

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

## **ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ПОТОКОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ И АКУСТОЭМИССИОННЫХ СОБЫТИЙ КАК РЕАЛИЗАЦИЙ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**

На основе современных Case-технологий разработана ГИС REFStat-Info, позволяющая обрабатывать потоки сейсмических и акустоэмиссионных событий с построением графиков различных параметров этих потоков в скользящем либо неподвижном окне. С помощью программного комплекса REFStat-Info для двух сейсмически активных регионов Азии: Тянь-Шаня и Сахалина проведен анализ распределений потока сейсмических событий во времени для выявления пределов применимости приближения случайного процесса. Показано, что в отсутствие сильных землетрясений, на коротких временных интервалах последовательность сейсмических событий соответствует реализации случайного процесса, описываемого распределением Пуассона.

**Ключевые слова:** сейсмическое событие, каталог, распределение случайное, акустическая эмиссия

N.A. Sycheva, L.M. Bogomolov, V.N.Sychev  
**GEOINFORMATIONAL ASPECTS OF ANALYSIS OF SEISMIC AND ACOUSTIC  
EMISSIONS EVENTS AS A REALIZATION OF RANDOM PROCESSES**

GIS REFStat-Info has been developed on the base of modern Case- technology to allow processing of seismic and acoustic emission events flow, and building plots of various parameters of the flow in moving or static window. With the aid of the REFStat-Info program the analysis of temporal distribution of seismic events flow was performed for two seismically active Asian regions: Tian - Shan and Sakhalin to reveal applicability limits of random process approach. It is shown that during short intervals without strong earthquakes the progression of seismic events is correspondent with a realization of random process, described by Poisson distribution

**Key words:** seismic event, catalog, random distribution, acoustic emission

### **Введение**

Хотя современные сейсмические сети [[www.IRIS.edu](http://www.IRIS.edu)] обеспечивают возможность непрерывной регистрации скорости смещений среды, связанной с распространением сейсмических волн, представление сейсмического процесса в некотором регионе в форме последовательности событий, характеризуемых несколькими параметрами, включаемыми в сейсмический каталог, сохраняет информативность. Это определяется как удобством сравнения с ранее накопленными данными (каталогами), так и рациональным использованием ресурсов памяти и наличием программного обеспечения (ПО). Опыт, накопленный в результате длительных исследований сейсмического процесса как потока дискретных событий, указывает на присутствие в нем детерминированной и случайной составляющих. Хорошо известными проявлениями детерминизма можно считать закономерности распределения сейсмичности с концентрацией на границах тектонических плит [Касахара, 1985; Теркот 1985], а также наличие ряда квазипериодичностей в следовании событий [Аки, 1972; Соболев, 2003; Журавлев и др.,

2006 (а); Малышков и Малышков, 2009; Тихонов, 2009]. Сравнительно недавно были получены новые результаты о закономерностях потока сейсмических событий, в частности о неравномерном распределении числа событий по времени суток с ночным максимумом и дневным минимумом по местному времени [Журавлев и др., 2006а; Малышков и Малышков, 2009; Тихонов, 2009; Журавлев и др., 2006б]. Разработанное в связи с задачами [Журавлев и др., 2006а; Малышков и Малышков, 2009; Тихонов, 2009; Журавлев и др., 2006б] программное обеспечение [Сычева и др., 2007] имеет, как оказалось, более широкую область применения, и оно включено в качестве элемента в ГИС, представляемую в настоящей работе.

Известны также попытки рассматривать последовательность возникновения сейсмических событий во времени как случайный процесс, описываемый, в частности, распределением Пуассона [Шейдеггер, 1981; Рикитаке, 1979]. В соответствии со сложившимися в прошлом веке представлениями о стадийности подготовки сильного землетрясения 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). Подобный сценарий проверялся по данным акустической эмиссии (АЭ) образцов горных пород, испытываемых на прессах [Куксенко 1983; Куксенко, 1986]. 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, так что неприменимо распределение Пуассона, для которого эти статистические моменты совпадают [Корн и Корн, 1973]. В наших предыдущих работах было показано на примере данных сейсмической сети KNET (Северный Тянь-Шань), что из известных дискретных распределений случайных величин [Рикитаке, 1979; Куксенко, 1986], распределение Пойа хорошо согласуется с наблюдениями слабой сейсмичности. Это модельное распределение выводится из так называемой “урновой схемы Пойа” и описывает случайный процесс с эффектом последействия [Корн и Корн, 1973]. Последнее обстоятельство важно в особенности для потока сейсмических событий, для которых афтершоки и рои землетрясений являются очевидным признаком последействия. При применении распределения Пойа вместо пуассоновского отпадают ограничения в интерпретации сейсмических рядов как простейшего потока случайных событий, с необходимостью характеризуемого как стационарный ординарный поток без последействия [Прохоров, 1984]. В некоторых случаях для достаточно больших промежутков времени может быть эффективным и гамма- распределение [Вентцель, 1969; Прохоров, 1984]. Для оценки соответствия модельных случайных распределений с эмпирическим наиболее часто рассматриваются критерий согласия Колмогорова-Смирнова и хи-квадрат ( $\chi^2$ ) [Корн и Корн, 1973; Вентцель, 1969]. Способствовать широкому применению случайных распределений Пойа и гамма, выражающихся более громоздкими формулами по сравнению с простейшим распределением Пуассона, для анализа и интерпретации вариаций сейсмичности может создание специализированного ПО с адаптацией для работы с сейсмическими каталогами или с потоками событий АЭ. Цель данной работы заключается в развитии такого программного обеспечения, дружественного по отношению к исследователю: сейсмологу либо механику. При разработке ПО с опциями для потоков сейсмических событий и сигналов АЭ было принято во внимание, что в поддержку исследований сейсмического процесса проводится много лабораторных экспериментов на образцах горных пород, испытываемых на прессах с регистрацией акустической эмиссии [Закупин и др., 2006; Bogomolov et al., 2004; Zakupin et al., 2009]. Поэтому актуально создание инструмента для сравнительного анализа закономерностей в распределениях потоков событий, связанных с разрушением среды на натурном (землетрясения) и лабораторном масштабах. Ниже описывается

разработанный программный продукт REFStat-INFO с широким спектром функциональных возможностей. Эти возможности 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 [Богомолов и др., 2006; Сычев и др., 2008], 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 [Завьялов, 2006; Тихонов 2009] 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.

### Методика исследования

Адаптация методики исследования потоков сейсмических и акустоэмиссионных событий как реализаций случайных процессов включает выбор базовых моделей (стандартных распределений случайных величин) и определение области изменения параметров этих распределений, которые будут ассоциированы с данными наблюдений. К методике также относится конкретизация формы выходных данных (результатов анализа в типовых случаях). Эта информация определяет требования к проектируемому специализированному ПО.

Как уже отмечено выше, выбор модельного распределения Пойа для анализа эмиссионных сигналов при разрушении земной коры (сейсмичность, акустическая эмиссия) является вполне естественным. Альтернативное случайное распределение, также представляющее интерес, - гамма- распределение. Для случайного распределения Пойа функция плотности распределения имеет следующий вид [Корн и Корн, 1973]:

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

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 котором  $M$  обозначает математическое ожидание,  $D$  – дисперсию. Закон распределения Пойа (1,2) получается из следующей “урновой схемы Пойа”. Из урны, содержащей первоначально  $n_1$  белых и  $n_2 = n - n_1$  черных шаров, выбирается наугад (т.е. равновероятно) один шар, фиксируется его цвет и шар возвращается в урну с одновременным добавлением  $c$  новых шаров того же цвета. Затем из урны (содержащей теперь  $n + c$  шаров) снова производится случайное извлечение одного шара и повторяется тот же процесс. Извлечению шара, к примеру, черного цвета ставится в соответствие появление события. Выбор элементарного (единичного) интервала времени задается максимальным для задачи числом испытаний  $N_0$  с принципиальной возможностью появления максимума извлеченных черных шаров  $(n_2)_{\max} = N_0$ . При этом  $c$  может быть любым целым числом. При  $c > 0$  схема обладает эффектом последействия, после извлечения шара какого-то цвета при следующем испытании возрастает вероятность

извлечь шар того же цвета. Случай  $c = 0$  (новые шары не добавляются) соответствует случайному выбору с возвращением, а  $c = -1$  (извлеченный шар в урну не возвращается) – схему случайного выбора без возвращения, заканчивающуюся не более чем через  $n$  шагов. Особенностью случая  $c = 0$  является стационарность условий испытаний. В этом случае в пределе  $a \rightarrow 0$  выражение (1) переходит в закон распределения Пуассона [Корн и Корн, 1973]

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

где  $\xi$  – параметр распределения Пуассона, совпадающий с матожиданием и дисперсией

Для гамма-распределения функция плотности, зависящая от двух параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и определяющая вероятность появления  $m$  событий в единицу времени имеет вид:

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

Где  $\Gamma(\alpha)$  - гамма-функция Эйлера [Корн и Корн, 1973]. В выражении (4) параметр  $\alpha$  контролирует форму распределения, а параметр  $\beta$  - амплитуду, т.е. его размах. В частном случае, когда  $\alpha = 1$ , гамма-распределение переходит в экспоненциальное.

Для гамма-распределения математическое ожидание  $M_\Gamma$  и дисперсия  $D_\Gamma$  определяются формулами [Корн и Корн, 1973]

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

Из (5) легко получаются выражения для параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  через моменты  $M_\Gamma$ ,  $D_\Gamma$ , значения которых можно принять равными значениям, соответственно, математического ожидания и дисперсии, вычисленным для реальной совокупности событий. Эти выражения записываются в форме

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

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 бы заведомо меньше половины. Для исследуемых каталогов, бюллетеней, и тому подобных упорядоченных 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  $\tau_1$ . Простой способ обеспечить выполнение условия заполнения – выбрать единичный интервал, несколько превышающий по длительности  $\tau_1$ . 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 элементарных (единичных) в качестве критерия согласия фактически наблюдаемых и модельных распределений можно использовать критерии Колмогорова-Смирнова и Пирсона [Корн и Корн, 1973]. Этот подход был опробован в [Сычева и др., 2007, Сычев и др., 2008], 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...) установлено согласие экспериментального распределения с модельным, например распределением Пойа, дальнейший анализ в типовом случае 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 некоторый участок территории, или какой-либо отрезок времени, либо иной

признак, выделяющий частную последовательность событий из общей. В ряде задач конечной целью как раз и является распознавание неслучайных проявлений скрытых изменений в среде на фоне потока случайных событий.

В предшествующих работах, посвященных, в основном, исследованию кратковременных вариаций слабой сейсмичности при проведении электромагнитных зондирований земной коры сильноточными импульсами, подобный подход применен в простейшем варианте: по временным зависимостям сейсмической активности выделялись периоды с наибольшим по размаху и длительности приросту числа событий, и для этих периодов при помощи (1) оценивалась вероятность появления соответствующих количества событий по суткам. Тем не менее, он продемонстрировал свою эффективность. Этому благоприятствовало следующее обстоятельство.

Для каталога сейсмической сети KNET (Северный Тянь-Шань) за 1998-2007 гг. суточный интервал оказался по длительности совпадающим с наиболее естественным выбором единичного интервала, так что  $M \approx 1$ . Фактическое распределения чисел землетрясений в сутки хорошо описывается моделью Пойа (1), так как, согласно [Сычев и др., 2008], 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 ожидания  $M$  близко к единице, то для оценки значимости случая, описываемого вероятностью  $P_{\text{ran}}$ , 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, что в каждом из  $k$  интервалов будет по одному событию,  $P_1 = P_0 M/(1+a M)$ . Малость  $Z_{\text{ran}}$ , например  $Z_{\text{ran}} \sim 0,01-0,001$ , как в случае работы [Сычев и др., 2008], свидетельствует о высокой значимости реализации распределения с приростом событий, и оно должно быть отнесено к проявлениям неслучайных факторов.

Примером другой задачи, представляющей интерес в связи с поиском надежных предвестников сильного землетрясения, является оценка вероятности отсутствия событий в течение нескольких последовательных интервалов. Распределение Пойа (1) дает следующую вероятность реализации такой “нулевой” выборки для периода из  $k$  суток

$$P_{\text{ran},0} = (1 + a M)^{-k/a} \quad (8)$$

При этом отношение  $Z_{\text{ran}}$  принимает простую форму  $Z_{\text{ran}} = D^k/M^{2k}$ , с помощью которой легко определить, когда наблюдаемая пауза в заполнении интервалов событиями является высокозначимой (не объясняющейся случайным разбросом) и может рассматриваться как предвестник, называемый “сейсмическим затишьем”.

Приведенные примеры демонстрируют важность предварительного анализа всего ряда с расчетом математического ожидания и дисперсии. Это принято во внимание при проектировании системы.

### Специализированная ГИС REFStat-Info: модель, назначение, опции

**Входные данные.** Основным требованием к разрабатываемому программному обеспечению является возможность анализа данных двух типов - сейсмологические данные и данные 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 и 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:

- Каталог сейсмических событий
- Каталог событий АЭ.
- Экспериментальные данные АЭ, находящиеся в каком либо директории, который был использован для записи данных эксперимента.

Поскольку перечисленные входные данных 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 3 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.

**Создание модели 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. Язык UML прошел процесс стандартизации в рамках консорциума OMG (Object Management Group) и в настоящее время является стандартом OMG [Дэвид Дж. и др., 2001]. 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 анализ данных, а также использование справки.

Для анализа данных исследователь может выбрать одно из 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 содержит 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).

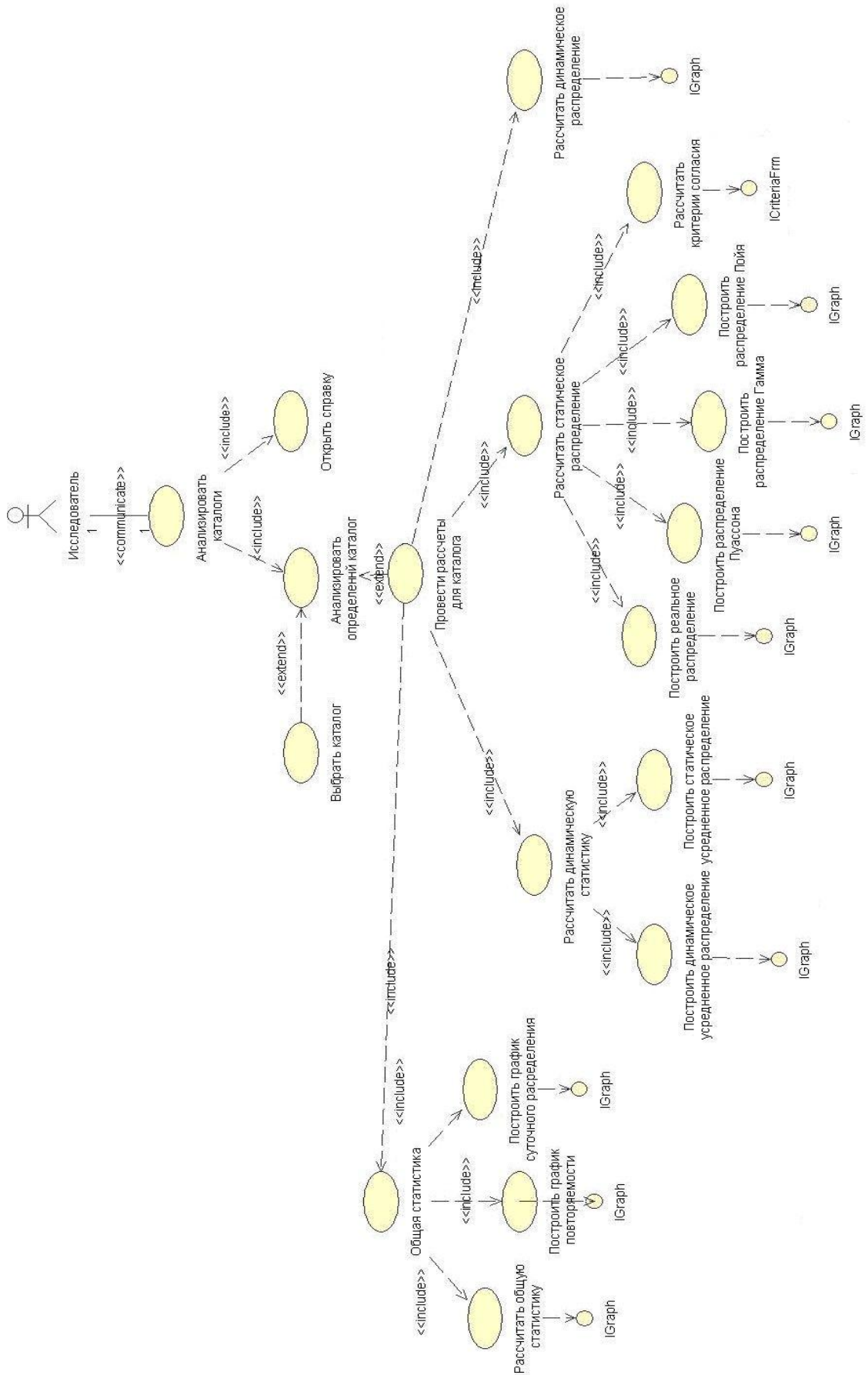


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования (Use Case).

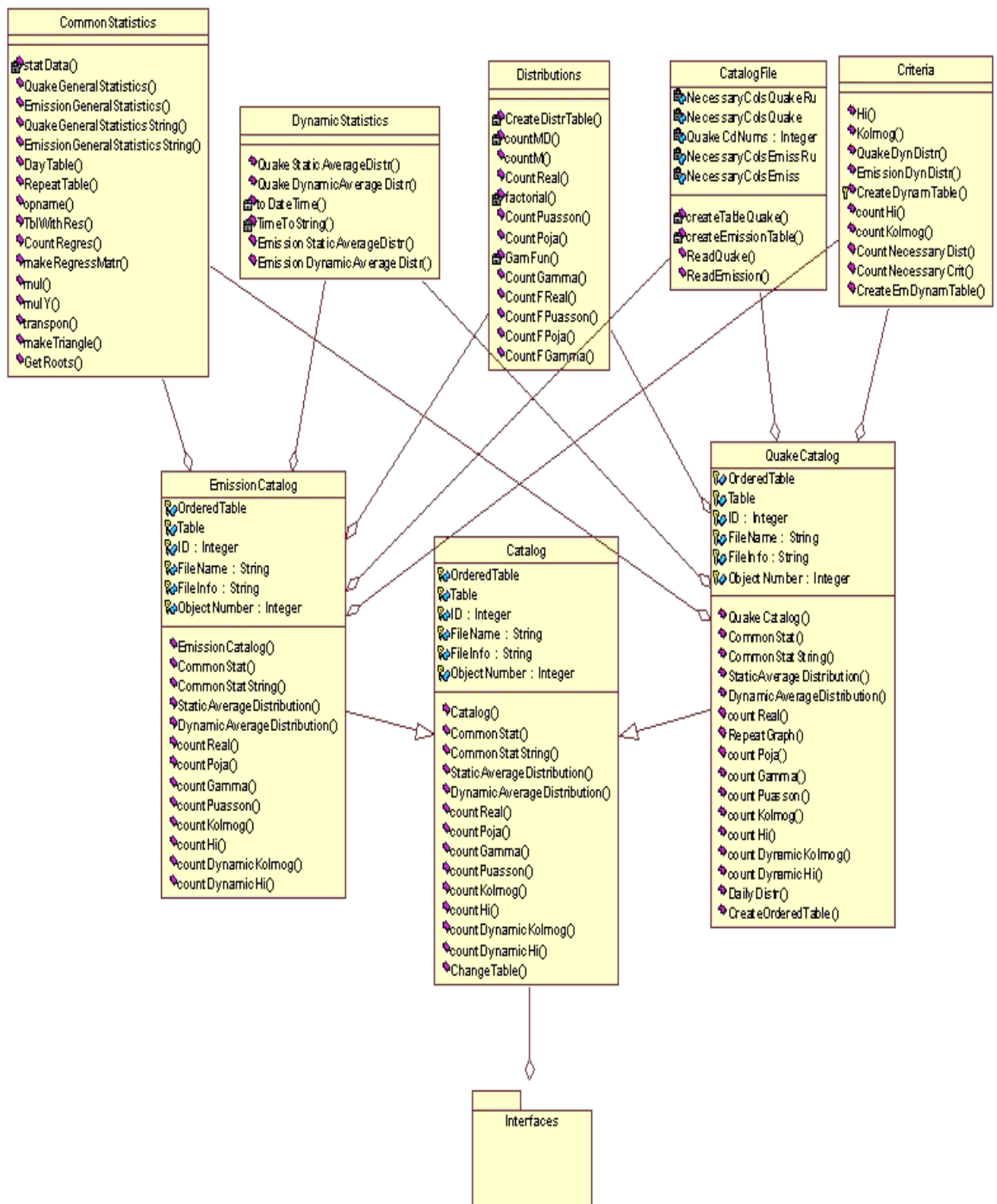


Рис. 2. Диаграмма классов. Общий вид.

**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 Таблице 1.



Таблица 1. Основные функции программного пакета “REFStat-Info”

№	Функции	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	+	+

Предварительно перед выполнением вышеперечисленных функций в ПО имеется возможность выборки данных из общего потока (предусмотрена фильтрация 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. Предусмотрена возможность построения графика повторяемости с линейной аппроксимацией некоторого его участка методом наименьших квадратов. Для наблюдения изменения картины распределения количества событий (сейсмических или АЭ) по времени разработаны режимы расчета статической и динамической активности. 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-Смирнова. “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.

**Общие сведения об интерфейсе. Панель навигации.** Интерфейс разработанного ПО максимально удобен и понятен для пользователя. Слева на основной форме расположена навигационная панель для более удобного манипулирования входными файлами и выходными данными, результатами работы пользователя (рис.3). Панель содержит 3 раздела: “Открытые файлы”, “Выходные формы”, “Информация о файле”. Раздел *Открытые файлы* содержит названия всех открытых пользователем файлов (каталог землетрясений и (или) акустической эмиссии). Выделенный файл является активным и для него проводятся все расчеты и построения. Активировать файл можно двойным щелчком мыши. При активации форма с данными из входного файла выносится на передний план.

№	Дата	Время	Широта	Долгота	Глубина	Класс
1	06.01.1994	07:56:41,02	41,09	73,62	6,51	8,36
2	06.01.1994	23:14:53,41	42,09	73,65	13,35	7,55
3	06.01.1994	14:55:03,46	41,63	75,08	29,20	8,47
4	06.01.1994	10:10:15,02	42,79	75,86	16,60	8,06
5	09.01.1994	14:32:15,88	42,06	73,66	0,10	8,10
6	09.01.1994	05:05:45,98	42,24	73,73	4,44	7,98
7	10.01.1994	08:07:54,85	40,66	73,27	15,60	8,60
8	10.01.1994	08:32:22,44	42,86	77,66	0,00	8,59
9	12.01.1994	03:57:39,15	42,34	73,05	9,86	8,35
10	12.01.1994	00:33:30,38	42,09	73,73	14,5	7,78
11	12.01.1994	03:34:55,71	42,54	74,91	15,68	7,96
12	13.01.1994	03:04:38,84	41,72	74,94	0,20	8,35
13	17.01.1994	17:07:08,51	42,15	73,72	9,64	8,01
14	19.01.1994	00:01:50,66	42,15	73,34	6,67	7,94
15	19.01.1994	08:17:52,92	42,15	73,80	0,01	7,86
16	19.01.1994	18:36:48,72	41,22	75,45	7,65	8,43
17	20.01.1994	11:15:34,93	42,90	76,30	4,48	9,05
18	21.01.1994	12:07:03,30	42,16	73,40	7,	7,88
19	21.01.1994	14:40:22,26	42,31	74,87	5,53	7,86
20	23.01.1994	13:34:32,28	41,74	73,15	14,06	8,34
21	23.01.1994	17:19:00,06	42,13	73,41	13,77	8,26
22	23.01.1994	21:02:18,21	43,08	77,19	0,05	8,5

Рис. 3. Вид панелей навигации (слева) и визуализации (справа) входного файла (каталог сейсмических событий).

В разделе *Выходные формы* отображаются названия только тех форм, которые соответствуют активному входному файлу. При изменении активного входного файла обновляется список выходных форм. Щелчком мыши можно сделать выходную форму активной, после чего она выносится на передний план. И наоборот, если одна из форм выходит на передний план, она становится активной на панели навигации. В случае закрытия пользователем формы она так же исчезает из списка на навигационной панели.

Третий раздел *Информация о файле* предоставляет быстрый доступ к общей статистике по каталогу сейсмических событий: начальная и конечная даты, максимальный и минимальный класс, максимальная и минимальная глубина, количество событий. При открытии файла АЭ также на этой панели выдается Дата и Время начала и конца эксперимента.

*Пункт меню «Файл».* Данный пункт позволяет пользователю открывать файлы (каталоги) сейсмических событий или уже созданные файлы (каталоги) событий акустической эмиссии или создавать файлы акустической эмиссии из файлов лабораторных экспериментов для последующего анализа.

*Открыть файл акустической эмиссии.* При выборе этого пункта открывается окно диалога, предоставляя пользователю выбрать входной файл акустической эмиссии. После выбора файла входные данные предоставляются пользователю в табличном виде в случае, если формат выбранного файла соответствует требованиям. Требования к входным файлам описаны в Справке программы.

*Открыть файл землетрясений.* Этот пункт позволяет пользователю открыть окно диалога для выбора входного файла, содержащего информацию о землетрясениях. После выбора файла входные данные предоставляются пользователю в табличном виде в случае, если файл имеет формат, соответствующий требованиям.

*Создать файл акустической эмиссии.* Выбор данного пункта открывает форму, представленную на рис.4а. Определить входные данные пользователь может нажатием на кнопку «Выбрать» слева от поля «Папка с файлами». Тем самым вызывается открытие диалога для выбора общей папки, в которой хранятся в определенном формате результаты лабораторных экспериментов по акустической эмиссии. Эти файлы распределены по каталогам, созданным в результате проведения эксперимента. Все каталоги, необходимые для формирования файла акустической эмиссии, должны быть сохранены в одном общем каталоге, который и выбирается пользователем в диалоге. Затем пользователь задает имя выходного файла с помощью диалога. Файлы с результатами лабораторного эксперимента содержат информацию о дате эксперимента, исключая год (месяц, день), поэтому пользователь вводит эти данные в поле «Год эксперимента». Нажатие на кнопку «Создать» приведет к созданию файла АЭ в необходимом формате. По завершении процесса выдается сообщение об успешном создании файла или об ошибке.

Любые исследования сейсмического процесса требуют знания дополнительных характеристик, таких как представительный класс событий исследуемого каталога, общие характеристики каталога - время, территория, энергетические характеристики и др. «REFStat-Info» осуществляет их расчет в следующих пунктах меню:

*Пункт «Общая статистика»* предоставляет пользователю возможность построить график суточного распределения, график повторяемости и получить общую статистику по каталогу. Первые две функции можно применить только к сейсмологическим данным.

*Суточное распределение.* При выборе данного пункта открывается диалог рис.4 б, в котором пользователю предлагается установить тип представления суточного распределения. Время сейсмического события в каталогах землетрясений пишется по Гринвичу. Поэтому есть возможность построить суточное распределение «как есть» или же привести его к локальному времени, указав разницу между временем нулевого меридиана (Гринвич) и локального пояса, для которого строится график.

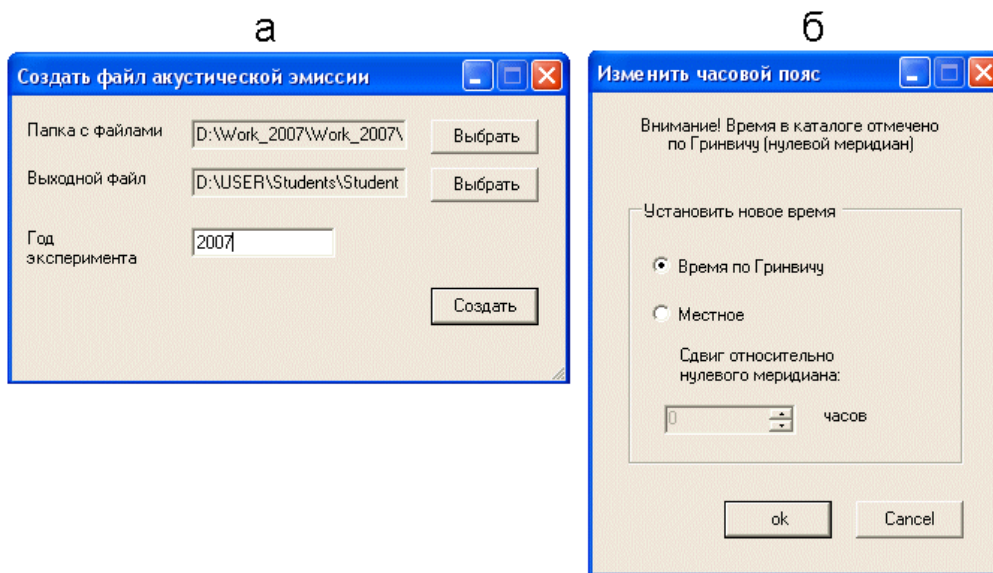


Рис. 4. Вид окна запроса: а - имени папки, содержащей экспериментальные данные АЭ и выходного файла; б - установки времени построения суточного распределения: локальное время или время по Гринвичу (нулевой меридиан).

Пользователь имеет возможность изменять свойства графика, выбрав в контекстном меню режим «Изменить свойства графика». Панель изменения свойств графика приведена на рис.5 а. После введения величины часового пояса строится график суточного распределения (рис.5б).

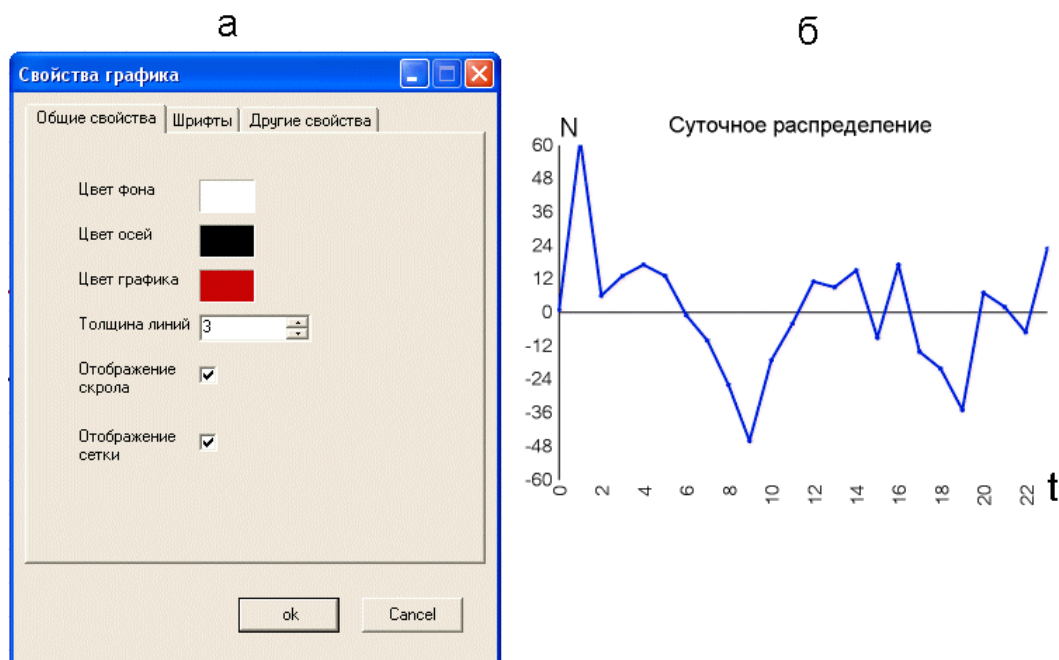


Рис. 5. Окно настройки свойств графика суточного распределения (а) и типовой вид названного графика (б).

*График повторяемости.* Выбор этого режима предоставляет пользователю возможность проанализировать представительность выбранных данных. В логарифмическом масштабе строится распределение числа землетрясений  $N$  по их энергии  $E$ , выраженной через класс  $K$  или магнитуду, (рис.6 а). Представительной выборкой каталога являются события в диапазоне классов лежащих на линейной части графика повторяемости (в примере на рис.6 б это события, начиная с 7.5 класса). Этот режим упрощает процесс анализа представительной части исследуемого каталога построением аппроксимирующей прямой методом наименьших квадратов линейного участка графика. Прямая строится для точек графика, начиная с класса, для которого соответствующее значение по оси ординат максимально (рис.6 б).

Пункт *Общая статистика* предоставляет пользователю общую информацию по сейсмическому каталогу (рис.7): начальная и конечная даты, максимальный и минимальный класс, максимальная и минимальная глубина, количество событий, для файлов акустической эмиссии отображается дата и время начала и конца эксперимента и количество зарегистрированных сигналов АЭ. Существует возможность сохранения полученных данных в текстовый файл.

Пункт меню *«Активность»* предоставляет пользователю возможность расчета статической и динамической активности. После выбора данного пункта меню появляется диалоговая панель, показанная на рис.8а. Пользователь устанавливает необходимые параметры расчета, после нажатия на кнопку *«Ок»* строится график активности.

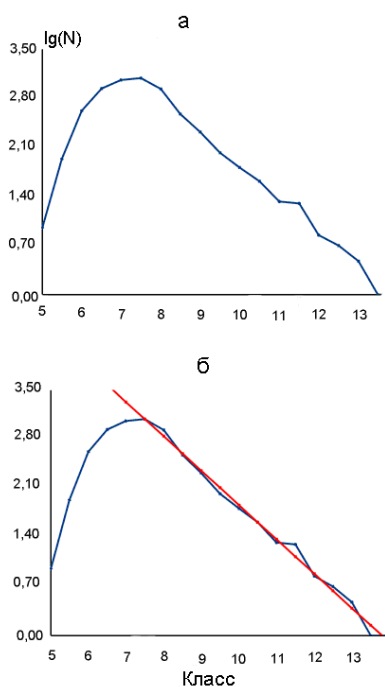


Рис. 6. Пример графика повторяемости сейсмических событий (а) и аппроксимации его участка, наиболее близкого к линейному (б).

Общая статистика	
Событий всего	5431
Дата начала	06.01.1994
Дата конца	30.12.2006
Мин. Класс	5,02
Макс. Класс	14,83
Мин. Глубина/ Макс. Глубина	0   38
Сев./Южн. широта	40,27   44,62
Зап./Вост. долгота	71,49   78,42
<input type="button" value="Сохранить"/> <input type="button" value="Закреть"/>	

Рис. 7. Вид окна представления основных статистических характеристик сейсмологического каталога.

*Статическая активность (разбиение на стоячие интервалы).* Для построения графика активности в этом режиме необходимо указать этот вид расчета на форме диалога и определить период окна усреднения, отрезок времени, на который будет разбиваться весь исследуемый период, а также вид привязки полученного значения ко времени: к началу периода окна, середине или его концу (рис.8а).

На графике статической активности по оси абсцисс откладываются даты, а по оси ординат – количество событий за каждый период окна. Пример ряда сейсмической активности представлен на рис.8б.

*Динамическая активность (скользящее окно).* Для построения графика динамической активности суммируется количество событий, находящихся в ближайших точках (в пределах окна), полученное значение присваивается точке привязки, затем в заданном направлении окно перемещается на заданное количество точек (сдвиг окна) и операция повторяется. Для просмотра графика динамической активности необходимо указать размер окна, сдвиг и точку привязки (начало, середина или конец исследуемого окна). Пример графика динамической активности представлен на рис.8 в.

*Пункт меню «Статическое распределение».* Данный раздел предоставляет возможность просмотреть функции плотности распределений для входных данных за весь период исследования: эмпирическое распределение, распределение Пуассона, распределение Пойя, гамма-распределение, а также определить, подчиняется ли полученное распределение предполагаемой модели с помощью критериев согласия. Пример построения эмпирического распределения и моделей представлен на рис.9 а.



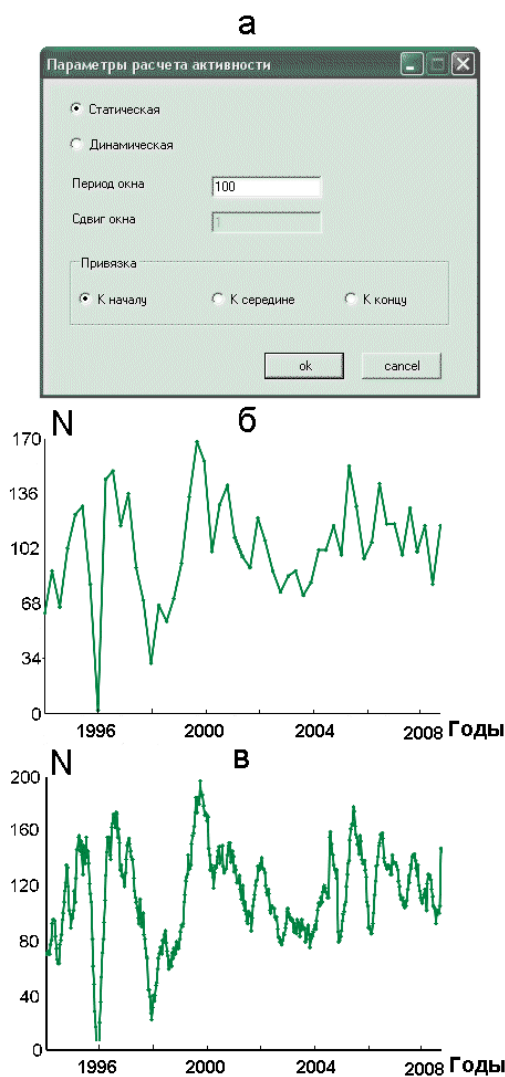


Рис. 8. Общий вид окна запроса параметров расчета активности сейсмических событий (а) и примеры распределений статической активности в окне 90 дней (б) и динамической активности с периодом окна в 100 дней, сдвигом в 10 дней (в). Расчет по данным каталога сети KNET.

*Критерии согласия.* При выборе опции «Критерий согласия» появляется форма (рис.9 б), на которой устанавливается необходимый критерий согласия (Хи-квадрат или Колмогорова), закон распределения, соответствию которому определяется и количество рассчитываемых точек для каждого распределения. Нажав на кнопку «Рассчитать», пользователь может увидеть значение лямда или хи-квадрат, в зависимости от выбранного критерия, в поле «Результат».

*Пункт меню «Динамическое распределение»* позволяет просмотреть изменение критерия согласия в динамике, каким образом изменяется соответствие эмпирического распределения выбранному закону распределения (рис.10 а). Построение графика происходит методом скользящего окна. При выборе этого пункта меню появляется диалог для выбора всех параметров построения: необходимый критерий согласия (Хи-квадрат или Колмогорова- Смирнова), закон распределения, соответствию которому определяется, количество рассчитываемых точек для каждого распределения, размер окна. Затем открывается окно с рассчитанным графиком динамической статистики (рис.10 б).

*Пункт меню «Справка».* Справка создана для ускорения обучения пользователя. Информация о программном обеспечении представлена следующими разделами: Интерфейс, Меню, Входные данные. Первый раздел объясняет логику интерфейса, объясняет работу панели навигации, а также какие типы выходных форм существуют и

какими свойствами и функциями обладают. Раздел **Меню** предоставляет информацию о функциях программного обеспечения, доступ к ним и их реализация. Раздел **Входные данные** предоставляет требования к формату входных данных.

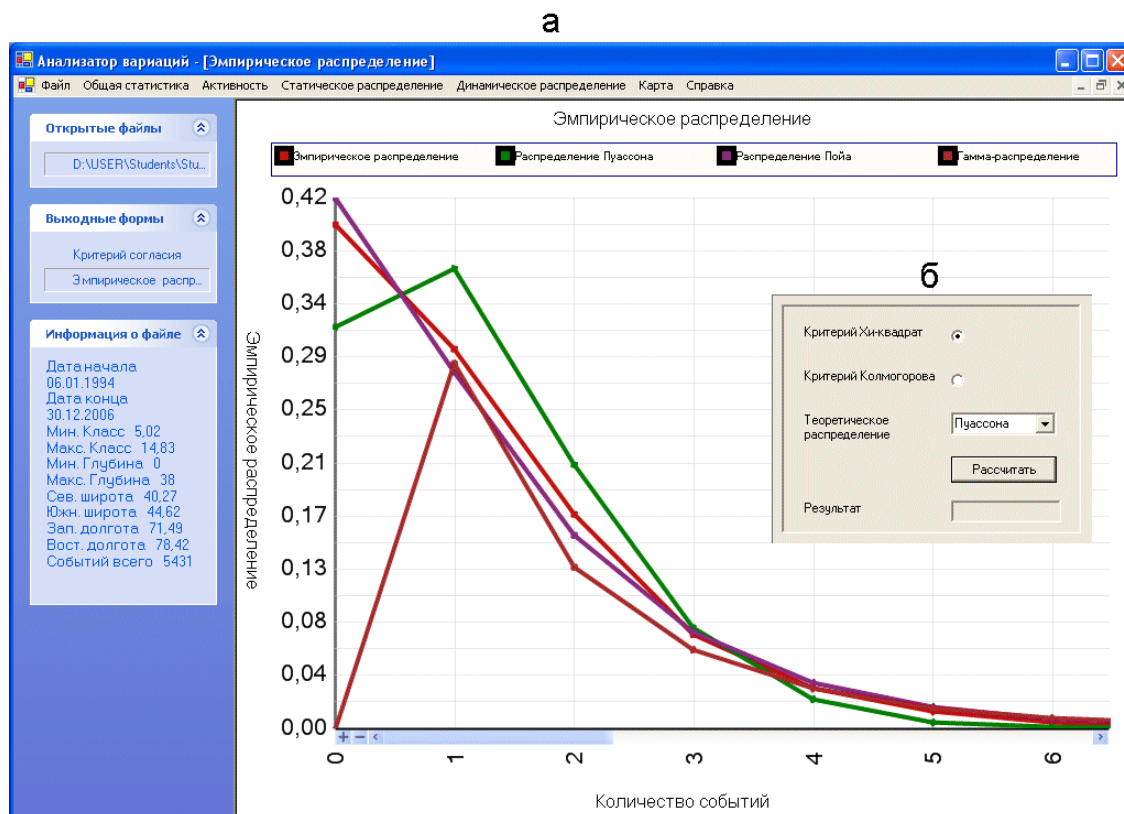


Рис. 9. Пример графиков эмпирического распределения и моделей: Пуассона, Пойа и гамма-распределения (а) и окно установки параметров для анализа соответствия реального распределения со случайными моделями (б).

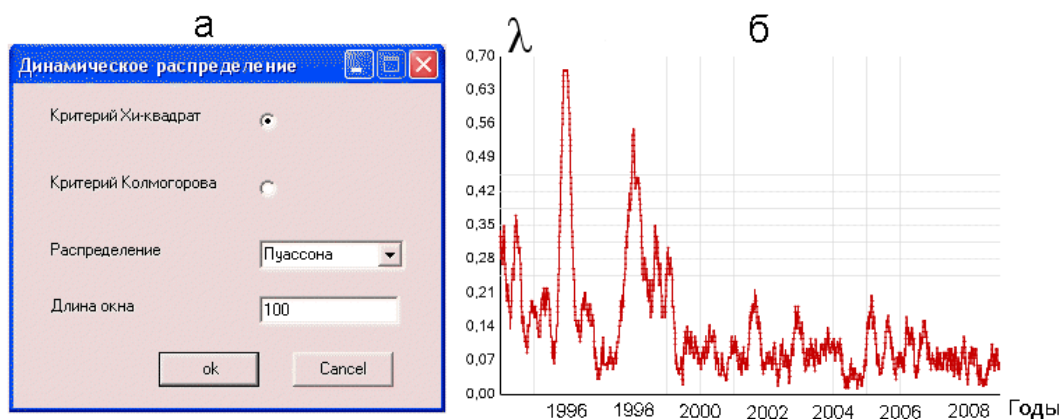


Рис. 10. Окно установки параметров при анализе соответствия распределений в динамическом окне (а) и пример графика оценки критерия соответствия эмпирического распределения распределению Пуассона в скользящем окне 100 суток (б).

### Пробные результаты

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 таблице 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; Горнозаводское ЗЛТ 17.06.2006; Костромское ЗЛТ 30.05.2004. На выбранных для сравнения двух зонах Тянь-Шаня (оконтуренных станциями сейсмических сетей KAZ и KNET) в этот период не зарегистрировано событий классов  $K > 15$  (с магнитудой  $M > 6$ ). Распределение эпицентров сейсмических событий по территории рассматриваемых регионов и графики повторяемости и соответствующих им каталогов представлены на рис. 11

Таблица.2. Основные параметры используемых каталогов землетрясений

№	Каталог, Метка на рис	Колич. Станций	Регион	Период	Колич. событий	Диапазон Представит.К
1	KAZ	7	Северо-Восточный Тянь-Шань (Казахстан)	01.01.1996-31.12.2006	15602	7,0-12,5
2	KNET	10	Северный и Центральный Тянь-Шань (Киргизстан)	01.01.1994-31.12.2008	6270	7,0-12,0
3	СФ ГС	9	Южная часть о. Сахалин	01.01.1995-31.12.2006	5188	7,5-12,0

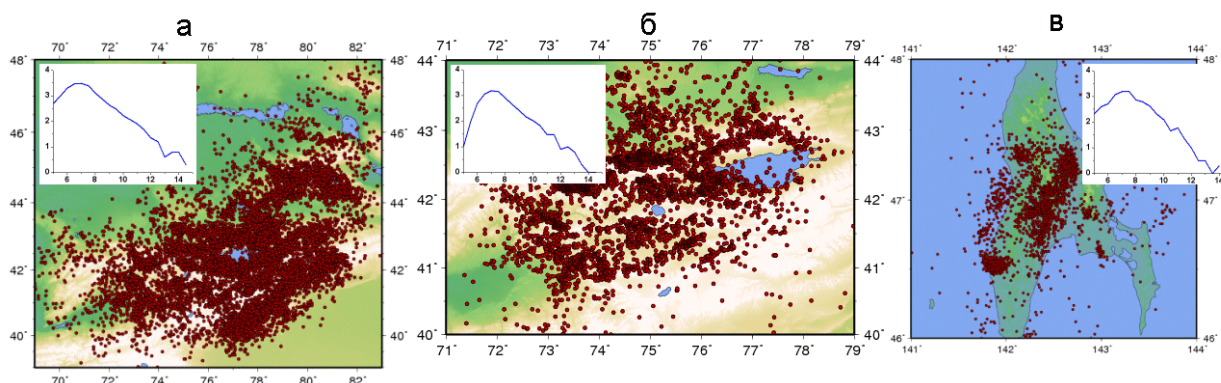


Рис. 11. Расположение эпицентров сейсмических событий на рассматриваемых территориях и графики повторяемости исследуемых каталогов: а – KAZ (Институт сейсмологии МОН РК); б- каталог KNET (НС РАН в г.Бишкеке); в- каталог южной части о. Сахалин (СФ ГС РАН, ИМГи Г ДВО РАН).

Для каждого исследуемого каталога формировались следующие выборки:

- все события;
- события представительной части каталога;
- события с  $K$  (класс по Раутиан)  $< 8$ ;
- события с  $K \geq 8$ .

Для каждой из этих выборок строились распределения сейсмических событий по тому или иному параметру. Некоторые из подобных распределений для (график повторяемости, распределение по времени суток) уже демонстрировались на примере данных сети KNET (рис.5 в, б). Ниже рассматривается 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.12-14 представлены эмпирические распределения и модельные случайные распределения с соответствующими параметрами.



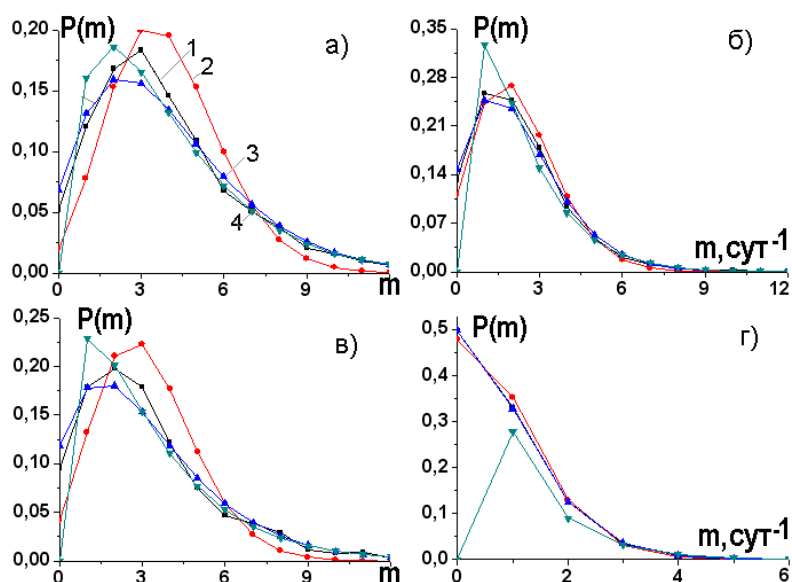


Рис. 12. Графики распределения событий по числу  $m$  событий за сутки (1), с нормировкой на полное число событий для выборок из каталога KAZ: а) – все события; б) – представительная часть каталога (7-12,5 класса); в) события класса меньше 8; г) события 8 класса и выше. 1-эмпирическое, 2-Пуассона, 3-Пойя,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

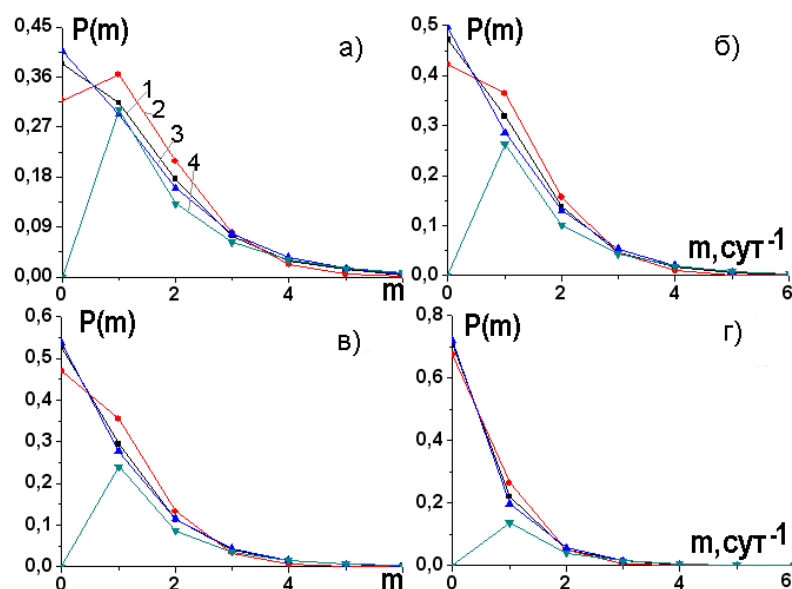


Рис. 13. То же, что на рис.12, но для каталога сети KNET.

Рис. 12, 13 могут свидетельствовать, что для двух рассматриваемых зон Центральной Азии поток сейсмических событий аппроксимируется случайным процессом с законом распределения Пойя. Для этих территорий распределение реальных событий энергетических классов  $K \geq 8$  также находится в соответствии с Пуассоновским распределением. Для каталога KAZ (Северо-Восточный Тянь- Шань) наилучшее сходство с распределением Пойя получается для выборок событий б)- события из представительного диапазона, и г)- события с  $K \geq 8$ . Для каталога 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 Пойя (рис 13). Как показывает рис.14, для Сахалинского каталога в целом за весь период наблюдений эмпирическое распределение суточного числа событий существенно отличается от рассматриваемых случайных распределений. Этот частный аспект может 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,  $M_w = 6.2$  [Тихонов, Ким,2008].

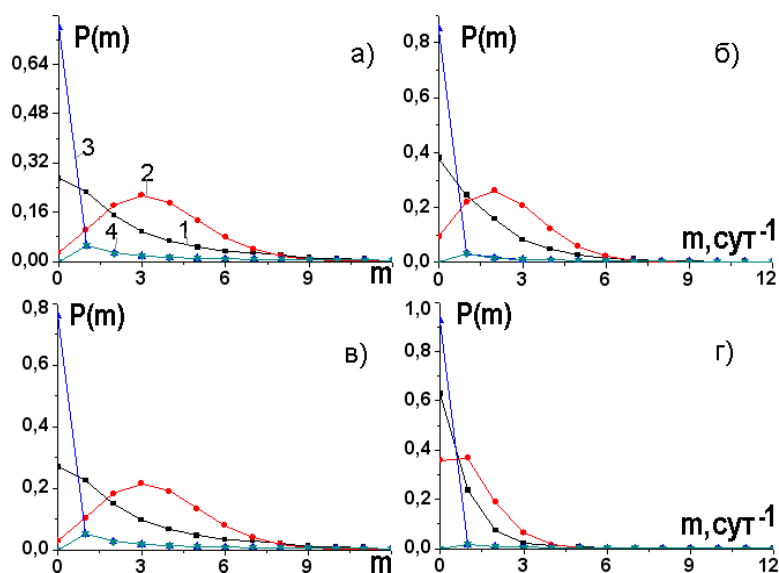


Рис. 14. То же, что на рис.12, но для каталога южной части о. Сахалин.

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 трем каталогам (табл.2) в скользящем окне проведен расчет параметров ( $\chi^2$ ), и  $\lambda$ , фигурирующих соответственно в критериях согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова. Размер окна выбирался 50 суток, что значительно короче периодов, охватываемых каталогами. Благодаря этому для параметров  $\chi^2$  и  $\lambda$  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 15. Для оценки хода графиков в те или иные интервалы времени можно воспользоваться рекомендациями [Худсон, 1967], 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. 15 а, для территории Северо-Восточного Тянь-Шаня во всех 50-суточных интервалах эмпирическое распределение суточного числа событий соответствует модели Пуа. Для Северного и Центрального Тянь-Шаня (рис 15 б) соответствие с распределением Пуа имеет место “почти всегда”, т.е. в подавляющем большинстве 50-суточных окон. Исключения (два всплеска параметра  $\chi^2$  с превышением критерия) приходятся на время, когда произошли Луговское (22.05.2003г. M=5.4) и Кочкорское ЗЛТ (25.12.2006, M=5.8), отмеченные синими стрелками на рис.15б.

Аналогичные результаты были получены в работе [Сычева и др, 2007] на основе временного ряда для параметра  $\lambda$  (рис 15 б,) с применением критерия Колмогорова-Смирнова. Стоит отметить любопытное обстоятельство: временные зависимости параметров  $\chi^2$  и  $\lambda$  на рис 15 а-б описывают сходство эмпирического распределения с Пуассоновским даже лучше, чем с распределением Пуа. 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  $\chi^2$  (см. рис. 15 в) позволяют говорить о соответствии реального распределения суточного числа событий с распределением Пуа. 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  $\chi^2$  на рис.15 в как раз соответствуют периодам с самыми сильными событиями: Невельскому ЗЛТ 02.08.2007,  $M_w = 6.2$ , его форшоку с

наибольшей магнитудой- Горнозаводскому ЗЛТ 17.08.2006,  $M_w = 5.6$ , а также Костромскому ЗЛТ 30.05.2004,  $M_w = 4.7$  (время отмечено стрелками). На первый взгляд, временной график на рис.15 д согласуется с предсказанием двухстадийной модели разрушения [Куксенко, 1983, 1986] 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, [Brace, Byerlee, 1966]. При этом за отклонением эмпирического распределения от стандартных моделей случайных процессов стоит другой смысл, и оно не обязательно должно начинаться раньше основного события.

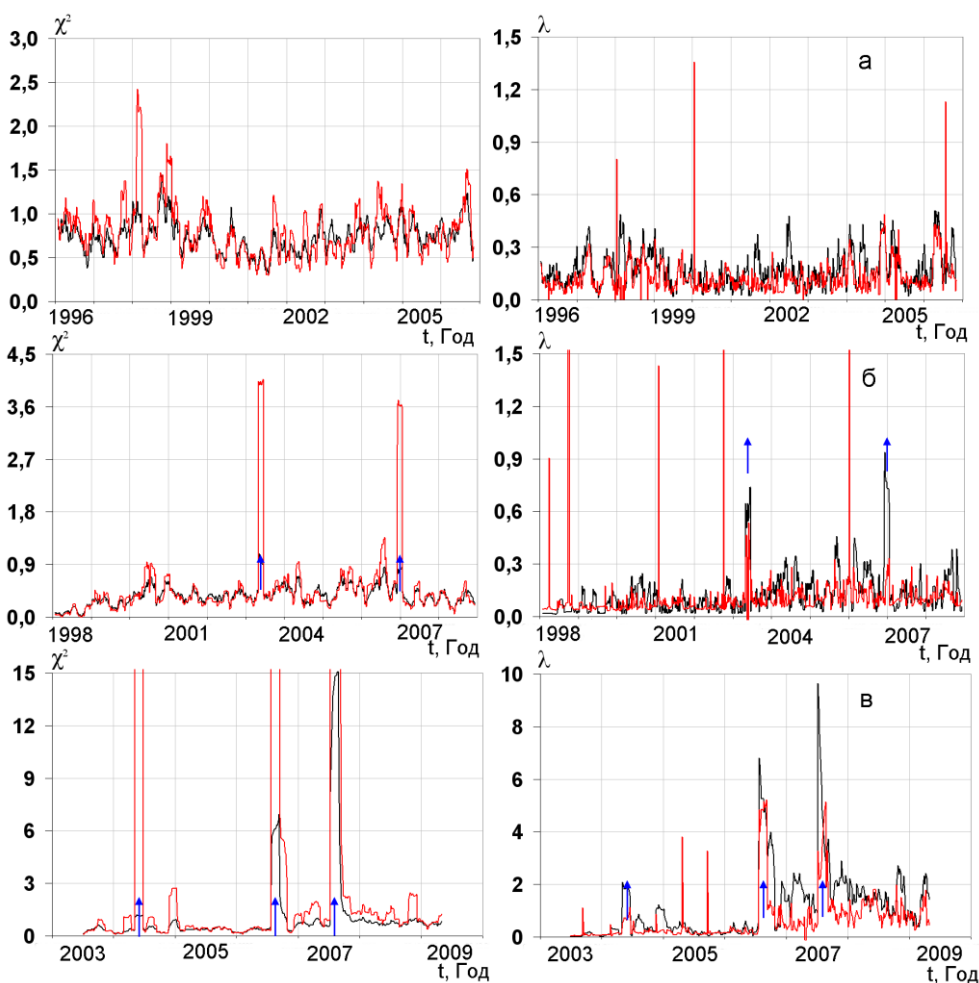


Рис. 15. Изменения параметра соответствия эмпирического распределения сейсмичности рассматриваемых регионов с распределениями Пуассона (черная линия) и Пойа (красная линия) по критериям Пирсона ( $\chi^2$ ), и Колмогорова- Смирнова ( $\lambda$ ) для каталогов: а) - KAZ, б) – KNET, в) – СФ ГС. Стрелками отмечены даты землетрясений указанных в тексте.

Расхождение с распределением Пойа с очень высокими значениями  $\chi^2$  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.14, 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 эксперименте по испытанию

образцов гранита на одноосное сжатие при дополнительном воздействии электромагнитных импульсов [Bogomolov, Zakupin, 2008]. 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 активности 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 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 [Bogomolov, Zakupin, 2008; Богомолов, 2010]. Для понимания представляемых результатов достаточно отметить, что образец имел форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 128 × 58 × 52 мм, главное сжимающее напряжение действует 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.16 показана временная зависимость активности АЭ на одной из ступеней нагрузки. Как видно на рис.16, воздействие скрещенными полями, осуществлено, когда завершился всплеск активности, 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.16. 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.17 показан результат построения эмпирического и модельных распределений. Рис.17а демонстрирует, 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.

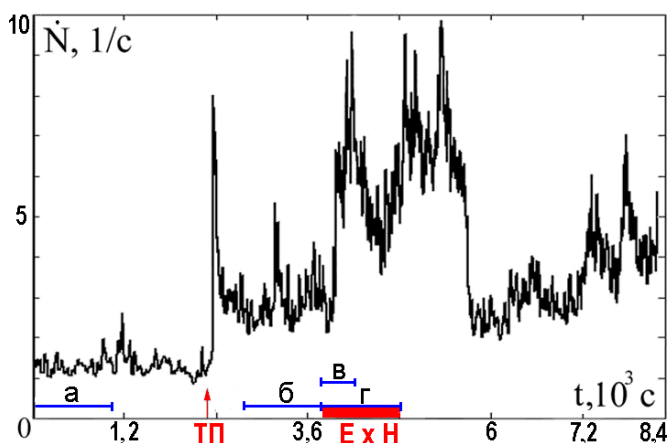


Рис.16. Активность АЭ образца гранита Уэстерли и дополнительные воздействия во время измерительной сессии при напряжении сжатия 107 МПа: Р- момент тестовой пригрузки; Е × Н- период воздействия скрещенных полей; а-г - неподвижные интервалы, для которых на рис. 17 построены распределения числа событий.

После тестовой пригрузки, ТП и вызванного ей 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 Пуа и Пуассона. Об этом может свидетельствовать рис 17 б, распределения на котором относятся к интервалу “б” (см.рис.16) захватывающему часть периода последействия 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 минуты) и фронт резкого нарастания активности АЭ. Рис.17 в описывает 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 энергии в очагах, следует некоторое затишье.

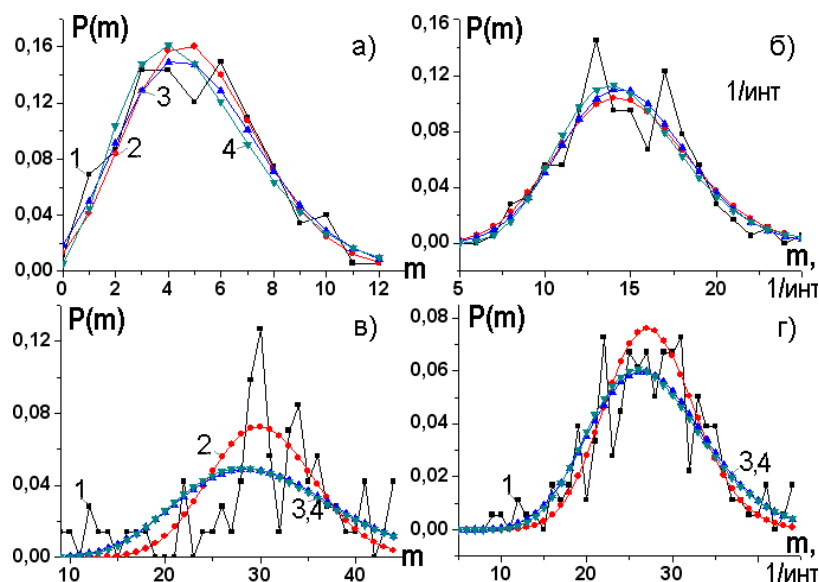


Рис.17. Распределения событий АЭ в пятисекундных интервалах (нормированные на полное число событий) в ходе измерительной сессии на рис.16 и модельные случайные распределения с такими же значениями М, D в течение интервалов: а) первые 15 минут с начала регистрации АЭ, б) 15 минут непосредственно перед внешним воздействием, в) первые 6 минут воздействия Е×Н, г) весь 15 минутный период с внешним воздействием. 1- эмпирическое распределение, 2 -Пуассона, 3-Пойа, 4 – гамма-распределение.

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.17 г). 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 с всплесками сейсмической активности, примером которых является рассмотренный случай сейсмичности южной части о. Сахалин в начале XXI века.

### **Заключение**

Разработанная специализированная ГИС REFStat-Info позволяет быстро и эффективно проводить расчет распределений потоков сейсмических событий и событий АЭ, получать различные статистические характеристики и визуализировать результаты расчета. Программный комплекс REFStat-Info может применяться для анализа распределений во времени любых событий, предположительно случайного характера.

При пробном использовании “REFStat-Info” для анализа соответствия эмпирического и модельных распределений сейсмических и акустоэмиссионных событий продемонстрирована возможность различить периоды, когда вариации числа событий в единичный интервал времени являются просто реализацией стационарного и ординарного случайного процесса, а когда (в случае рассогласования) стационарность нарушается из-за дополнительного воздействия некоторых факторов. Рассмотренные примеры применения программного комплекса согласно вариантов использования (рис.1) имеют и методологическое значение. Они могут быть свидетельством, что для некоторых задач специализированные ГИС, подобные разработанной “REFStat-Info” позволяют обойти ограничения интерпретации статистических данных, имеющих характер “проклятия” статистики, которая по выражению из [Press et al., 1992, p. 603] “не может доказывать принадлежности, а только опровергать их”.

Авторы выражают признательность Асадулиной А.А. за помощь в реализации алгоритмов, использованных в ГИС “ REFStat-Info” и зав. лаборатории комплексных исследований Брагину В.Д. за предоставление сейсмического каталога сети KNET.

Работа выполнялась при частичной поддержке в рамках Программы №15 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.

### **Список литературы**

1. 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 геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный Мир. 2006. С.317-325.
2. 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.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука. 1969. 576 с.
4. Дэвид Дж. Круглински, Скотт Уингоу, Джордж Шеферд Программирование на Visual C++ 6.0 для профессионалов/Пер. с англ. С-Пб - М.: Издательско-торговый дом “Русская Редакция”. 2001. 864 с.
5. Журавлев В.И., Лукк А.А., Мирзоев К.М., Сычева Н.А. Суточная периодичность слабых землетрясений Средней Азии.// Физика Земли. №11. 2006а. С.29-43.



6. Журавлев В.И., Лукк А.А., Мирзоев К.М., Сычева Н.А., Богомолов Л.М. Суточная периодичность и возникновение слабых землетрясений Средней Азии.// Вестник КРСУ. 2006б. Т.6. № 3. С.24-35.
7. 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.
8. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.
9. Интернет- портал [www.iris.edu](http://www.iris.edu)
10. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир.1985. 260 с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука. 1973. 831 с.
12. Куксенко В.С. Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования // Прогноз землетрясений . 1983. №4. Душанбе- Москва: Дониш. С.8-20.
13. Куксенко В. С. Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел //Физика прочности и пластичности. Ред. Журков С.Н. Л.: Наука. 1986. С. 36 - 41.
14. Мальшков Ю.П., Мальшков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра Земли // Геология и геофизика. 2009. Т.50. № 2. С. 152 -172.
15. Прохоров А. В. Пойа распределение. - Математическая энциклопедия. Т. 4. М.: Советская энциклопедия. 1984. С. 387-388.
16. Рикитакэ Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1979. 388 с.
17. Соболев Г.А. Возникновение и эволюция низкочастотных колебаний сейсмической интенсивности перед землетрясениями. //Материалы международной конференции 15-19 сентября 2003 г. Проблемы сейсмологии III тысячелетия. Новосибирск. 2003. С32-34.
18. 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.
19. Сычева Н.А., Асадулина А.А., Богомолов Л.М. Применение теории случайных процессов для анализа слабой сейсмичности Тянь-Шаня.// Вестник КРСУ (Кыргызско-Российский Славянский университет). 2007. Т. 7. №12. С.122-126.
20. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. М.: Мир.1985. Т.1. 374с.
21. 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 2008.2008. Т.420. №4. С.532-536.
22. Тихонов И.Н. Синодические периоды планет Солнечной системы и синхронизация времен возникновения сильных землетрясений// Вулканология и сейсмология.2009. №5. С.1-10.
23. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир. 1967. 242 с.
24. Шейдеггер А.Е. Физические аспекты природных катастроф. М.: Недра. 1981. 232с.
25. Aki K. Scaling law of seismic spectrum. J.Geophys.Res.1972. P. 1217-1231.
26. 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.
27. Bogomolov L.M., Zakupin A.S. Do electromagnetic pulses induce the relaxation or activation of microcracking rate in loaded rocks? (acoustic emission based study). // Solid State Phenomena. 2008. V. 137. P.199-208.
28. Brace W.F., Byerlee J.D. Stick-slip as mechanism for earthquakes// Science.1966. V.153. N.37/39. P. 990-992.
29. Press W.H., Flannery B.P., et al. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. 2- nd ed.: Cambridge University Press. 1992. 994 p.
30. 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.V. 521-522. P.401-404