

УДК 550.343.6

Ю.П. ПОХОЛКОВ, Б.С. РЫБАКОВ, Н.Н. ХОРСОВ

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗА КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

В работе обсуждается синтез алгоритмов прогноза коровых землетрясений методом статистической проверки гипотез по данным измерений параметров естественного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). Оцениваются потенциальные возможности эффективности прогноза. Рассматривается более низкий иерархический уровень прогноза землетрясений с использованием детерминированной модели ЕИЭМПЗ, по сравнению со статистическим, и приводятся количественные данные снижения эффективности прогноза. Разработана методика построения детерминированной и статистической моделей, определены их параметры, а задача прогноза сведена к условиям априорной параметрической неопределенности. Приведены технические характеристики аппаратуры измерения параметров ЕИЭМПЗ.

Коровым землетрясениям предшествуют аномальные изменения параметров естественного импульсного электромагнитного поля Земли [1 – 4]. Этот вывод основывается на изучении статистических характеристик интенсивности импульсного потока (ИИП) (т.е. числа зарегистрированных импульсов электромагнитного поля в единицу времени) на интервале в несколько десятков часов до момента сейсмического события [4].

Физические предпосылки обсуждаемого явления позволяют утверждать, что информация о подготовке корового землетрясения заключена в пространственно-временных характеристиках ЕИЭМПЗ и, следовательно, в параметрах его импульсного потока как случайного процесса времени и пространства. Интенсивность потока в каждой точке пространства является при этом одной из важнейших характеристик этого потока, однозначно определяемая по измеренной частоте следования импульсов в единицу времени.

В целом, импульсный поток может быть представлен путем измерения по каждому импульсу трех величин: пикового значения амплитуды, длительности на уровне порога срабатывания и его временного положения.

В Томском политехническом университете разрабатывались анализаторы импульсных потоков (АИП) разных уровней: «Катюша» (для измерения только интенсивности импульсного потока), АИП-1, АИП-2, АИП-3 и последняя модификация АИП-4, позволяющая не только регистрировать указанные выше параметры потока, но и формировать базу данных в месячных циклах измерений.

### Основные технические характеристики АИП-4

Амплитуда входных сигналов	(50 – 300) мкВ
Длительность входных сигналов	( $10^{-5}$ – $10^{-2}$ ) с
Максимальная частота следования	100 имп./с
Порог срабатывания по входу	(3 – 63) мкВ
Погрешность измерения:	
- амплитуды	± 4 мкВ
- длительности	± 2 мкс
- точность привязки к реальному базовому времени появления импульсов	0,1 с
Интерфейс связи с ЭВМ	RS-232
Скорость обмена данными с ЭВМ	9600, 4800, 2400, 1200 бод
Полоса пропускания приемно-усилительного тракта прибора	(0,8 – 40) кГц
Габаритные размеры прибора	244×206×36 мм <sup>3</sup>

Блок-схема прибора показана на рис. 1.

Принцип работы АИП-4 заключается в следующем. Сигналы ИЭМПЗ воспринимаются магнитной или электрической антенной 1, преобразуются в электрический сигнал и усиливаются 2, 5, 6. Фильтрами верхних 3 и нижних 4 частот формируется частотная полоса пропускания. Для ограничения интенсивности импульсного потока, подлежащего обработке, из-за ограниченности быстро-

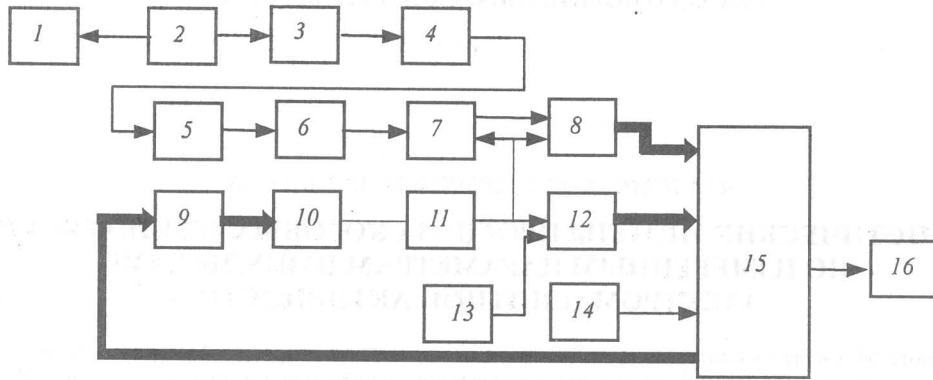


Рис. 1. Блок-схема АИП-4: 1 – антенна; 2 – предварительный усилитель; 3 – фильтр верхних частот; 4 – фильтр нижних частот; 5 – оконечный усилитель; 6 – буферный усилитель; 7 – пиковый детектор; 8 – АЦП; 9 – регистр порога; 10 – ЦАП; 11 – амплитудный селектор; 12 – измеритель интервала; 13 – генератор заполнения; 14 – тактовый генератор; 15 – интерфейсный блок; 16 – ЭВМ

действия и объема памяти ЭВМ в АИП-4 предусмотрена амплитудная селекция импульсов. Она заключается в том, что устанавливается определенный порог, при котором импульсы, амплитуда которых ниже этого порога, не регистрируются. Напряжение порога задается с пульта ЭВМ, через интерфейсный блок 15 поступает на регистр порога 9, преобразуется с помощью ЦАП 10 в аналоговый сигнал и поступает на амплитудный селектор 11. При превышении импульсом порога селекции запускается пиковый детектор 7, который регистрирует максимальное значение импульса, АЦП 8 преобразует его в цифровой вид. Амплитудный селектор запускает также измеритель интервала 12, в котором с помощью генератора заполнения 13 измеряется в цифровом виде длительность импульса на уровне порога. Амплитуда импульса и его длительность через интерфейсный блок поступают в ЭВМ 16. Синхронизация передачи в ЭВМ и приема из нее данных обеспечивается тактовым генератором 14.

В ЭВМ формируется база данных, в которой хранится амплитуда, длительность каждого импульса, а также время его поступления (по часам ЭВМ). Кроме того, предусмотрена информация о номере АИП-4, если имеется несколько станций наблюдений.

Измерения характеристик ЕИЭМПЗ с использованием трех комплектов АИП-4 проводились в летне-осенний период 1990 г. на Алма-Атинском геодинимическом полигоне на трех сейсмостанциях «Медео», «Майтубе», «Тургень», расположенных на расстояниях друг от друга не более 60 км.

Для иллюстрации на рис. 2 приведены суточные вариации средних (за 10 мин) значений амплитуды  $A$ , длительности  $T$ , а также интенсивности потока  $N$  за 2,5 суток с 24.08.90 г., 16:00 по 27.08.90 г., 04:00.

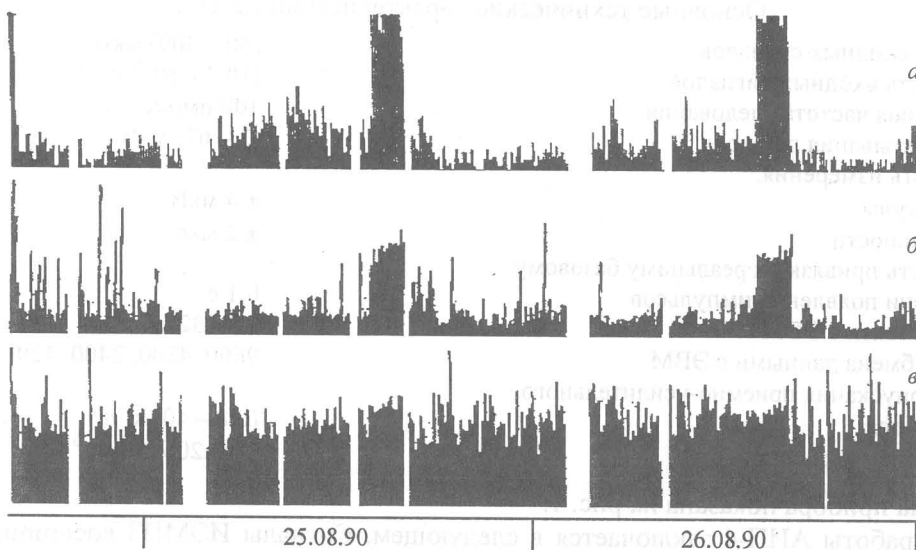


Рис. 2. Гистограммы ИИП  $N$ , отн. ед. (а), длительности  $T$ , отн. ед. (б), амплитуды  $A$ , отн. ед. (в) импульсов электромагнитного поля, усредненных в десятиминутных интервалах времени, зарегистрированных АИП-4 на сейсмостанции «Медео», Алма-Ата

1. Исследование «тонкой» временной структуры ЕИЭМПЗ показало наличие высокого уровня техногенных помех. Значительную долю в структуре поля составляют «пачки» импульсов, внутри которых импульсы следуют с интервалом менее 0,1 с в течение от нескольких секунд до единиц минут с практически нефлуктуирующей амплитудой. Наблюдаются также квазидетерминированные по частоте следования шумоподобные сигналы, периодические сигналы, имеющие вид кодовых посылок, и т.д. Наибольшие помехи, которые с большой вероятностью можно отнести к техногенным, наблюдались на станции «Майтубе», меньше – на «Медео» (но там больше периодических составляющих) и значительно меньше на сейсмостанции «Тургень». Следовательно, с целью прогноза землетрясений, во-первых, должны формулироваться жесткие требования к дислокации регистраторов ЕИЭМПЗ, удаленных от промышленных центров и жилых поселков; во-вторых, на выбранном геодинамическом полигоне должны проводиться предварительные (не менее года) измерения ЕИЭМПЗ с целью разработки статистических критериев селекции помех, то есть своего рода априорное обследование полигона.

2. Для прогноза землетрясений наиболее целесообразно использовать реализации средних значений амплитуды, длительности, интенсивности потока, оцениваемых в минутных интервалах времени (10 – 60 мин) после «выбраковки» техногенных составляющих импульсного потока.

3. По степени информативности и, следовательно, эффективности прогноза первое место занимает плотность потока, второе – длительность. Наименее информативным является амплитуда импульсного потока. Хотя и длительность, и амплитуда импульсов могут быть использованы на стадии селекции помех.

4. Время проявления аномалии по всем трем параметрам составляет несколько десятков часов до момента сейсмического события.

Разработка алгоритмов прогноза землетрясений осуществлялась методами проверки статистических гипотез [5] в рамках критериев теории статистических решений. При применении критерия идеального наблюдателя вводятся функции стоимости двух видов ошибок: «пропуска» землетрясения и «ложной тревоги». Решение принимается путем минимизации «потерь» (штрафов в соответствии с функциями стоимости).

«Пропуск» имеет место, когда сейсмическое событие происходит в данный момент времени  $t$ , а прогноз по его измеренной реализации отрицателен. «Ложная тревога», наоборот, проявляется, когда дается положительный прогноз, а сейсмическое событие не происходит в указанный момент времени.

По критерию Неймана – Пирсона жестко фиксируется вероятность «ложных тревог».

Разработка алгоритма прогноза основывается на построении статистических моделей «сигналов» и «шумов», то есть мономерных плотностей распределения вероятностей  $W_{c+ш}(N, T, A/\alpha_{c+ш})$ ,  $W_{ш}(N, T, A/\alpha_{ш})$ , где  $N, T, A$  – векторы, образованные из соответствующих столбцов средних значений, оцениваемых в минутном интервале времени исходного импульсного потока ЕИЭМПЗ. Индекс  $c+ш$  указывает, что реализация  $N, T, A$  относится к ансамблю, когда сейсмическое событие «готовится», т.е. смесь сигнала и шума. Индекс  $ш$  подчеркивает, что реализация относится к чисто шумовому (естественному фону ЕИЭМПЗ). Плотности  $W_{c+ш}(N, T, A/\alpha_{c+ш})$  и  $W_{ш}(N, T, A/\alpha_{ш})$  являются условными и параметрически определенными при задании векторов столбцов  $\alpha_{c+ш}$  и  $\alpha_{ш}$ .

Прогноз осуществляется путем вычисления отношения правдоподобия

$$\lambda = \frac{W_{c+ш}(N, T, A/\alpha_{c+ш})}{W_{ш}(N, T, A/\alpha_{ш})}$$

для наблюдаемой реализации  $N, T, A$  в реальном времени и сравнении его с пороговым значением  $\lambda_0$ . При превышении порога выносится положительное решение о прогнозе, в противном случае – отрицательное.

Разработка статистической модели ЕИЭМПЗ является сложной задачей из-за нестационарности наблюдаемых процессов, обусловленных суточными и сезонными вариациями поля, а также особенностями геодинамического полигона.

Решение задачи прогноза землетрясений, таким образом, сводится нами в статистическом смысле к условиям априорной параметрической неопределенности [6] и достигается оценкой (табулированием) параметров  $\alpha_{c+ш}$ ,  $\alpha_{ш}$  в зависимости от времени суток, сезона для данного геодинамического полигона по предшествующим длительным измерениям ЕИЭМПЗ.

Такой подход позволяет реализовать предельно достижимые характеристики эффективности прогноза, а обработка измеренных реализаций  $N$ ,  $T$ ,  $A$  будет производиться по синтезированным оптимальным (наилучшим) алгоритмам, максимально приспособленным к статистическим ситуациям, вытекающим из адекватности статистических моделей вариациям ЕИЭМПЗ.

Известны многочисленные работы по исследованию и поиску предвестников землетрясений, основанных на интуиции и инженерных подходах. Все они базируются на выявлении в эксперименте аномальных проявлениях интенсивности импульсного потока во времени перед сейсмическим событием. Авторы отмечают нестабильность этих проявлений, причем в работе [7] за предвестник принимается «затишье», а в [4] – бухтообразное изменение ИИП.

Обобщить эти исследования в рамках единого подхода по построению алгоритмов прогноза землетрясений можно путем применения детерминированных моделей ЕИЭМПЗ, основанных на регрессионном анализе. Эти модели строятся также по данным предварительных измерений поля  $N$ ,  $T$ ,  $A$  данного геодинимического полигона, как и в случае статистических моделей, однако требуют гораздо меньшего объема измерений. Это обусловлено тем, что линия полиномиальной регрессии строится по данным среднестатистических значений временных ходов измеренных реализаций  $N$ ,  $T$ ,  $A$ , относящихся к ансамблю сигнал + шум, и не связано с оценкой параметров распределений  $\alpha_{с+ш}$ .

Проиллюстрируем методику построения детерминированной и статистической моделей, разработку на их основе алгоритмов прогноза землетрясений и оценку их эффективности по данным непрерывных наблюдений ИИП ЕИЭМПЗ на Ташкентском геодинимическом полигоне, полученные сотрудниками Томского политехнического института в 1973 – 1974 гг.

Детерминированная модель [8]. Измеренные значения ИИП совмещались по моменту землетрясения, принимаемому за нуль. При фиксированном времени удаления от нуля  $\Delta t$  по совокупности реализаций формировались статистические ряды, для которых рассчитывались средние значения  $m_N$  и 95%-е доверительные интервалы для них  $\pm \Delta m_N$ .

Для анализа выбирались «одиночные» землетрясения, произошедшие в 1973 – 1974 гг. с глубиной очага  $H \leq 2 \cdot 10^3$  м, расположенные в радиусе  $R$  от места приема электромагнитных импульсов. Выбранные события были сформированы в три группы, соответствующие девятому, десятому и одиннадцатому классам  $K$ . Число усредняемых реализаций  $n$  составляло:  $K = 9$ ,  $n = 16$ ;  $K = 10$ ,  $n = 14$ ;  $K = 11$ ,  $n = 10$ . Для событий других энергетических классов объем измерений не является репрезентативным.

Длительность реализации ИИП для каждого «одиночного» землетрясения составляла 58 ч до ( $t_1$ ) и 12 ч после ( $t_2$ ) сейсмического события. Выбранная величина  $t_1$  позволяет исследовать статистические характеристики оперативного электромагнитного предвестника землетрясений. «Одиночными» землетрясениями считались те, во временной окрестности которых в интервале  $\pm 58$  ч не наблюдалось других землетрясений с энергетическими классами  $K \geq 9$  и эпицентрами, удаленными на расстояния до  $R$  от места расположения датчиков. По результатам расчета  $m_N$  и  $\pm \Delta m_N$  строились временные ходы.

Для прогноза времени землетрясений использовалась классическая теория обнаружения детерминированного сигнала в шуме [5]. Под сигналом  $S(t)$  понималась линия полиномиальной регрессии ходов  $m_N$  в интервале времени  $-50 \leq \Delta t \leq -43$ ч. Порядок аппроксимирующего полинома

$$S(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4$$

для землетрясений исследуемого региона выбран равным четырем, что удовлетворяет, с одной стороны, наблюдаемым ходам  $m_N$ , с другой – осуществляет достаточное сглаживание случайных ошибок его измерений. Коэффициенты полинома оказались равными

$$a_0 = 182,5; a_1 = -248,2; a_2 = -190,6; a_3 = 216; a_4 = 93,9.$$

Алгоритм прогноза времени землетрясения может быть записан в виде [5]

$$U(\tau) = \int_{t-\Delta t}^t E^*(t) S(t-\tau) dt. \quad (1)$$

Устройство, реализующее этот алгоритм, часто называют корреляционным приемником. В нем  $E^*(t)$  – переформированная путем сглаживания полиномом четвертой степени реализация измеренных значений ИИП электромагнитных импульсов,  $U(\tau)$  – выходное напряжение корреля-



ционного приемника. Приемник при повышении порогового значения  $U_0$  в момент времени  $t_0$  принимает решение, что землетрясение должно произойти в интервале времени  $t_0 + t_1^*$ ,  $\tau \leq t_0 + t_2^*$ . Величины  $t_1^* = 41$  и  $t_2^* = 55$  ч получены из анализа ходов  $U(\tau)$  для одиночных землетрясений. Длительность аномальных значений  $U(\tau)$  на уровне  $0,7 U(\tau)$  при подготовке «одиночных» событий составляет  $(5 \pm 1)$  ч. При работе корреляционного приемника возможны ошибки двух родов: ложная тревога (в указанном интервале сейсмическое событие в действительности не произойдет, хотя превышение порога  $U(\tau)$  будет зарегистрировано) и пропуск (в момент  $t_0$  значение  $U(\tau)$  оказывается ниже порога, а землетрясение произойдет).

Для оценки эффективности предложенного метода прогноза времени землетрясения были использованы данные зимнего периода наблюдений ИИП электромагнитных импульсов, характеризующиеся минимальной интенсивностью фоновых значений в диапазоне СНЧ [9]. Учитывались только те превышения  $U(\tau)$ , относительно порога  $U_0$ , ширина которых на уровне  $0,7 U(\tau)$  составляла  $(4 - 6)$  ч.

Результаты сопоставления статистического прогноза с коровыми сейсмическими событиями энергетических классов 9, 10, 11, эпицентры которых находились соответственно в радиусе 200, 300, 500 км, приведены в табл. 1.

Таблица 1

$U_0$ , имп./ч	Вероятность правильного прогноза	Вероятность пропуска землетрясений	Вероятность ложной тревоги
12	0,58	0,42	0,48
20	0,45	0,55	0,32
30	0,45	0,55	0,19

Число рассматриваемых землетрясений  $n'$ , произошедших в зимний период наблюдений, составило для событий энергетического класса  $K = 9$ ,  $n' = 12$ ;  $K = 11$ ,  $n' = 5$ .

Сравнительно невысокое значение вероятности правильного прогноза при минимальном значении 0,19 для вероятности ложных тревог обусловлено наличием большого числа пропусков событий с энергетическим классом 9 и 10. Так, из 26 землетрясений указанных классов правильно спрогнозировано только 9, а для событий с  $K = 11$  правильно спрогнозированы все пять.

Статистическая модель [10]. Способ и устройство, реализующие алгоритм (1), решают задачу прогноза землетрясений для простых методов статистического описания, в частности для детерминированной модели сигнала и модели «белого» шума с известной мощностью. Он по своей структуре не учитывает, по крайней мере, двух факторов.

Во-первых, шумовой фон как дискретный процесс частоты следования электромагнитных импульсов является в реальных условиях нестационарным процессом с выраженным суточным и сезонным ходами [1,3,4] и с изменяющейся во времени дисперсией, в отличие от модели «белого» шума. Во-вторых, полезный сигнал отражает лишь детерминированный ход во времени аномальных проявлений электромагнитной активности при подготовке землетрясений и не учитывает случайный (по ансамблю) характер реализации частоты следования импульсов по совокупности сейсмических событий.

Время локализации аномальных проявлений электромагнитной активности определялось по реализациям ИИП одиночных землетрясений в интервале времени 58 ч и 12 ч после сейсмического события с помощью корреляционного интеграла (1) следующим образом. Положение линии регрессии  $S(t)$  («трафарета») для каждой реализации фиксировалось во времени там, где  $U(\tau)$  достигало наибольшего значения. Так как длительность (ширина)  $\Delta t$  «трафарета» составляет по данным [8] 6 ч, то он всегда «накрывает» шесть измеренных  $N_{i+j, c+\text{ш}}^{(j)}$  текущих значений электромагнитной активности, предшествующих моменту сейсмического события за  $48 \pm 7$  ч. Нижний индекс  $c+\text{ш}$  указывает на принадлежность выбранных значений  $N_i$  ансамблю аномальных проявлений ИИП (статистическому классу «сигналов»), в то время как верхний  $j = 1, 2, \dots, 6$  условно отождествляется с развитием этой аномалии во времени на интервале  $\Delta t$  (значение  $j = 1$  соответствует ее началу, а  $j = 6$  – концу).

Значения  $N_{i+1, c+\text{ш}}^{(1)}$ ,  $N_{i+2, c+\text{ш}}^{(2)}$ , ...,  $N_{i+6, c+\text{ш}}^{(6)}$  по совокупности реализаций одиночных землетрясений формировались соответственно в шесть групп выборочных значений (признаком являлся верхний индекс), по которым далее рассчитывались гистограммы распределений.

Примеры эмпирических распределений электромагнитной активности для зимнего периода наблюдений, соответствующие второму ( $j = 2$ ) и шестому ( $j = 6$ ) индексам, приведены на рис. 3, а ход медианных значений  $N_{с+ш}$  в зависимости от  $j$  представлен на рис. 4. Количество одиночных землетрясений, используемых для обработки, составило  $n = 27$ .

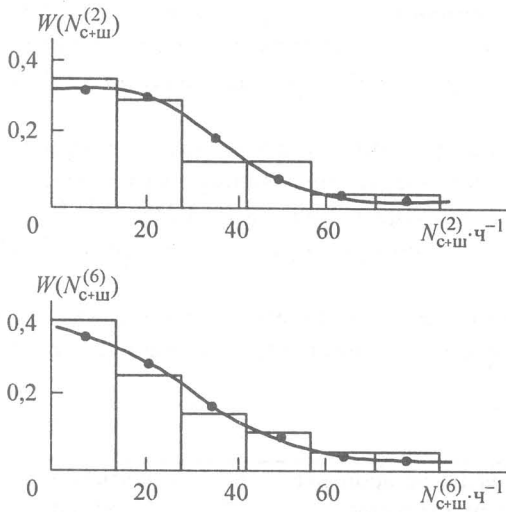


Рис. 3. Законы распределения вероятности ИИП-«сигнала»

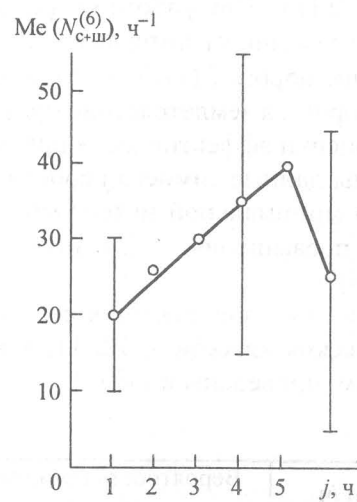


Рис. 4. Ход медианных значений ИИП-«сигнала»

Гистограммы распределений шумового фона строились по следующей методике. Из непрерывных реализаций электромагнитной активности, относящихся к зимнему, весеннему, летнему и осеннему сезонам, выбраковывались (исключались) значения  $N_{i, с+ш}$ , соответствующие сейсмическим событиям. Части усеченных реализаций совмещались по времени суток  $i = 1, 2, 3, \dots, 24$ , по которой для каждого  $i$  формировались выборочные значения ИИП. Гистограммы распределений электромагнитной активности шумового фона для зимнего периода наблюдений и различного времени суток приведены на рис. 5, а соответствующий им суточный ход медианных значений представлен на рис. 6. Полученные суточные ходы интенсивности шумового фона качественно совпадают с данными других авторов [9, 11].

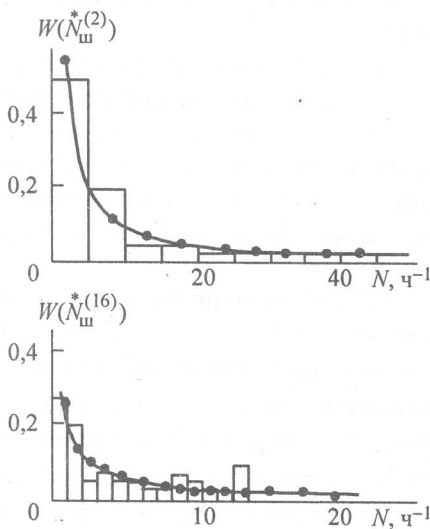


Рис.5. Законы распределения вероятности ИИП шумового фона

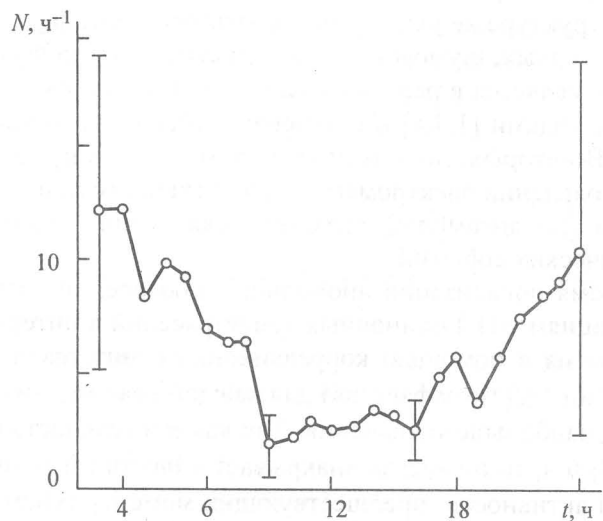


Рис. 6. Суточный ход медианных значений ИИП шумового фона

Для аппроксимации эмпирических законов распределения электромагнитной активности, относящихся к аномальным проявлениям и шумовому фону, использовались следующие модели: гамма-распределение и распределение Вейбулла [12]. Статистический анализ показал, что эмпирические распределения электромагнитного предвестника для рассматриваемых землетрясений, а

также шумового фона для летнего, весеннего, осеннего и зимнего периодов наблюдений наилучшим образом по критерию  $\chi$ -квадрат [9] описываются гамма-распределением вида

$$W(N^* | \alpha, \beta) = [\beta^{\alpha+1} \Gamma(\alpha+1)]^{-1} N^{\alpha} \exp(-N^*/\beta), \tag{2}$$

где  $N^*$  – частота следования электромагнитных импульсов;  $\Gamma(\cdot)$  – гамма-функция [13];  $\alpha, \beta$  – параметры распределения.

Для оценки параметров  $\alpha$  и  $\beta$  использован метод моментов [14]. Начальные моменты первого и второго порядков распределения (2) имеют вид

$$m_1 = (\alpha + 1)/\beta, \quad m_2 = (\alpha + 1)(\alpha + 1)/\beta^2. \tag{3}$$

Решая систему уравнений (3) относительно  $\alpha$  и  $\beta$ , получаем

$$\hat{\alpha} = \left( \frac{m_1^*}{\sigma^*} \right)^2 - 1, \quad \hat{\beta} = \frac{\sigma^{*2}}{m_1^*}, \tag{4}$$

где  $m_1^*, \sigma^*$  – оценки среднего, среднеквадратического значений эмпирического закона распределения электромагнитной активности, используемые вместо  $m_1$  и  $\sigma = \sqrt{m_2 - m_1^2}$ . Для эмпирических гистограмм, представленных на рис. 3, 5, соответствующие теоретические кривые гамма-распределения, рассчитанные из (2), изображены сплошными линиями.

Для зимнего периода наблюдений значения оценок параметров гамма-распределения для «сигнала» приведены в табл. 2, шумового фона – в табл. 3.

Таблица 2

Время развития аномалии $j$ , ч	1	2	3	4	5	6
$\hat{\alpha}_{\phi, c+\psi}$	0,61	0,73	0,28	1,08	2,13	0,44
$\hat{\beta}_{j, c+\psi}$	9,71	14,98	22,8	17,5	11,95	17,64

Таблица 3

Время суток $i$ , ч		$a$	1	2	3	4	5	6	
$\hat{\alpha}_{j, \psi}$		$b$	-0,59	-0,68	-0,58	-0,51	-0,65	-0,42	
$\hat{\beta}_{j, \psi}$		$v$	30,6	39,2	20,4	20,8	27,6	1,24	
$a$	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$b$	-0,50	-0,62	-0,59	-0,44	-0,75	-0,43	-0,62	-0,59	-0,46
$v$	12,87	17,6	4,83	4,08	12,93	4,7	7,3	9,5	4,9
$a$	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$b$	-0,35	-0,59	-0,54	-0,56	-0,54	-0,63	-0,66	-0,67	-0,63
$v$	7,58	14,97	8,86	13,4	15,7	23,3	27,3	33,04	22,3

Для различных сезонов параметры  $\hat{\alpha}_{j, c+\psi}, \hat{\beta}_{j, c+\psi}, \hat{\alpha}_{j, \psi}, \hat{\beta}_{j, \psi}$  изменяются в значительных пределах из-за наличия сезонного хода средних и среднеквадратических значений ИИП электромагнитного поля. Так, для зимнего и летнего периодов наблюдений параметры  $\hat{\alpha}_{j, \psi}$  и  $\hat{\beta}_{j, \psi}$  шумового фона различаются в 2 – 4 раза. Табулируя по изложенной выше методике значения этих параметров по экспериментальным данным для каждого сезона года, мы сводим решение задачи краткосрочного прогноза землетрясения в статистическом смысле к условиям априорной параметрической неопределенности [6].

Таким образом, для каждого сезона параметры  $\hat{\alpha}_{j, c+\psi}, \hat{\beta}_{j, c+\psi}$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, 6$ ) и  $\hat{\alpha}_{j, \psi}, \hat{\beta}_{j, \psi}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 24$ ) полностью определяют статистическую модель класса сигналов и шумов. Плот-

ности вероятности того, что измеренная последовательность  $\dot{N}_i = [\dot{N}_{i+1}^{(1)}, \dot{N}_{i+2}^{(2)}, \dots, \dot{N}_{i+6}^{(6)}]$  значений ИИП, полученная в моменты времени, принадлежит ансамблю аномальных проявлений электромагнитной активности при подготовке землетрясений (классу сигналов) и шумовому фону, соответственно равны

$$W_{c+ш}(\dot{N}_i) = \prod_{j=1}^6 W_{c+ш}(\dot{N}_{i+j} / \hat{\alpha}_{j,c+ш}, \hat{\beta}_{j,c+ш}); \quad (5)$$

$$W_{ш}(\dot{N}_i) = \prod_{j=1}^6 W_{ш}(\dot{N}_{i+j} / \hat{\alpha}_{i+j,ш}, \hat{\beta}_{i+j,ш}). \quad (6)$$

Здесь  $W(\dot{N}, \hat{\alpha}, \hat{\beta})$  – гамма-распределение, определяемое соотношением (2), параметры  $\hat{\alpha}$  и  $\hat{\beta}$  которого выбираются в соответствии с индексацией (5), (6);  $\Pi$  – знак произведения;  $i$  – время начала измерений ИИП в часовых интервалах. Индекс  $i+j$  образует последовательность целых чисел с периодом, равным 24, и соответствует текущему ( $j = 1, 2, 3, \dots, 6$ ) времени суток.

Для логарифма отношения правдоподобия [5] из (5), (6) получаем

$$\lambda_i = \ln W_c(\dot{N}_i) / W_{ш}(\dot{N}_i) = \sum_{j=1}^6 \lambda_i^{(j)} = \sum_{j=1}^6 \ln \frac{W_{c+ш}(\dot{N}_{i+j} / \hat{\alpha}_{j,c+ш}, \hat{\beta}_{j,c+ш})}{W_{ш}(\dot{N}_{i+j} / \hat{\alpha}_{i+j,ш}, \hat{\beta}_{i+j,ш})}. \quad (7)$$

Процедура вычисления  $\lambda_i$  из (7) на  $i$ -м шаге сводится, таким образом, к суммированию отношений правдоподобия  $\lambda_i^{(j)}$ , вычисляемых с использованием соответствующих одномерных законов распределения.

На следующем  $i+1$  шаге производится очередное измерение  $\dot{N}_{i+6+1}$  простым сдвигом на дискрет из  $\dot{N}_i$ , формируется новая последовательность  $\dot{N}_{i+1} = [\dot{N}_{i+2}^{(1)}, \dot{N}_{i+3}^{(2)}, \dots, \dot{N}_{i+7}^{(7)}]$ , для которой вычисляется отношение правдоподобия

$$\lambda_{i+1} = \sum_{j=1}^6 \ln \frac{W_{c+ш}(\dot{N}_{i+1+j} / \hat{\alpha}_{j,c+ш}, \hat{\beta}_{j,c+ш})}{W_{ш}(\dot{N}_{i+1+j} / \hat{\alpha}_{i+1+j,ш}, \hat{\beta}_{i+1+j,ш})},$$

и т.д.

На каждом шаге  $i$  вычисленное значение  $\lambda_i$  сравнивается с пороговым значением  $\lambda_0$ . Если  $\lambda_i > \lambda_0$ , то выносится решение, что через  $48 \pm 7$  ч произойдет сейсмическое событие. Напротив, если  $\lambda_i < \lambda_0$ , то принимается противоположное решение: сейсмическое событие в интервале времени  $[i + 48 - 7, i + 48 + 7]$  не произойдет.

При работе устройства, реализующего алгоритм (7), возможны ошибки двух родов: ложная тревога (в указанном интервале сейсмическое событие действительно не произойдет, хотя превышение порога  $\lambda_i$  будет зарегистрировано) и пропуск (значение  $\lambda_i$  оказывается ниже порога  $\lambda_0$ , а землетрясение произойдет).

Величина порога  $\lambda_0$  выбирается по критерию Пирсона при задании вероятности ложной тревоги  $P_{л.т}$ , либо по критерию идеального наблюдателя заданием вероятности обоих видов ошибок при выбранной функции их стоимости [5].

Для оценки эффективности предложенного статистического метода прогноза землетрясений по сравнению с детерминированной моделью были использованы те же данные зимнего периода наблюдений ИИП.

Результаты сопоставления статистического прогноза с коровыми сейсмическими событиями классов 9, 10, 11, эпицентры которых находились соответственно в радиусе 100, 300, 500 км, показали, что при вероятности ложных тревог  $P_{л.т} = 0,19$  вероятности правильного прогноза и пропуска землетрясений составляют соответственно  $P_{п.п} = 0,76$  и  $P_{пр} = 0,24$ . При использовании корреляционного приемника для  $P_{л.т} = 0,19$ ,  $P_{п.п} = 0,45$ , а  $P_{пр} = 0,55$ .

Изложенный в работе подход может быть использован также при решении задач прогноза по предвестникам в других геофизических полях.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А. и др. // Узб. геол. журн. – 1976. – № 2. – С.9–11.
2. Мовлянов Г. А. и др. // Узб. геол. журн. – 1979. – № 5. – С.11–15.
3. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М. А. Садовского. – М.: Наука, 1982. – С.82.
4. Воробьев А. А., Мастов Ш. Р., Рыбаков Б. С., Ковердяев А. В. / ТПУ. – Томск, 1981. – Деп. в ВИНТИ, № 1020.
5. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. – М.: ИЛ, 1963. – 340 с.
6. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический анализ при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. – М.: Сов. радио, 1977. – С.432
7. Малышков Ю. П., Джумабаев К. Б. // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 1. – С.97–103.
8. Мастов Ш. Р., Рыбаков Б. С., Грузина Э. Э. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1986. – № 5. – С.72–75.
9. Александров М. С. и др. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. – М.: Наука, 1972. – С.195.
10. Мастов Ш. Р., Рыбаков Б. С. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1990. – № 7. – С.70–75.
11. Ремезов Л. Т. Естественные радиопомехи. – М.: Наука, 1985. – С.200.
12. Горяинов В. Т., Журавлев А. Г., Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / Под ред. В. И. Тихонова. – М.: Сов. радио, 1980.
13. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.
14. Пугачев В. С. Теория вероятности и математическая статистика. – М.: Наука, 1976. – 196 с.