализированная ГИС REFStat-Info

Входные данные. Основным требованием к разрабатываемому программному обеспечению является возможность анализа данных двух типов – сейсмологических и данных АЭ. К сейсмологическим данным относится каталог сейсмических событий, который содержит следующие характеристики по каждому сейсмическому событию: время, место и энергия события. Каталог событий АЭ содержит только информацию о времени зарегистрированного события. Поскольку данные такого рода пишутся во время эксперимента, то формат записи этих данных всегда согласуется с условиями эксперимента и измеряемой аппаратурой. Для того чтобы создать каталог событий АЭ необходимо “распаковать” экспериментальные данные. Поэтому при определении входных данных ПО исходили из того, чтобы данные АЭ могли быть представлены в двух видах – как данные эксперимента и как каталог событий АЭ, что добавляет в ПО функцию преобразования экспериментальных данных событий АЭ в каталог событий АЭ. Таким образом, входными данными ПО могут быть каталоги сейсмических событий, каталоги событий АЭ, экспериментальные данные АЭ, находящиеся в какой-либо директории.

Поскольку перечисленные входные данные имеют разный формат, то необходимо развивать интерфейс, позволяющий обрабатывать каждый поток данных из всего набора.

Выходные данные. В качестве результата анализа вариаций в потоке сейсмических событий и событий АЭ могут выступать три типа данных: таблицы, графики и текстовые файлы. Для каждого типа выходных данных предусмотрена возможность сохранения в файл стандартного формата для дальнейшего использования. Все типы выходных данных могут быть получены при обработке и визуализации исследуемых потоков.

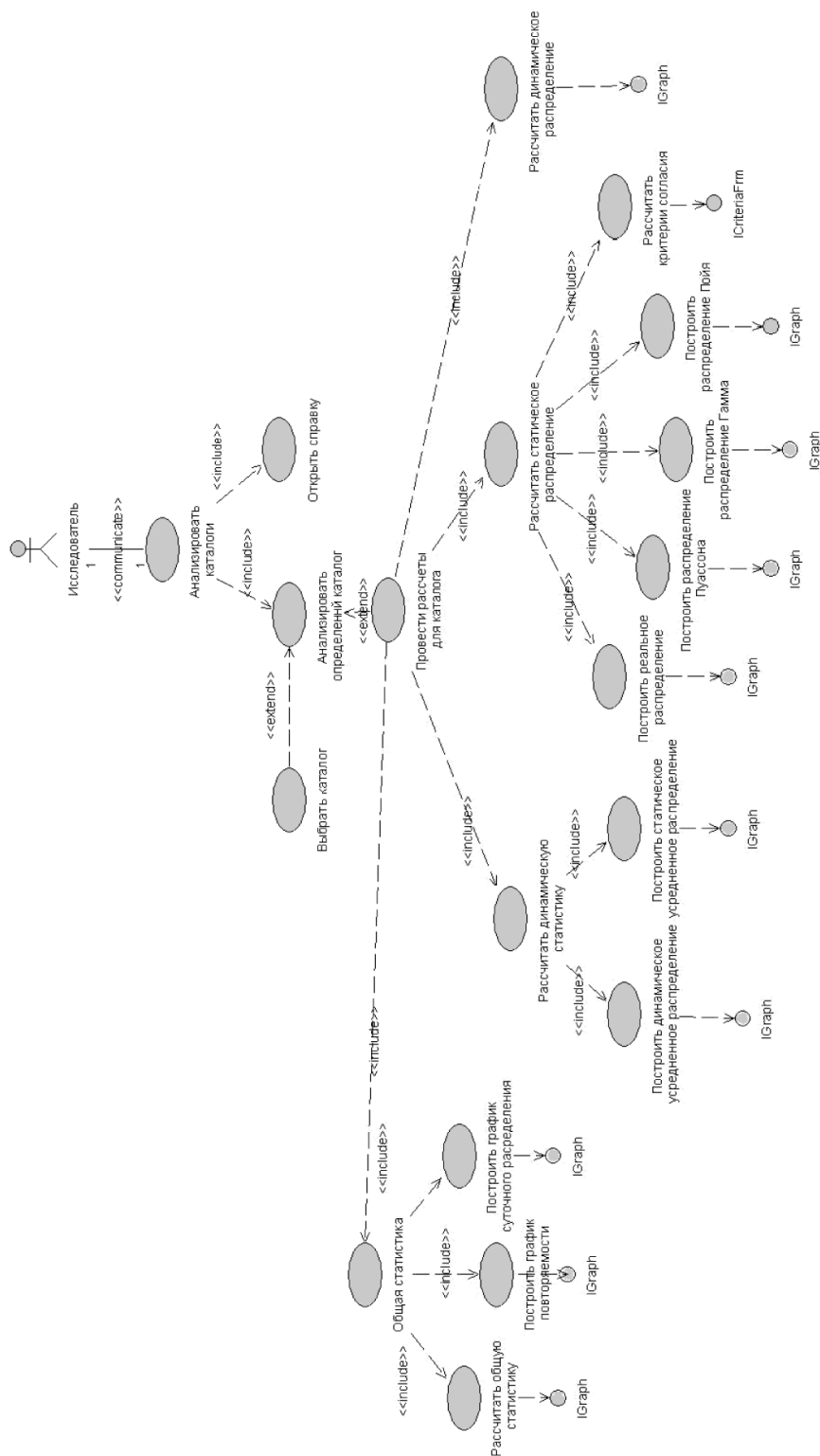


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования (Use Case).

Модель системы. Для создания модели системы использовался унифицированный язык моделирования (UML). UML является преемником методов объектно-ориентированного анализа и проектирования (OOA&D), созданных в конце 80-х и начале 90-х годов прошлого столетия. Язык UML прошел процесс стандартизации в рамках консорциума OMG (Object Management Group) и в настоящее время является стандартом OMG [16]. В качестве среды разработки была выбрана среда Rational Rose.

Диаграмма вариантов использования (Use Case) для разработанного программного продукта представлена на рис. 1. Подразумевается, что действия над программной системой выполняет пользователь (исследователь). Главной функцией программы является проведение анализа над каталогами сейсмических и акустических событий. Эта функция включает в себя выбор исследуемых данных, непосредственный их анализ, а также использование справки.

Для анализа данных исследователь может выбрать одно из пяти основных действий: просмотреть общую статистику по каталогу, динамическую статистику, а также статическое и динамическое распределение. Каждый из разделов анализа имеет подразделы. Результаты вычислений выносятся на специально разработанные интерфейсы. Интерфейс IGraph отображает результаты анализа в графическом виде. ICriteriaFrm используется для проведения расчетов критериев согласия.

Диаграмма классов представлена на рис. 2. Для работы с входными данными был разработан абстрактный класс Catalog, который содер-

жит основные функции доступа к данным. От этого класса унаследовано два класса EmissionCatalog и QuakeCatalog. Каждый из этих классов содержит методы, позволяющие эффективно работать с данными своего типа – первый с данными АЭ, второй – с сейсмическими данными.

Класс CatalogFile реализует функции для чтения данных из каталога. Класс CommonStatistics содержит функции, позволяющие осуществлять статистические расчеты по сейсмическим данным: расчет суточного распределения сейсмичности, графика повторяемости землетрясений и другие параметры. DynamicStatistics содержит функции для расчета рядов сейсмической активности, для каталогов сейсмических событий и активности АЭ. В классе Distributions реализованы функции для расчета эмпирического распределения и распределений по моделям: Пуассона, Пойа, гамма-распределения. Класс Criteria разработан для проведения расчетов критериев согласия, а также для анализа их изменения во времени (динамического распределения).

Назначение и условия применения. Разработанное ПО “REFStat-Info” предназначено для анализа вариаций в потоке сейсмических и акустических событий.

Программа позволяет:

1. Считывать данные из каталогов сейсмических и акустических событий.
 2. Формировать каталог АЭ из данных лабораторного эксперимента.
 3. Выполнять функции, перечисленные в табл. 1.
- Перед выполнением перечисленных выше функций в ПО имеется возможность выборки данных из общего потока (предусмотрена филь-

Таблица 1

Основные функции программного пакета “REFStat-Info”

№ п/п	Функция	Каталог сейсмических событий	Каталог событий АЭ
1	Получение общей информации по каталогу (краевые значения по характеристикам каталога: время, место и энергия)	+	-
2	Построение графика повторяемости землетрясений	+	-
3	Построение суточного распределения сейсмичности	+	-
4	Расчет эмпирического распределения и моделей	+	+
5	Расчет критерия соответствия для статического распределения	+	+
6	Расчет изменения критерия соответствия во времени (динамическое распределение)	+	+
7	Построение статической активности событий	+	+
8	Построение динамической активности событий	+	+

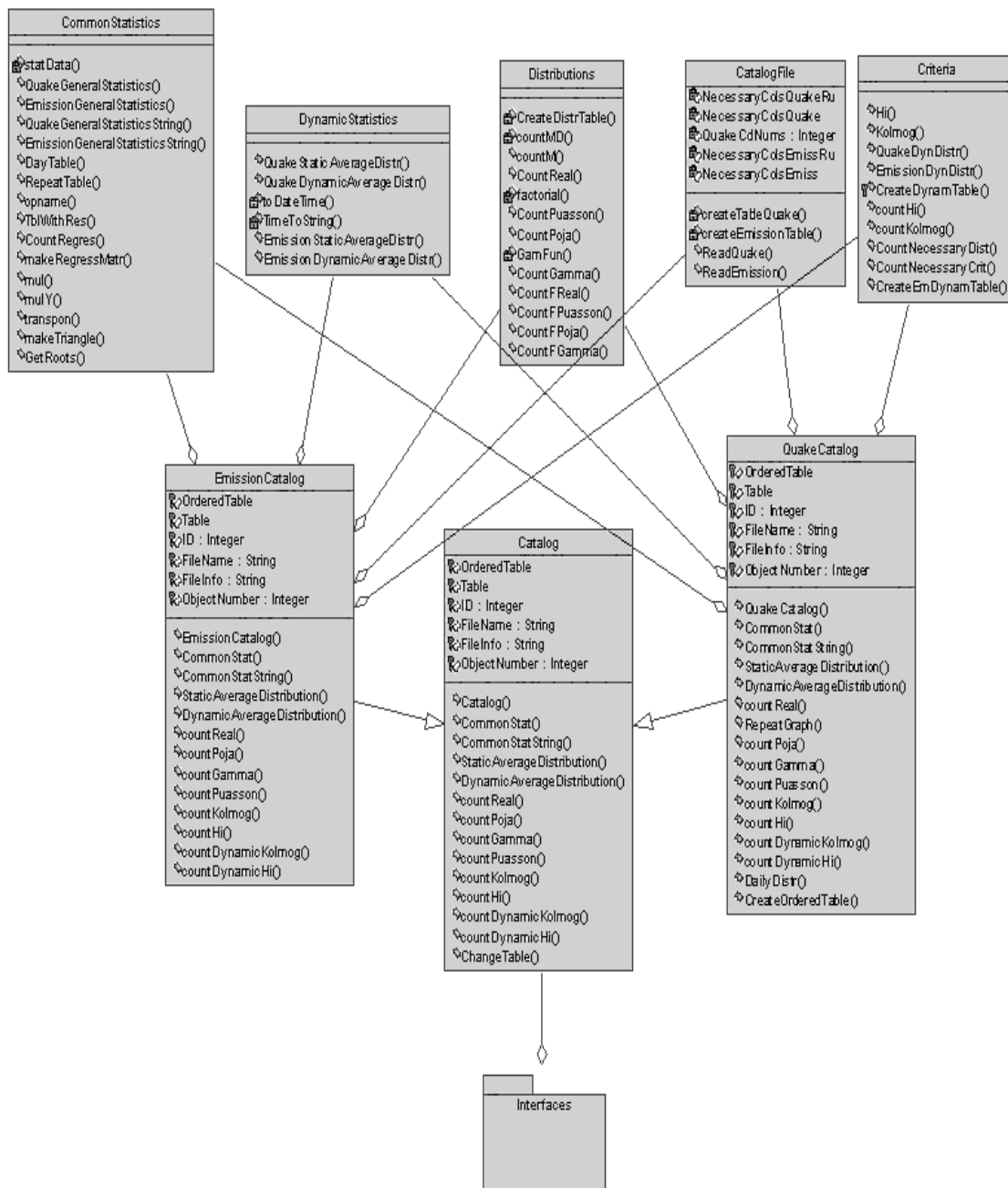


Рис. 2. Диаграмма классов. Общий вид.

трация по всем полям) и проведения последующего анализа по сформированным выборкам. Построение графика повторяемости позволяет сделать выводы о свойствах всей проверяемой совокупности и определить представительность выборки, которая характеризуется линейным участком графика повторяемости. Предусмотре-

на возможность построения графика повторяемости с линейной аппроксимацией некоторого его участка методом наименьших квадратов. Для наблюдения за изменением картины распределения количества событий (сейсмических или АЭ) по времени разработаны режимы расчета статической и динамической активности.

Таблица 2

Основные параметры используемых каталогов землетрясений

№ п/п	Каталог, метка на рис. 3	Кол-во станций	Регион	Период	Кол-во событий	Диапазон представит. К
1	KAZ(a)	7	Северо-Восточный Тянь-Шань (Казахстан)	01.01.1996–31.12.2006	15602	7,0–12,5
2	KNET(б)	10	Северный и Центральный Тянь-Шань (Кыргызстан)	01.01.1994–31.12.2008	6270	7,0–12,0
3	СФ ГС(в)	9	Южная часть о. Сахалин	01.01.1995–31.12.2006	5188	7,5–12,0

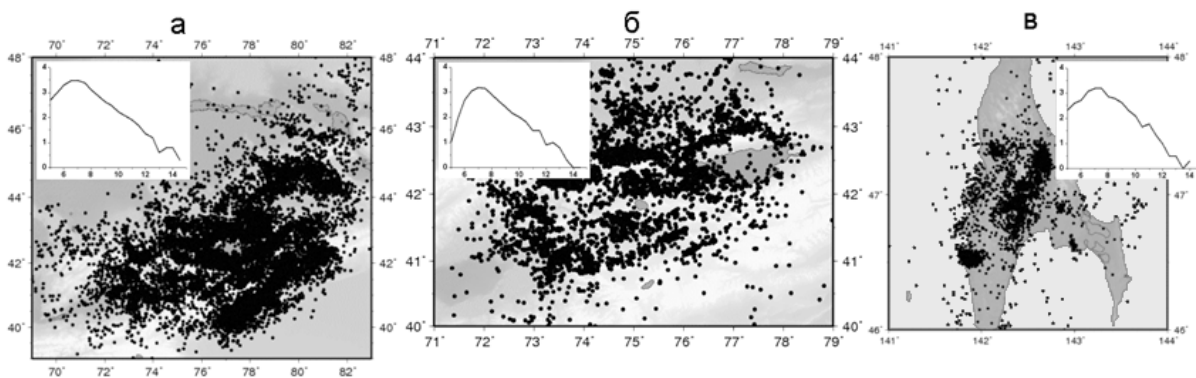


Рис. 3. Расположение эпицентров сейсмических событий на рассматриваемых территориях и графики повторяемости исследуемых каталогов: а – KAZ (Институт сейсмологии МОН РК); б – каталог KNET (ИС РАН в г. Бишкеке); в – каталог южной части о. Сахалин (СФ ГС РАН, ИМГи Г ДВО РАН).

Исследование входных данных с помощью инструмента математической статистики осуществляется путем построения графиков эмпирического распределения, распределений Пуассона, Пойа и гамма-распределения. Проверка гипотезы о соответствии теоретического распределения эмпирическому осуществляется с помощью критериев согласия хи-квадрат и Колмогорова. “REFStat-Info” позволяет проводить исследование изменения критерия согласия в динамике, т.е. каким образом изменяется соответствие эмпирического распределения выбранному закону распределения во времени. Наличие справки значительно облегчает процесс изучения функций программы.

Результаты исследования. Эффективность и удобство использования программного пакета REFStat-INFO в исследовательских задачах проверена на примерах каталогов землетрясений Центральной Азии (Северный Тянь-Шань)

и южной части о. Сахалин. Перечень используемых каталогов и сведения о них приведены в табл. 2. Выбор регионов и соответствующих каталогов определялся важностью сравнения распределений потоков сейсмических событий в период с сильным землетрясением и в асейсмичный период. Из-за сравнительно небольшого периода эксплуатации цифровых сейсмических сетей, такое сравнение невозможно провести по данным одного региона. На территории южной части о. Сахалин, контролируемой сейсмической сетью Сахалинского филиала Геофизической службы РАН (СФ ГС), в рассматриваемый период 1995–2006 гг. произошли сильные события: Невельское ЗЛТ 02.08.2007 г.; Горнозаводское ЗЛТ 17.06.2006 г.; Костромское ЗЛТ 30.05.2004 г. На выбранных для сравнения двух зонах Тянь-Шаня (оконтуренных станциями сейсмических сетей KAZ и KNET) в этот период не зарегистрировано событий классов К > 15 (с магниту-

дой $M > 6$). Распределение сейсмических событий по территории рассматриваемых регионов и графики повторяемости и соответствующих им каталогов представлены на рис. 3.

Для каждого исследуемого каталога формировались следующие выборки: а – всех событий; б – события представительной части каталога; в – событий с K (класс по Раутиан) < 8 ; г – событий с $K \geq 8$. Для каждой из этих выборок строились распределения сейсмических событий.

Рассмотрим вопрос о соответствии временных распределений числа событий, построенных по этим выборкам, случайным распределениям Пуассона, Пойа и гамма-распределению. По сформированным выборкам вычислялись математическое ожидание M и дисперсия D суточного числа событий, по величине которых при помощи формул (2) и (6) определялись параметры модельных распределений Пуассона (3), Пойа (1) и гамма-распределения (5). На рис. 4–6 представлены эмпирические распределения и модельные случайные распределения с соответ-

ствующими параметрами. Графики на рис. 4, 5 свидетельствуют, что для двух рассматриваемых зон Центральной Азии поток сейсмических событий аппроксимируется случайным процессом с законом распределения Пойа. Для этих территорий распределение реальных событий классов $K \geq 8$ также находится в соответствии с пуассоновским. Для каталога KAZ (Северо-Восточный Тянь-Шань) наилучшее сходство с распределением Пойа получается для выборок событий (б) – события из представительного диапазона, и (г) – события с $K \geq 8$.

Для каталога сети KNET (Северный и Центральный 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. 5). Как видно на рис. 6, для Сахалинского каталога в целом за весь период наблюдений эмпирическое распределение суточного числа событий существенно отличается от рассматриваемых случайных распределений. Этот частный аспект может

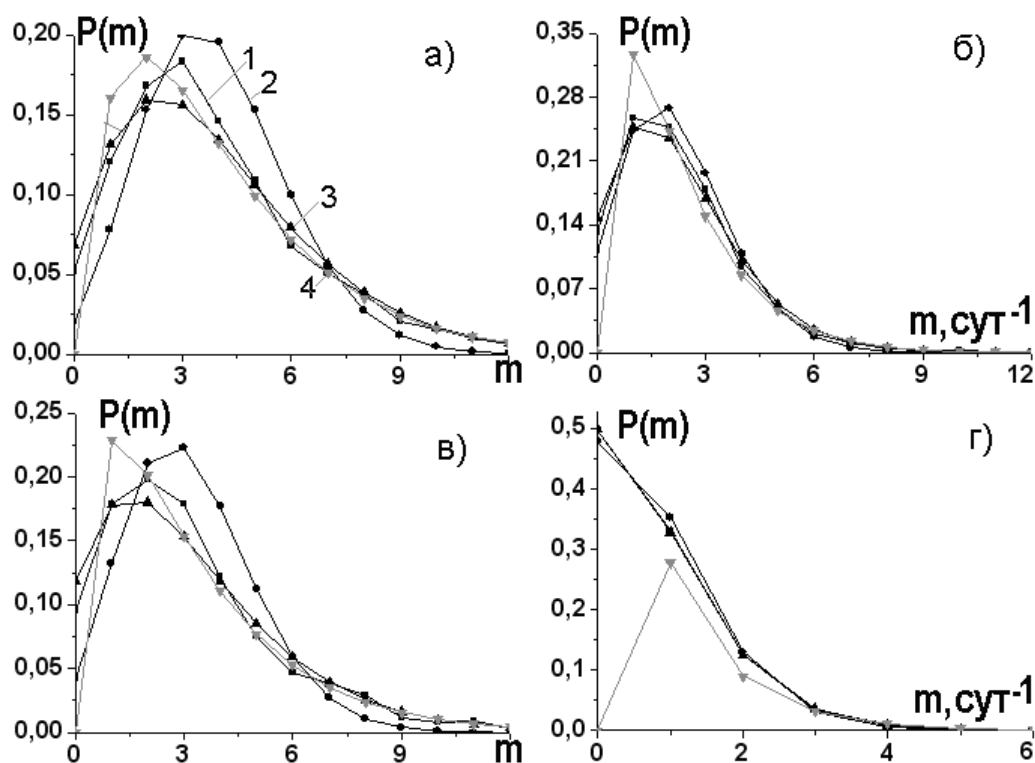


Рис. 4. Графики распределения событий по числу m событий за сутки (1), с нормировкой на полное число событий для выборок из каталога KAZ: а – все события; б – представительная часть каталога (7–12,5 класса); в) события класса меньше 8; г – события 8 класса и выше. 1 – эмпирическое, 2 – Пуассона, 3 – Пойа, 4 – гамма-распределение.

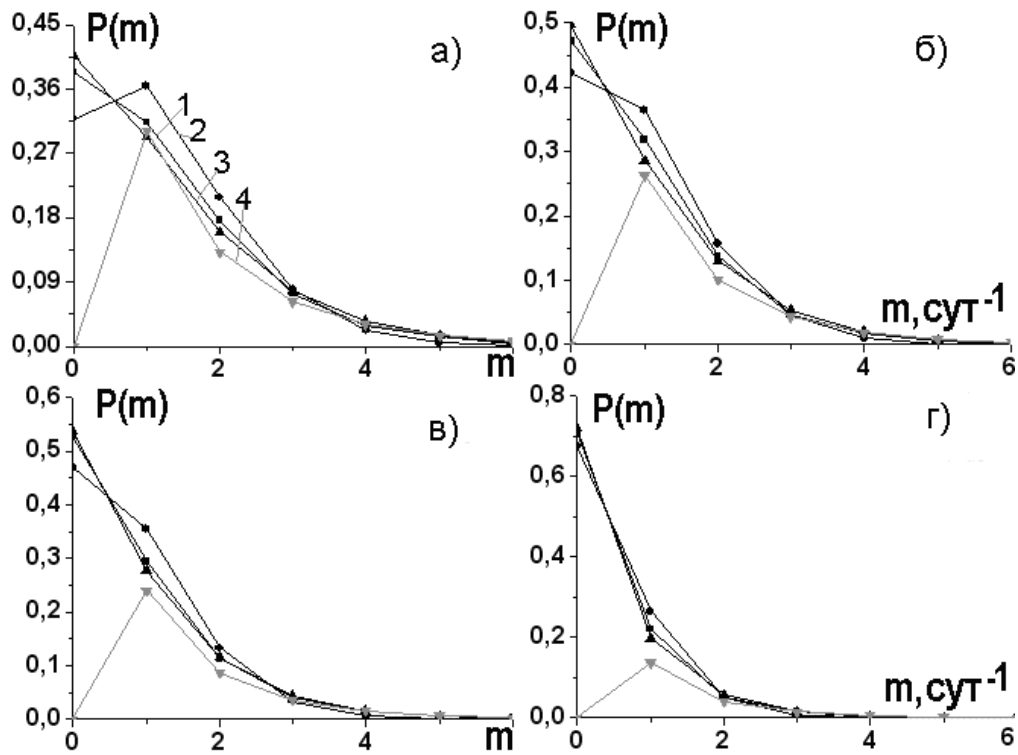


Рис. 5. Условные обозначения те же, что на рис. 4, но для каталога сети KNET.

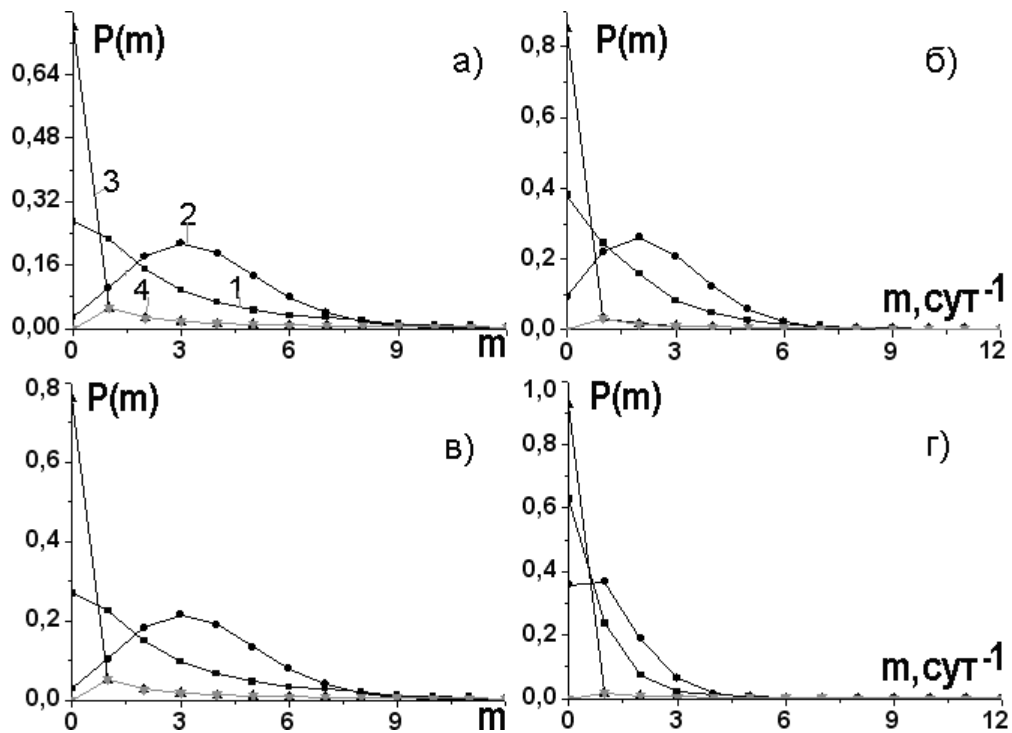


Рис. 6. Условные обозначения те же, что на рис. 4, но для каталога южной части о. Сахалин.

быть опосредованным проявлением иного сочетания случайной и детерминированной компоненты в сейсмическом процессе в зоне взаимодействия Амурской и Охотоморской плит по сравнению с внутриконтинентальным орогеном (Центральная Азия). О наличии определенной доли детерминизма в потоке сейсмических событий в южной части о. Сахалин и ее значимости наилучшим образом свидетельствует факт успешного прогноза Невельского землетрясения, $M_w = 6,2$ [14].

Интересно проследить, как меняется со временем параметр соответствия реального и модельных распределений в зависимости от изменений сейсмической активности, либо стадий подготовки сильного землетрясения. Для этого по трем каталогам (табл. 2) 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. 7. Для оценки хода графиков в те или иные интервалы времени можно воспользоваться рекомендациями [17], 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. 7а, 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. 7б) 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 ЗЛТ (25.12.2006 г. $M=5,8$), землетрясения, отмеченные синими стрелками на рис. 7б.

Аналогичные результаты были получены в работе [15] на основе временного ряда для параметра λ (рис. 7б) с применением критерия Колмогорова-Смирнова. Стоит отметить любопытное обстоятельство: временные зависимости параметров χ^2 и λ на рис. 7а, б описывают сходство эмпирического распределения с пуассонов-

ким даже лучше, чем с распределением Пойа. Но, несмотря на это, для сейсмичности Центральной Азии выбор в пользу пуассоновской 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 асейсмичные временные интервалы (50-сут. окна) низкие значения параметра χ^2 (см. рис. 7в) позволяют говорить о соответствии реального распределения суточного 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 χ^2 на рис. 7в как раз соответствуют периодам с самыми сильными событиями: Невельскому 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. 7д согласуется с предсказанием двухстадийной модели разрушения [3, 4] об изменении характера процесса от случайного к более упорядоченному, перед возникновением магистрального разрыва (основного толчка). Однако при более тщательном анализе, учитывающем, 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 [18]. 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. 6, где для всех выборок событий правая, хвостовая часть эмпирического распределения лежит выше графика для распределения Пойа.

При пробном применении ПО “REFStat-Info” для анализа потока событий акустической эмиссии использовались данные, полученные в

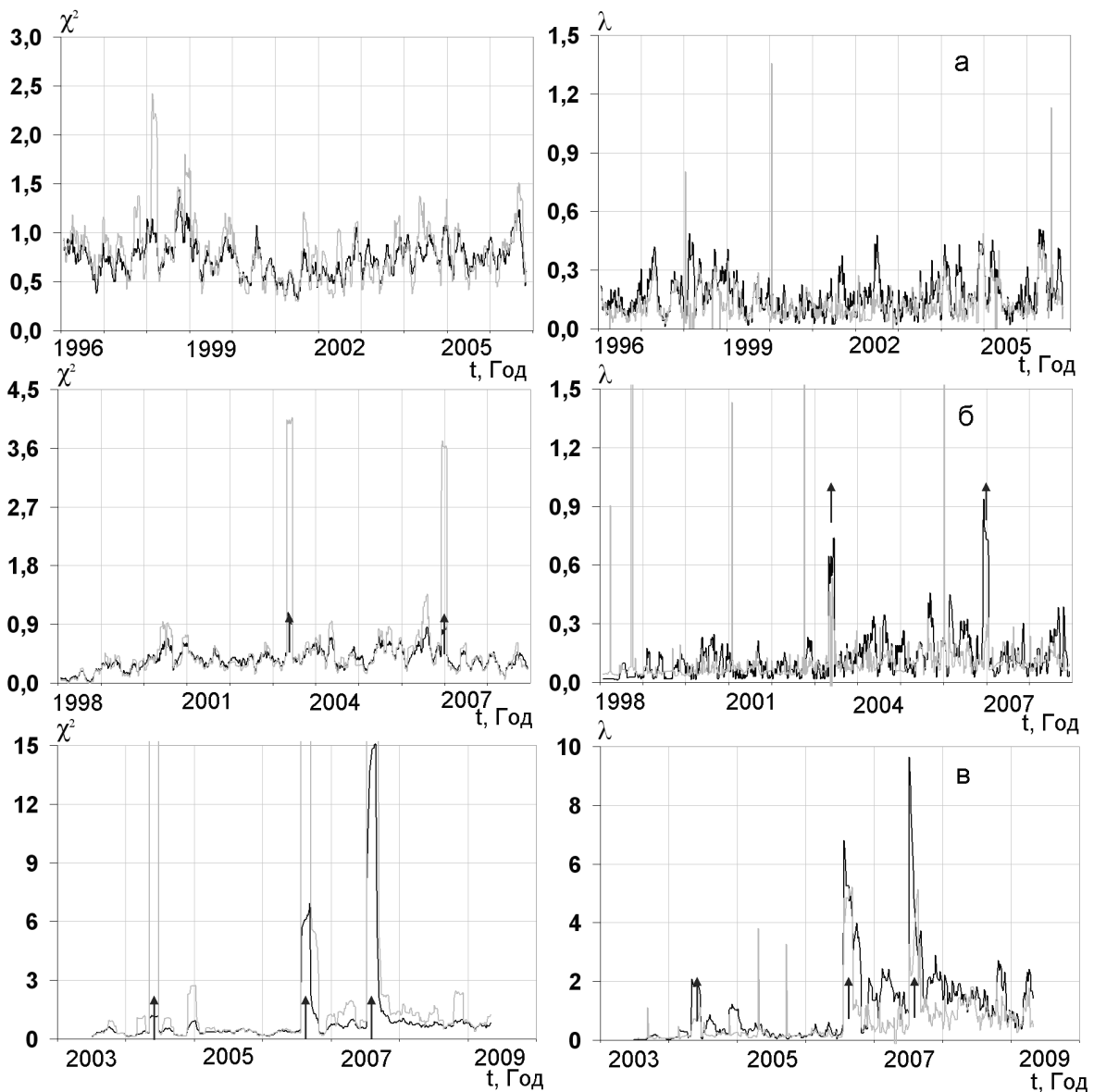


Рис. 7. Изменения параметра соответствия эмпирического распределения сейсмичности рассматриваемых регионов с распределениями Пуассона (черная линия) и Пойа (серая линия) по критериям Пирсона (χ^2), и Колмогорова-Смирнова (λ) для каталогов: а – KAZ, б – KNET, в – СФ ГС. Стрелками отмечены даты землетрясений, указанных в тексте.

эксперименте по испытанию образцов гранита на одноосное сжатие при дополнительном воздействии электромагнитных импульсов [10]. Целью этого эксперимента, проведенного в ИС РАН в г. Бишкеке в поддержку исследований механизмов триггерной сейсмичности, было уточнение особенностей триггерного влияния электромагнитных полей на прирост активно-

сти АЭ. В ходе эксперимента при ступенчатом нагружении образца гранита Уэстерли (США) на рычажно-гравитационном прессе при фиксированной нагрузке 107 МПа (0,85 от уровня разрушения) была зарегистрирована последовательность событий АЭ, сочетающая квазистационарную и достаточно высокую активность АЭ и четко различимые отклики на дополнительные

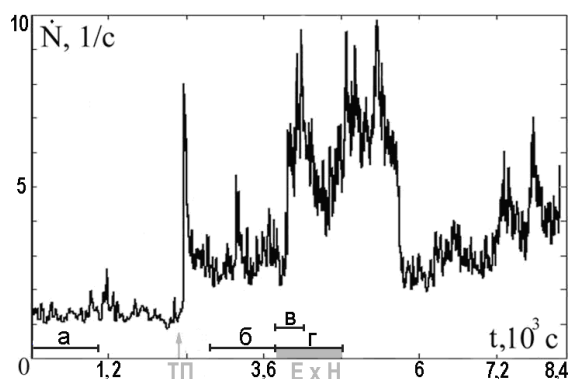


Рис. 8. Активность АЭ образца гранита Уэстерли и дополнительные воздействия во время измерительной сессии при напряжении сжатия 107 МПа: Р – момент тестовой пригрузки; Е×Н – период воздействия скрещенных полей; а–г – неподвижные интервалы, для которых на рис. 9 построены распределения числа событий.

воздействия: тестовую механическую пригрузку на 0,4 МПа (0,35%) и на воздействие скрещенными электрическим и магнитным полями, при котором вектор Умова–Пойнтинга направлен внутрь образца. Благодаря этому сочетанию полученный список событий АЭ, аналогичный каталогу, является подходящим исходным материалом для анализа на соответствие со случайными распределениями. Методика эксперимента, включающая выбор режима нагружения, настройку измерительных каналов АЭ и подбор источников электрического и магнитного поля с требуемыми параметрами, изложена в работах [10, 19]. Для понимания представляемых результатов достаточно отметить, что образец имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 128×58×52 мм, главное сжимающее напряжение действовало вдоль “длинного” размера. Электрическое поле возбуждалось электродами, расположенными на противоположных боковых поверхностях образца, а магнитное поле – катушкой с магнитным моментом, перпендикулярным другой паре боковых граней. На электроды и катушку подавались периодические импульсы напряжения от двух синхронизированных генераторов, и тем самым обеспечивался приток электромагнитной энергии внутрь образца в течение всего периода дополнительного воздействия.

На рис. 8 показана временная зависимость активности АЭ на одной из ступеней нагрузки. Видно, что воздействие скрещенными полями осуществлено, когда завершился всплеск актив-

ности, вызванный тестовой пригрузкой, и установился новый фоновый уровень активности АЭ. Электромагнитное воздействие инициирует резкий прирост активности АЭ, начинающийся с задержкой порядка 150 с после включения источников поля. По числу событий, произошедших сверх ожидаемого по предыстории числа, отклик на воздействие скрещенных полей оказался значительно больше отклика на механическую пригрузку. Длительность периода воздействия скрещенных полей составляет 15 минут, это время можно считать характерным для графика активности АЭ на рис. 8. Такая же длительность задавалась для размера временного окна, в котором строились распределения реально произошедших событий АЭ, а также соответствующие им по значениям M , D распределения Пуассона, Пойа и гамма-распределение. В некоторых случаях размер окна выбирался короче (6 минут). На рис. 9 показан результат построения эмпирического и модельных распределений. На рис. 9а видно, что в обычном режиме испытания на одноосное сжатие (без дополнительных воздействий) эмпирическое распределение событий АЭ, произошедших в 15-минутном интервале – предыстории, согласуется с теоретическими модельными распределениями.

После тестовой пригрузки, ТП и вызванного ею пикового прироста активности АЭ поток событий (усредненная активность) релаксирует и вновь становится квазистационарным. Повышение фонового уровня активности АЭ можно рассматривать как последствие от пригрузки ТП. На новом уровне активности не происходит заметного рассогласования с распределениями Пойа и Пуассона. Об этом может свидетельствовать рис. 9б, распределения на котором относятся к интервалу “б” (см. рис. 8), захватывающему часть периода последствия ТП и заканчивающемуся непосредственно перед началом воздействия скрещенных полей (Е×Н). Существенное различие между эмпирическим и модельными распределениями возникает в начальный период Е×Н-воздействия, в интервале “в” длительностью 6 минут, включающем время задержки (~2,5 мин) и фронт резкого нарастания активности АЭ. На рис. 9 в показано распределение с повышенной долей событий АЭ, следующих друг за другом с краткими (правое крыло) и длинными (левое крыло) интервалами, по сравнению с модельными распределениями. Это можно интерпретировать как проявление кластеров в потоке событий АЭ, за которыми, ввиду быстрого высвобождения

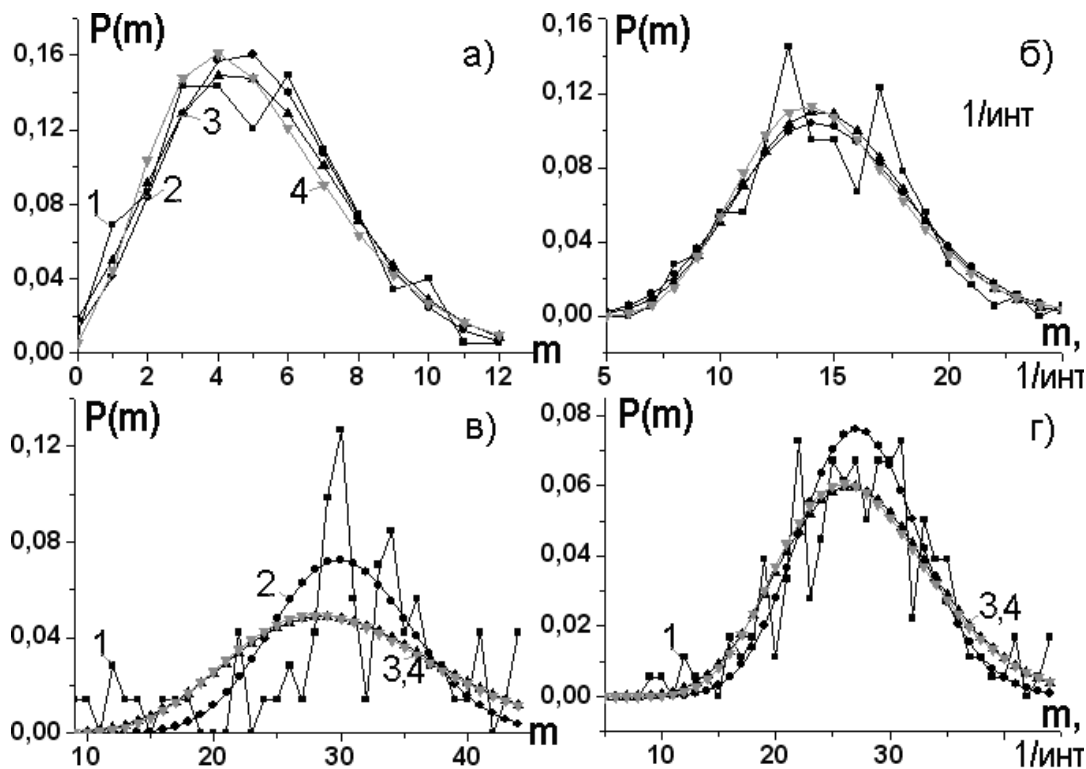


Рис.9. Распределения событий АЭ в пятисекундных интервалах (нормированные на полное число событий) в ходе измерительной сессии на рис.8 и модельные случайные распределения с такими же значениями M, D в течение интервалов: а – первые 15 минут с начала регистрации АЭ; б – 15 минут непосредственно перед внешним воздействием; в – первые 6 минут воздействия $E \times H$; г – весь 15-минутный период с внешним воздействием.
1 – эмпирическое распределение, 2 – Пуассона, 3 – Пойа, 4 – гамма-распределение.

энергии в очагах, следует некоторое загибание. А распределение событий АЭ, произошедших в течение всего периода внешнего воздействия (15-минутного интервала “г”) вновь аппроксимируется случайными распределениями, причем наилучшее соответствие получается для распределения Пойа (рис. 9г). Таким образом, различие между эмпирическим и модельными случайными распределениями присутствует только на начальной фазе воздействия, когда ход графика активности сильнее всего отличается от квазистационара. В этом отношении резкие изменения активности АЭ обнаруживают сходство со всплесками сейсмической активности, примером которых является рассмотренный случай сейсмичности южной части о. Сахалин в начале XXI века.

Заключение. Использование “REFStat-Info” для анализа соответствия эмпирического и модельных распределений сейсмических и акусто-

эмиссионных событий продемонстрировало возможность различить периоды, когда вариации числа событий в единичный интервал времени являются просто реализацией стационарного и ординарного случайного процесса, и когда (в случае рассогласования) стационарность нарушается из-за дополнительного воздействия некоторых факторов. Обобщая случаи отклонения эмпирического распределения от модельных, можно сделать вывод, что оно, как правило, имеет место при резких изменениях активности, и, как следствие, текущих значений матожидания и дисперсии.

Авторы выражают признательность А.А. Асадулиной за помощь в реализации алгоритмов, использованных в ГИС “REFStat-Info”, д.ф.-м.н. Б.Ц. Манжикову за обсуждение вопроса о режимах акустической эмиссии, и к.ф.-м.н. В.Д. Брагину за предоставление сейсмического каталога сети KNET.

Работа выполнялась при частичной поддержке в рамках Программы №1 фундаментальных исследований Президиума РАН “Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID” и Государственного контракта №02.740.11.0730 федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”, а также по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 09-05-0687-а.

Литература

1. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф. М.: Недра, 1981. 232 с.
2. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
3. Куксенко В.С. Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования // Прогноз землетрясений. 1983. №4. Душанбе–Москва: Дониш. С.8–20.
4. Куксенко В. С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности / Под ред. С.Н. Журкова. Л.: Наука, 1986. С. 36–41.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 831 с.
6. Прохоров А. В. Пойа распределение. Математическая энциклопедия. Т. 4. М.: Советская энциклопедия, 1984. С. 387–388.
7. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
8. Закупин А.С., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. Отклики акустической эмиссии геоматериалов на воздействие электроимпульсов при различных величинах сжимающего напряжения // Физика Земли. 2006. № 10. С.43–50.
9. Bogomolov L.M., Zakupin A.S., Il'ichev P.V., Sychev V.N. et al. Acoustic emissions response of rocks to electric power action as seismic – electric effect manifestation // Annals of Geophysics. 2004. Vol. 47. N.1. P. 65–72.
10. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Sycheva N.A. The effect of crossed electric and magnetic fields in loaded specimens // Materials Science and Engineering A. 2009. Vol. 521–522. P.401–404.
11. Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Сычева Н.А., Авагимов А.А. и др. Корреляционный анализ локальной сейсмичности на Бишкекском геодинамическом полигоне в связи с проблемой активного мониторинга. Геофизика XXI столетия: 2005 год // Сб. трудов Седьмых геофизич. чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный Мир, 2006. С.317–325.
12. Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. и др. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: Изд. ИГД СО РАН, 2008. С.179–188.
13. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 254 с.
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. Сычева Н.А., Асадулина А.А., Богомолов Л.М. Применение теории случайных процессов для анализа слабой сейсмичности Тянь-Шаня // Вестник КРСУ. 2007. Т. 7. №12. С.122–126.
16. Круглински Д.Д., Уингоу С., Шеферд Д. Программирование на Visual C++ 6.0 для профессионалов / Пер. с англ. СПб.–М.: Изд.-торг. дом “Русская Редакция”, 2001. 864 с.
17. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1967. 242 с.
18. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as mechanism for earthquakes // Science. 1966. Vol.153. №3739. P.62–64; 990–992.
19. Богомолов Л.М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов // Физическая мезомеханика. 2010. Т.13. №3. С.39–56.