

УДК 550.343

## ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕДЕНИИ РЫБ И НАСЕКОМЫХ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА ГАРМСКОМ ПОЛИГОНЕ

© 2004 г. А. В. Дещеревский, А. Я. Сидорин

Представлено академиком В.Н. Страховым 29.12.2003 г.

Поступило 25.03.2004 г.

Анализировались временные ряды данных о вариациях электрической активности (ЭА) четырех нильских слоников *Gnathonemus leopoldianus* и двигательной активности (ДА) двух сомиков *Norlosternum thogacatum* и двух групп колумбийских тараканов *Blaberus scaniifer*. Наблюдения проводили на Гармском геофизическом полигоне в рамках эксперимента по поиску возможных предвестников землетрясений [1, 2]. В течение нескольких лет автоматическая система регистрации непрерывно фиксировала проявления ЭА и ДА. Для обработки использовали средние за час значения ЭА и ДА. На основе шести исходных рядов ЭА и ДА рассчитывали около 100 различных параметров, характеризующих различные изменения в структуре ЭА и ДА: амплитуду сигнала и флуктуаций активности, параметры суточной ритмики, согласованные изменения активности различных биоиндикаторов и другие. Детальный анализ статистической структуры всей совокупности полученных параметрических рядов показал, что поведение всех животных отличается большой изменчивостью во времени. Все рассчитанные параметры нестабильны, подвержены частым изменениям. Сопоставление с сейсмичностью показало, что перед наиболее близкими землетрясениями (гипоцентральное расстояние сопоставимо с размером очага) увеличивается вероятность перестроек в динамике рассчитанных параметров, однако сами по себе эти перестройки не отличаются от аналогичных перестроек в структуре этих рядов, происходящих вне связи с сейсмичностью.

Использованные методики наблюдений и регистрации ЭА нильских слоников описаны в работах [3–5], ДА сомиков – в работе [6], ДА тараканов – в работе [7]. Общее описание эксперимента можно найти в работе [1]. Исходные временные ряды ЭА нильских слоников приведены в [4–5], примеры рядов ДА других животных

представлены на рис.1. Информация о рядах приведена в табл. 1.

Предварительный анализ результатов наблюдений показал, что для всех наблюдаемых рядов характерна исключительно сложная статистическая структура, в основе которой лежат процессы, аналогичные фликкер-шуму, с наложенной суточной и менее сильными сезонной и околосуточной вариациями, перманентными изменениями всех свойств и особенностей как самих рядов, так и параметров выделяемых ритмов [4, 5]. Поэтому использование только исходных рядов ЭА и ДА для сопоставления с сейсмичностью представляется недостаточным.

В настоящей работе рассмотрен следующий набор параметров, отражающих динамику изменений различных элементов структуры ЭА и ДА во времени: 1) исходные ряды ЭА и ДА, ряды логарифмов ЭА и ДА, а также исходные ряды и ряды логарифмов с исключенными трендовой и суточной компонентами; 2) ряды, характеризующие амплитуду высокочастотных флуктуаций ЭА и ДА; 3) ряды, характеризующие структуру суточной ритмики каждого биоиндикатора: амплитуду (АСХ) и устойчивость (УСХ) суточного хода, ряды акрофаз минимальной и максимальной ЭА и ДА за сутки и др.; 4) индексы кооперативного поведения одноименных биоиндикаторов, наблюдавшихся одновременно: коэффициенты корреляции и регрессии, согласованный сигнал и сигнал раскомпенсации.

Все перечисленные параметры рассчитывали в скользящем окне шириной 168 ч. АСХ и УСХ оценивали двумя способами: сравнением с эталонной суточной вариацией, оцененной методом наложения эпох по всему ряду, и независимой оценкой суточного ритма для каждого положения скользящего окна. Подробное описание методики расчета приведено в [8].

Землетрясения для анализа отбирали из полного каталога землетрясений Гармского полигона [1] по принципу наибольшей величины отношения линейного размера  $L$  очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию  $R$ . Из каталога

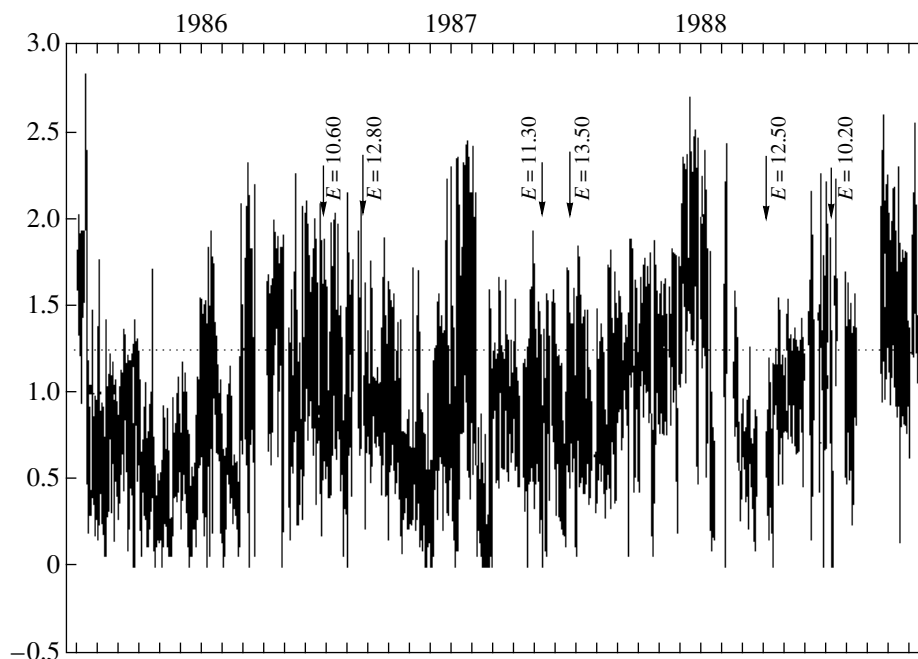


Рис. 1. Вариации ДА, сомик 3.

были выбраны все произошедшие на полигоне землетрясения, для которых отношение  $\frac{L}{R}$  превосходило 0.11, что примерно соответствует критерию ощутимого землетрясения. Отметим, что для землетрясений с  $\frac{L}{R} < 0.11$  можно достаточно уверенно говорить об отсутствии статистически значимой корреляции между аномальными изменениями в поведении животных и землетрясениями.

Расстояние  $R$  определялось с учетом глубины гипоцентра; размер очага рассчитывали по формуле  $\lg L = 0.44 M - 1.29$ , где  $M$  – магнитуда землетрясения [9]. Переход от  $K$  к  $M$  осуществлялся по корреляционному соотношению  $K = 1.5M + 4.8$

[10]. Всего в выборку попало 17 сейсмических событий, в число которых, в частности, вошли сильнейшие за период наблюдений события, произошедшие в пределах полигона 26 февраля и 6 апреля 1983 г. (энергетический класс  $K = 13.3$  и  $13.9$ , гипоцентральные расстояния  $R = 22$  и  $120$  км), Джиргатальское землетрясение 26 октября 1984 г. ( $K = 15.3$ ,  $R = 108$  км), землетрясение 21 декабря 1987 г. ( $K = 13.5$ ,  $R = 53$  км). Землетрясение 26 апреля 1991 г. ( $K = 13.5$ ,  $R = 67$  км), также относящееся к числу сильнейших, пришлось на перерыв в наблюдениях. В выборку попали также некоторые более слабые землетрясения, произошедшие в непосредственной близости от пункта наблюдений, например событие 12 ноября 1987 г., которое произошло практически точно в пункте наблюдений ( $K = 11.3$ ,  $R = 8$  км).

Таблица 1. Имеющиеся в базе данных исходные ряды бионаблюдений

Ряд	Описание в БД	Период наблюдений	Длина, ч
SLON0S1	Слоник 0, 1981–1982 г.	1981 : 03 : 05–1982 : 03 : 10	8904
SLON1B1	Слоник 1, 1983–1985 г.	1983 : 01 : 01–1985 : 02 : 25	18888
SLON2M1	Слоник 2, 1983–1985 г.	1983 : 01 : 01–1985 : 08 : 16	23011
SLON2M1	Слоник 2, 1985–1986 г.	1985 : 08 : 23–1986 : 10 : 25	10295
TAR1	Тараканы, 1-й канал, 1987–1991 г.	1987 : 03 : 03–1992 : 03 : 03	43872
TAR2	Тараканы, 2-й канал, 1987–1991 г.	1987 : 02 : 22–1992 : 03 : 03	44088
SOM3	Сомики, 3-й канал, 1986–1988 г.	1986 : 01 : 01–1992 : 03 : 03	54096
SOM4	Сомики, 4-й канал, 1987–1989 г.	1987 : 02 : 22–1992 : 03 : 03	44088

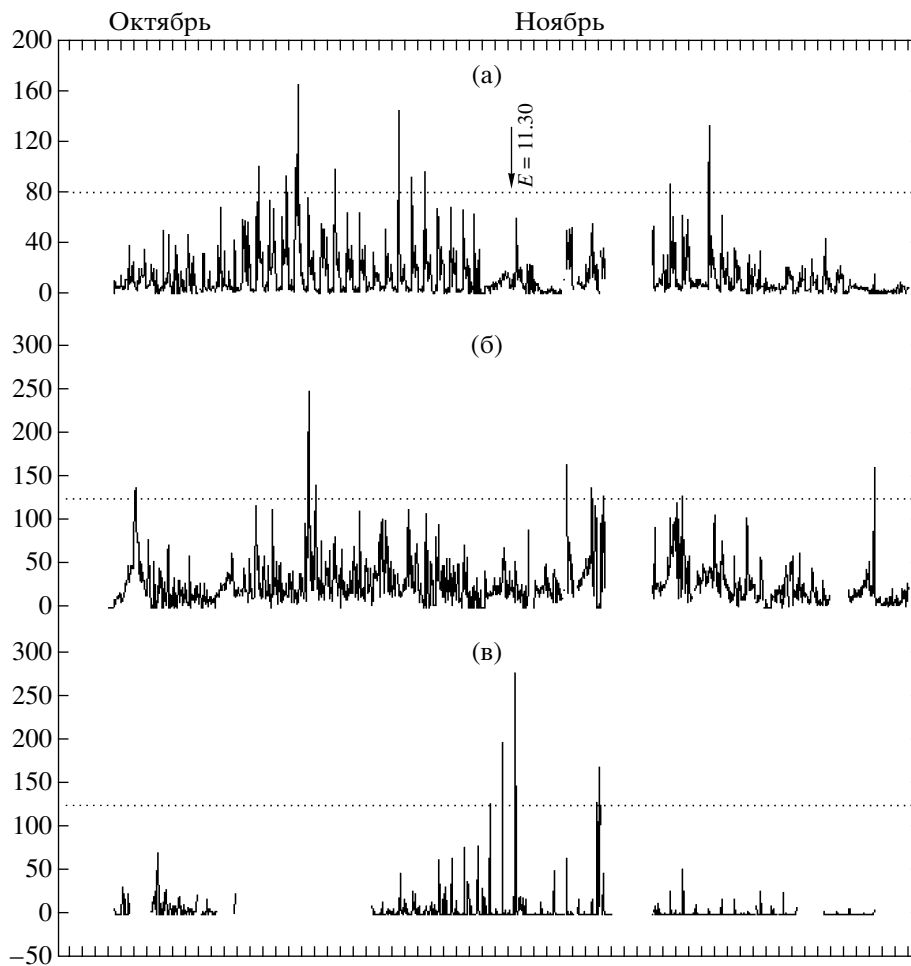


Рис. 2. Вариации ДА сомик 3 (а) и 4 (б) и таракана 2 (в) в момент землетрясения 12.11.1987.

Всего было 28 случаев, когда ДА и ЭА регистрировали непосредственно в момент землетрясения или незадолго до/после события. В 12 из этих случаев наблюдения практически не содержали пропусков, что позволяет применить для анализа различные методы статистической обработки.

Беглый визуальный просмотр исходных рядов ЭА и ДА и рассчитанных индексов показывает, что никаких исключительных изменений в структуре рядов перед землетрясениями обычно не происходило. С другой стороны, все характеристики рядов ЭА и ДА постоянно меняются во времени.

В зависимости от того, какие именно изменения называть заметными, их частота меняется от нескольких случаев в год до 1–2 изменений в неделю. Понятно, что при случайном наложении сейсмического процесса некоторые из этих изменений неизбежно совпадают (совпадут по времени) с землетрясениями. Поэтому поиск возможного влияния сейсмического процесса на активность биоиндикаторов проводили следующим образом.

Прежде всего исходные ряды и ряды рассчитанных индексов анализировали с точки зрения наличия изменений, или перестроек, структуры ряда. Под перестройкой понималось любое визуально выделяемое изменение структуры ряда или какого-то индекса, например, резкое изменение амплитуды вариаций или дисперсии ряда, исчезновение или появление суточного ритма и т.п.

Все изменения подразделяли на два типа: резкое изменение структуры ряда, сразу бросающееся в глаза, и менее заметная перестройка структуры ряда. К первому типу относится, например, резкое исчезновение суточного хода 09.11.1987 у сомика 3 (рис.2), а ко второму – уменьшение дисперсии 10.11.1987 у сомика 4. Понятно, что подобный метод выделения “аномалий” достаточно субъективен, однако на этапе разведочного анализа вряд ли можно предложить что-то лучшее.

Для каждого индекса подсчитывали общее количество аномалий в поведении биоиндикаторов, а затем рассчитывали средний интервал времени между ними и суммарную продолжительность пе-

**Таблица 2.** Число перестроек в структуре исходных рядов активности биоиндикаторов и вероятность их совпадения с землетрясениями

Ряд	Длина качествен. наблюдений, сут	Число перестроек		Длина “аномальных” периодов, сут		N	Число совпадений	
							ожидаемые	фактические
SLON1	139	4	12	8	50	1	0.4	0
SLON2	604	1	19	6	72	6	0.8	1
SLON3	713	2	22	9	110	6	1.0	0
SLON4	393	2	16	12	95	1	0.3	0
TAR1	312		16		90	1	0.3	0
TAR2	447		15		120	4	1.1	2
SOM3	875	17	30	37	90	5	0.7	2
SOM4	580	13	15	30	90	4	0.8	2
Всего	4062	39	145	102	697	28	5	7

Примечания. В правом столбце числа перестроек приведено общее число выделенных перестроек, в левом – наиболее заметных, или “резких”; N – число землетрясений в выборке, пришедшихся на период качественных данных наблюдений.

риодов “необычного” поведения. В случае, когда перестройка представляла собой переход из одного квазистационарного состояния в другое, за продолжительность аномалии принимали продолжительность переходного процесса.

После выделения аномалий на график накладывали моменты землетрясений и оценивали количество событий, сопровождавшихся изменениями в поведении животных. Проверялась гипотеза, что в моменты землетрясений и непосредственно перед ними перестройки структуры ряда происходят так же часто, как и в другое время.

Результаты применения указанного алгоритма к исходным рядам ЭА и ДА приведены в табл. 2. При всей условности приведенных оценок можно заметить, что количество землетрясений, сопровождавшихся перестройкой в структуре рядов, примерно соответствует ожидаемому (разница примерно на  $\sigma$ ). Однако если рассматривать только наиболее близкие землетрясения, для которых отношение  $\frac{L}{R} > 0.20$ , то картина меняется. В этом

случае ожидаемое количество совпадений землетрясений с перестройками поведения животных равно 1.7, реально же наблюдается 4 совпадения. Три из этих 4 случаев относятся к событию 12.11.1987, когда проводили наблюдения за двумя экземплярами сомиков и за одной группой тараканов, и один – к событию 26.02.1983, когда наблюдали за двумя экземплярами слоников.

Отметим, что заметные перестройки в структуре ДА перед событием 12.11.1987 отмечены по всем трем каналам регистрации, работавшим в этот период. У группы тараканов это проявилось в нарастании амплитуды суточного ритма активности, продолжавшемся в течение 3 сут перед землетрясением. После землетрясения суточный

ритм активности пропадает. Картина изменений (рис. 2) довольно яркая, но не беспрецедентная: подобные изменения амплитуды суточного ритма, а также исчезновение суточной вариации происходили у тараканов за период наблюдений неоднократно (в среднем 1–2 раза в год).

У сомиков изменения в структуре ДА перед землетрясением 12.11.1987 проявляются в исчезновении суточного ритма, которое произошло примерно за 2–3 сут до землетрясения. В случае сомика 3 это исчезновение достаточно яркое: четкий суточный ритм внезапно исчезает, и в течение последних 2 сут перед землетрясением обычный суточный максимум активности не фиксируется вовсе. Через несколько часов после землетрясения фиксируется всплеск активности, однако время максимума смещено с обычных 9 ч на 15 ч (время по Гринвичу). Отметим, что подобное резкое исчезновение суточного ритма у данного экземпляра рыбы обычно отмечается не чаще 1–2 раз в год. В случае сомика 4 динамика изменений ДА похожа, но суточный ритм в предыдущий период выражен нечетко. Для данного экземпляра рыбы наблюдаемую перестройку структуры ДА можно идентифицировать как вполне рядовую.

Анализ других параметров ЭА и ДА и всех перечисленных выше индексов активности выполнялся по аналогичной методике. Результаты при этом получаются близкими к только что описаным. Однако статистика событий в этом случае заметно беднее – всего 12 эпизодов.

Можно также отметить, что перестройки структуры рядов в равной степени выявляются при анализе как исходных серий, так и параметрических рядов. Изначально предполагалось, что ряды скользящей дисперсии, параметров суточной ритмики и коллективных эффектов будут ак-

центрировать отдельные элементы структуры вариаций ЭА и ДА, что упростит последующий анализ и сделает его более наглядным. Однако этого не произошло, что связано с достаточно сильным осреднением параметрических рядов. Все расчеты проводили в недельном окне, в результате наиболее ярко выявляются процессы с характерной продолжительностью месяц и более. Изменения в поведении биоиндикаторов, которые предположительно могут быть связаны с землетрясениями, имеют существенно меньшую продолжительность. Они проявляются на параметрических рядах примерно с той же степенью достоверности, что и на исходных сериях.

В целом по результатам анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Структура вариаций исследованных параметров – это фликкер-шум или даже еще более сложный процесс с постоянными изменениями его характеристик. Для доказательства причинно-следственной связи особенностей подобных рядов с сейсмичностью необходима значительная статистика.

2. Подсчет статистики перестроек в структуре рядов ЭА и ДА указывает на повышение их частоты в последние часы–сутки перед землетрясением, если гипоцентральное расстояние сопоставимо с размерами очага. Достаточно яркие аномалии в поведении сомов и тараканов – изменения амплитуды вариаций активности, нарушения суточной ритмики, рост рассогласования между динамикой активности биоиндикаторов одного вида – наблюдались в одном случае, перед событием 12.11.1987, произошедшим на гипоцентральном расстоянии 8 км от пункта наблюдений, т.е. животные фактически находились в пределах очаговой зоны.

3. Наблюдаемые перед землетрясениями изменения не имеют каких-то специфических призна-

ков, они вполне соответствуют изменениям, наблюдающимся перманентно вне связи с землетрясениями.

4. Активность отдельных особей имеет индивидуальные особенности, что затрудняет практическое использование биологического мониторинга.

5. Сделанные выводы не следует абсолютизировать и распространять на все случаи наблюдений за животными, поскольку в рассматриваемом эксперименте животные содержались в лабораторных условиях и могли быть “экранированы” от воздействия стимулов некоторых модальностей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту 01–05–65503.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гармский геофизический полигон / Под ред. А.Я. Сидорина. М.: ИФЗ АН СССР, 1990. 240 с.
2. Автоматизированная обработка данных на Гармском полигоне / Под ред. А.Я. Сидорина. М.: ИФЗ АН СССР. 216 с.
3. Боровиков А.Г., Сидорин А.Я. // Сейсмические приборы. 1986. В. 18. С. 30–34.
4. Децеровский А.В., Сидорин А.Я. // ДАН. 2003. Т. 392. № 3. С. 392–396.
5. Децеровский А.В., Сидорин А.Я. // ДАН. 2003. Т. 392. № 6. С. 842–846.
6. Саблин-Яворский А.Д., Сидорин А.Я. // Сейсм. приборы. 1991. В. 22. С. 157–160.
7. Сидорин А.Я. // Сейсм. приборы. 2002. В. 38. С. 30–37.
8. Децеровский А.В., Сидорин А.Я. В сб.: Моделирование геофизических процессов. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 137–155.
9. Ризниченко Ю.В. / В кн.: Исследования по физике очага землетрясений. М.: Наука, 1967. С. 9–27.
10. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 670 с.