

ПАРАМЕТРЫ НЕЛИНЕЙНОГО РАЗВИТИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

А.И. Малышев

С конца XIX века предпринимаются попытки выявления эмпирических закономерностей, которым подчиняется развитие форшоковых и афтершоковых последовательностей разрушительных землетрясений. Наибольшую известность в этом плане получила последовательность Омори для частоты афтершоковых толчков. В конце 80-х годов [Малышев, 1991] эта и ей подобные закономерности были обобщены в виде уравнения динамики саморазвивающихся природных процессов (далее — уравнение СРП).

Это уравнение рассматривается в качестве математической модели, которая используется в данной работе при исследовании нелинейности развития сейсмических последовательностей во времени. Уравнение СРП представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = k \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^\lambda - \left(\frac{dx}{dt} \right)_0^{\lambda/\lambda} \right] \quad (1),$$

Здесь параметр x — любая неубывающая количественная характеристика, естественным образом отражающая развитие процесса; k — коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и α определяют нелинейность развития процесса соответственно в окрестностях

стационарного состояния $\left(\frac{dx}{dt} \right) \cong \left(\frac{dx}{dt} \right)_0$ и на

значительном от него удалении

$$\left(\frac{dx}{dt} \right) \gg \left(\frac{dx}{dt} \right)_0.$$

Эмпирическое обоснование вышеприведенного уравнения может быть легко получено в результате двукратного дифференцирования временных рядов землетрясений и последующего построения эмпирической зависимости

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = F \left(\frac{dx}{dt} \right).$$

На рис. 1 показан типичный вид

этой зависимости. Для нее характерно наличие двух асимптот — наклонной и вертикальной. Вертикальная асимптота соответствует скорости развития процесса в стационарном состоянии, тогда как наклонная — взаимозависимости между скоростью и ускорением развития процесса при значительных отклонениях от стационарного состояния. Показатель степени β определяет тангенс угла наклона наклонной асимптоты, коэффициент k — ее смещение, а показатель степени λ определяет поведение процесса в районе сопряжения асимптот.

Всплески сейсмической активности соответствуют значительным отклонениям сейсмичности от фонового уровня. Поэтому изучение закономерностей сейсмического режима логично начать с исследований динамики значительных отклонений процесса от стационарного состояния, что соответствует случаю

Рис. 1. Типичный результат обработки данных (сглаживание и последующее дифференцирование) числа толчков в афтершоковой последовательности.

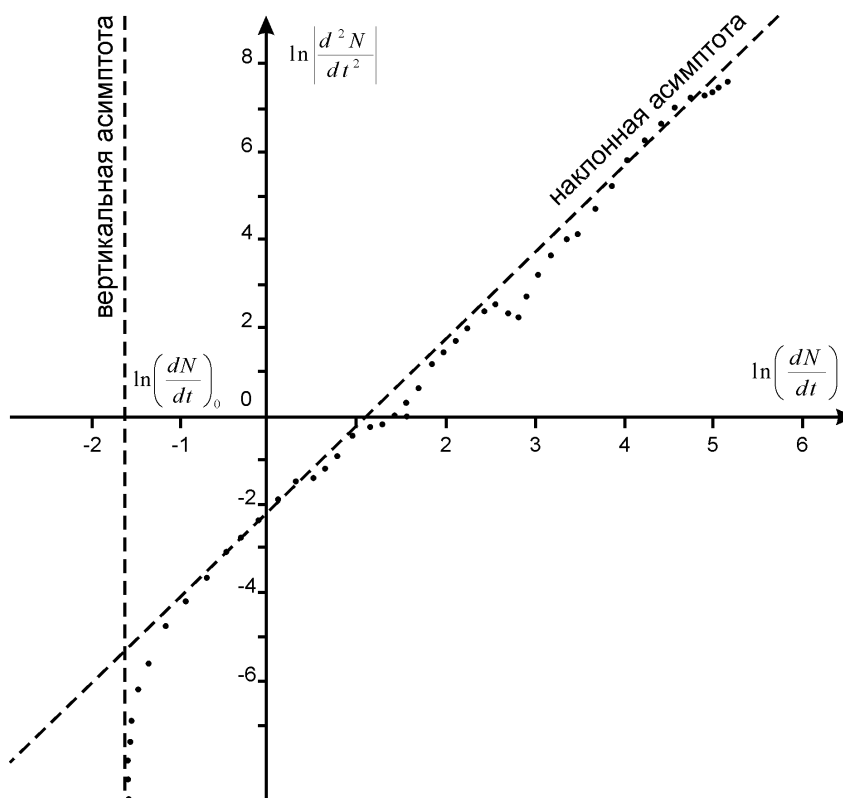
$\left(\frac{dx}{dt}\right) \gg \left(\frac{dx}{dt}\right)_0$. В этом случае уравнение динамики саморазвивающихся процессов упрощается до вида

$$\frac{d^2x}{dt^2} = k \left(\frac{dx}{dt}\right)^\alpha \quad (2).$$

Использование математического моделирования на базе уравнения СРП делает возможным постановку и решение следующих задач: 1) выявление и изучение динамики развития форшок-афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений региона методами математического моделирования; 2) оценка перспектив и разработка рекомендаций по возможному использованию выявленных закономерностей для прогноза сильнейших землетрясений.

Конечными результатами этих исследований могут быть выявление фундаментальных законов динамики развития сейсмических последовательностей и разработка методики краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений.

В ходе проведения исследований анализировалось изменение во времени трех различ-



ных характеристик сейсмического процесса — суммарное количество толчков (N), условные деформации (D) и суммарная энергия сейсмических событий (E). Для всех этих параметров были определены количественные характеристики дифференциального уравнения 2. Данные по количественным характеристикам этого уравнения приведены в таблицах 1 и 2, а их вариации иллюстрируют рис. 2 и 3.

Для выявления закона нелинейности развития сейсмического процесса было проведено двукратное сканирование 9 сейсмических

Таблица 1

Значения и вариации показателя нелинейности α

Параметр (тип последовательности)	Количество последовательностей	Модальное значение параметра α	Погрешность определения	Диапазон повышенной вероятности	Эмпирическая плотность вероятности
N (активизация)	2356	1.925	0.025	1.449 – 2.245	5.903
D (активизация)	2224	1.750	0.025	1.104 – 2.133	3.791
E (активизация)	2054	1.300	0.025	0.751 – 1.815	3.596
N (затухание)	3837	1.975	0.025	1.570 – 2.209	8.036
D (затухание)	3440	1.875	0.025	1.383 – 2.164	5.949
E (затухание)	3696	1.700	0.025	1.034 – 2.032	4.465

Значения и вариации десятичного порядка коэффициента нелинейности k

Параметр (тип последовательности)	Количество последовательностей	Модальное значение $\lg k $	Погрешность определения	Диапазон повышенной вероятности	Эмпирическая плотность вероятности
N (активизация)	2356	-1.00	± 0.20	$-2.00 \div -0.07$	11.162
D (активизация)	2224	-4.40	± 0.20	$-6.14 \div -2.78$	5.243
E (активизация)	2054	-4.20	± 0.20	$-5.79 \div -2.13$	4.865
N (затухание)	3837	-0.80	± 0.20	$-2.22 \div -0.04$	8.979
D (затухание)	3440	-5.20	± 0.20	$-6.53 \div -3.13$	4.677
E (затухание)	3696	-7.00	± 0.20	$-9.62 \div -5.26$	3.403

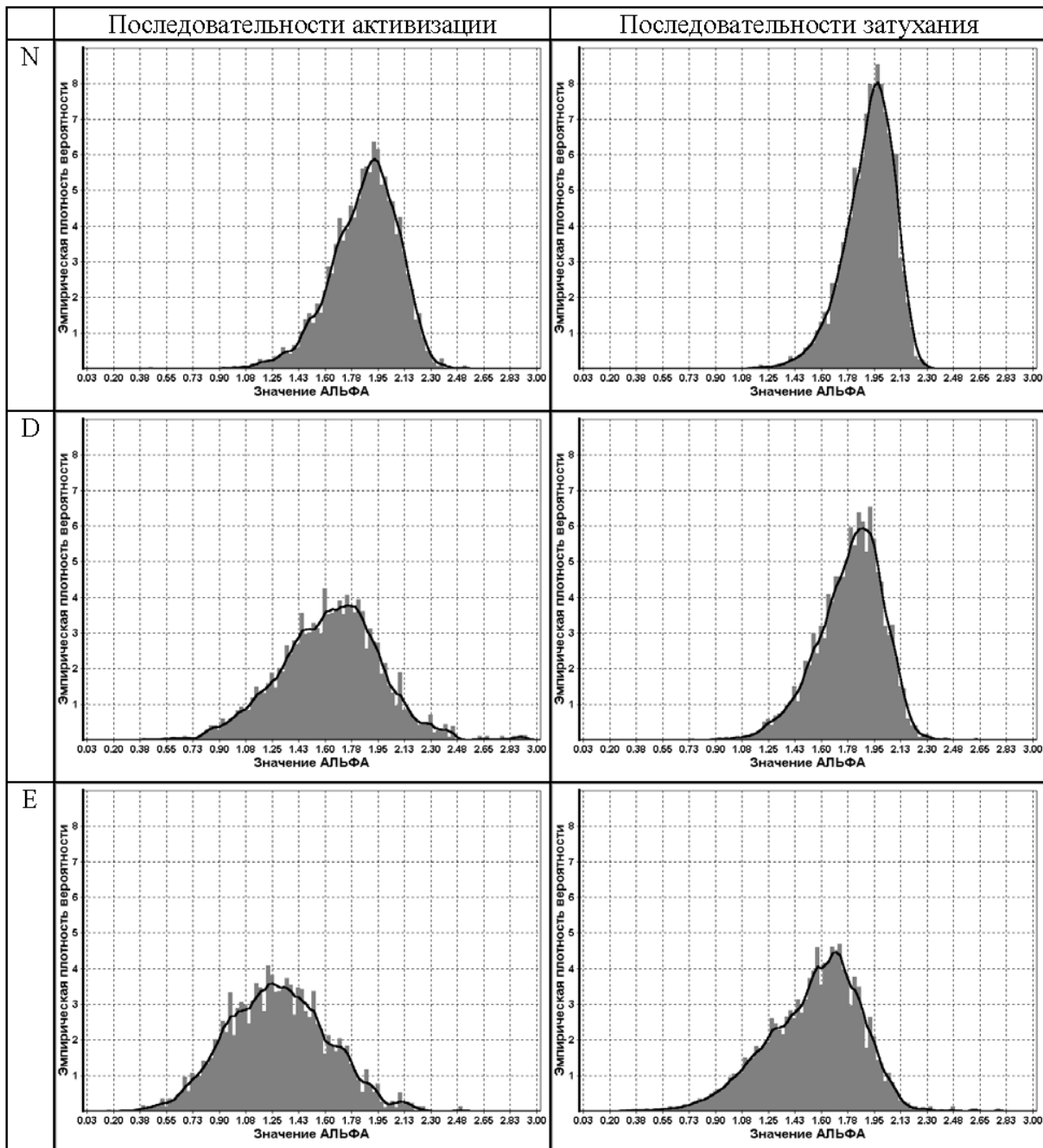


Рис. 2. Распределения значений показателя нелинейности α .

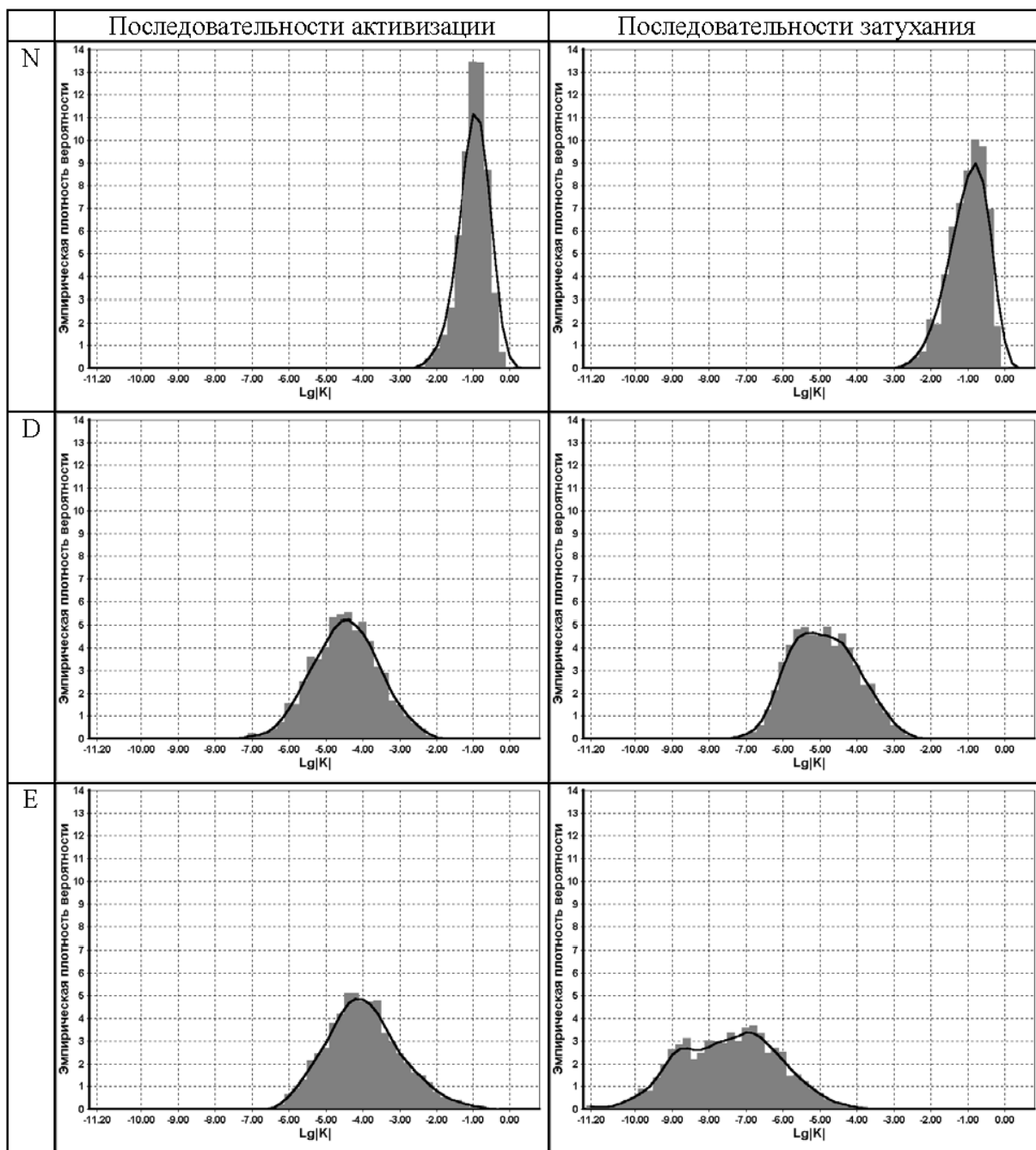


Рис. 3. Распределения значений десятичного порядка коэффициента нелинейности k .

каталогов, включающих данные о 1.5 млн землетрясений, на предмет выявления наилучших последовательностей затухания и активизации сейсмической активности, прослеживаемых в количестве сейсмических толчков, условных деформациях, и энергии сейсмических толчков. Наличие предваряющей последовательности активизации или последующего затухания определялось для каждого толчка в каталоге. Ска-

нирование проводилось в гипоцентральных радиусах от 3 до 400 км с логарифмическим шагом их увеличения. Из-за больших объемов вычислений на первом этапе размер последовательности ограничивался 750 событиями, тогда как на втором был увеличен до 25 тысяч событий. В общей сложности по всем анализируемым параметрам было выявлено 17607 последовательностей. Набор статистики позволил

определить наиболее часто встречающиеся значения параметров нелинейности (показателя a и коэффициента k) в указанном выше уравнении. Приведенный в таблицах 1, 2 диапазон повышенной вероятности определялся по превышению порогового уровня для эмпирической плотности вероятности, соответствующего значению 1 (см. рис. 2 и 3).

Как следует из полученных данных, количественные характеристики уравнения 2 имеют в своих распределениях четко выраженные максимумы для всех рассматривавшихся параметров, характерные как для последовательностей активизации сейсмичности, так и для последовательностей ее затухания. Все это позволяет рассматривать уравнение 2 в качестве фундаментального закона нелинейного развития

сейсмической активности во времени. Закон характеризует развитие сейсмического при значительных отклонениях от стационарного развития и может быть полезен при разработке методики краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений.

Работа выполнена при поддержке по Программе № 13 фундаментальных исследований Президиума РАН "Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы"

Список литературы

Мальшев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61-72.