

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ОЖИДАЕМОГО СИЛЬНОГО ЦУНАМИГЕННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Диденко А.О.

Научный руководитель – д-р. техн. наук, профессор Симонов К.В.

Сибирский федеральный университет

Работа посвящена исследованию математических моделей для описания процессов развития катастроф сейсмической природы. Разработка вычислительной технологии оценки параметров ожидаемого сильного цунамигенного землетрясения является актуальной задачей.

Алгоритмическая схема на первом этапе включает выделение области подготовки сильного цунамигенного землетрясения. Критерием для такого выделения служат признаки, характеризующие общий повышенный фон значений ряда предвестников, которые регистрируются на основе организованной в исследуемой области системы сейсмического мониторинга. Выполняется разделение регистрируемых сейсмических событий в анализируемой пространственно-временной последовательности на высокоэнергетические и низкоэнергетические уровни, характеризующие состояние изучаемой среды и определяющие условия возникновения сейсмической катастрофы.

В результате выделяется сейсмоактивная очаговая область L (сейсмическая система), характеризующая определенный объем среды V , который включает землетрясения наблюдаемой последовательности в диапазоне магнитуд: $M_{\min} < M < M_{\max}$. При этом сейсмические события в интервале $M_{\min} < M < M^*$ определяют особенности сейсмического процесса (землетрясения-индикаторы), а магнитуды в интервале $M^* < M < M_{\max}$ – представляют прогнозируемые сильные землетрясения, где M^* – некоторая пороговая магнитуда.

Далее для выделенной очаговой области осуществляется оценка стадий процесса подготовки сильнейшего землетрясения. Процессы развития сейсмической катастрофы описываются в терминах определенной модели, когда состояние катастрофы в момент времени i определяется вероятностью p продолжения развития катастрофы и ее состоянием в момент $(i-1)$.

Показывается, что модели развития сейсмического процесса, соответствующие схемам кумулятивного (1) и мультипликативного (2) типов, представляют собой функции перехода системы из состояния $(i-1)$ в состояние i и позволяют генерировать эмпирические распределения, присущие различным стадиям развития процесса.

$$X_{i+1} = X_i + \alpha, \quad (1)$$

$$X_{i+1} = (1 + k)X_i. \quad (2)$$

В ходе работы построены модели, предназначенные для статистического анализа данных. Эмпирические распределения, типичные для катастроф сейсмической природы, моделируются схемами кумулятивного и мультипликативного типа, а также комбинацией этих двух типов (3):

$$X_{i+1} = \varphi_1(X_i + a) + \varphi_2(1 + k)X_i. \quad (3)$$

Показана информативность описания механизмов развития и определения стадии процесса этими моделями.

На следующем этапе анализа рассматривается «энергетический» подход описания очаговой области подготовки сильного цунамигенного землетрясения, основанный на параметризации энергетической характеристики изучаемого сейсмического процесса.

Пусть $T = t_m - t_0$ – временной интервал наблюдения сейсмического процесса, где t_0 – начальная дата, t_m – текущий момент времени. Для моделирования процесса выбирается шаг по времени Δt . Полагаем, что за время T завершился j сейсмический цикл, $j = 1, 2, \dots, N$. Тогда состояние сейсмической системы внутри сейсмического цикла в период $t_{c_{j-1}} < t < t_{c_j}$ можно описать кумулятивными энергетическими параметрами среды E_c и S_c , которые определяются по следующим соотношениям (Акопян С. Ц., 1995):

$$E_c(t) = \sum_{i=1}^{Nt} E_i, \quad (4)$$

$$S_c(E_c, t) = (t - t_{c_{j-1}}) \cdot E_c - \sum_{i=1}^{Nt} (t - t_{c_{j-1}}) \cdot E_i, \quad (5)$$

где E_i – сейсмическая энергия от землетрясений исследуемой последовательности, суммирование ведется по всем сейсмическим событиям пространственно-временной последовательности с магнитудами $M_{min} < M(t) < M^*$ внутри сейсмического цикла к моменту времени t . В соотношении (5) S_c имеет смысл функции плотности состояний для наблюдаемой сейсмической области.

По аналогии с определением физической энтропии в термодинамике, величина W_c определяется как энтропия очаговой области:

$$W_c = \lg S_c = \lg \{ E_c \cdot T_c - \sum E_i \cdot T_i \}, \quad (6)$$

Функция S_c является неубывающей и имеет размерность (энергия*время), энтропия W_c – имеет размерность десятичного логарифма этой величины.

Сейсмическая область является открытой диссипативной системой, которая обменивается с окружающей средой энергией, массой и теплом. Изменение энтропии открытой системы складывается из двух частей:

$$dW = d_i W + d_e W. \quad (7)$$

На основе экспериментальных исследований сейсмоактивной области можно количественно описать закономерности, которые позволяют оценить динамическое производство сейсмической энтропии на макроскопическом уровне. Для однородных сейсмотектонических зон этот закон имеет вид (по аналогии с законом Гутенберга-Рихтера):

$$S \ln 10 \left\{ \frac{d_i W}{dt} \Big|_{E_c + \Delta E} - \frac{d_i W}{dt} \Big|_{E_c = const} \right\} = 10^{aW+b}, \quad W \geq W_{min}, \quad (8)$$

где a, b – константы, определяемые методом наименьших квадратов на основе завершившихся наблюдаемых сейсмических циклов.

Если ΔT выбрать равным шагу по времени и времени вспарывания в очаге сильного землетрясения $\Delta T = \delta t = \tau$, то $\Delta E = E_s$ и соотношение (8) можно записать в виде:

$$E_s = 10^{aW+b} = \beta S^\alpha, \quad \beta = 10^b, \quad (9)$$

где E_s – сейсмическая энергия от сильного землетрясения. Константу b можно определить из условия $b=K_0-aW_{min}$, где $K_0=lgE_0=\alpha+\gamma M_0$ – энергетический класс порогового землетрясения. Тогда можно записать:

$$E_s = E_0 \cdot 10^{a(W+W_{min})}, \quad W \geq W_{min}. \quad (10)$$

Константа a характеризует сеймотектонические свойства разломов в очаговой области и для оценки требует детальных сейсмогеологических исследований. Следовательно, для каждого завершившегося сейсмического цикла c_j , при $j = 1, 2, \dots, N$, на основе наблюдаемой сейсмической последовательности (землетрясений-индикаторов) в «медленной шкале времени» рассчитываются 4 параметра:

$$E_{c_j}, \quad S_{c_j}, \quad K_{c_j} = lg E_{c_j}, \quad W_{c_j} = lg S_{c_j}, \quad (11)$$

а в «быстрой шкале времени» два параметра (энергия и класс сильных землетрясений): $E_{s_j}, K_{s_j} = lg E_{s_j}$.

На основе этих вычислений строятся графики накопления энтропии для высокоэнергетических и низкоэнергетических уровней рассматриваемой пространственно-временной последовательности и находится разница dW , которую с помощью цепочки уравнений можно преобразовать в разницу по магнитуде и тем самым получить интервал, в пределах которого находится магнитуда ожидаемого землетрясения (см. рис.1).

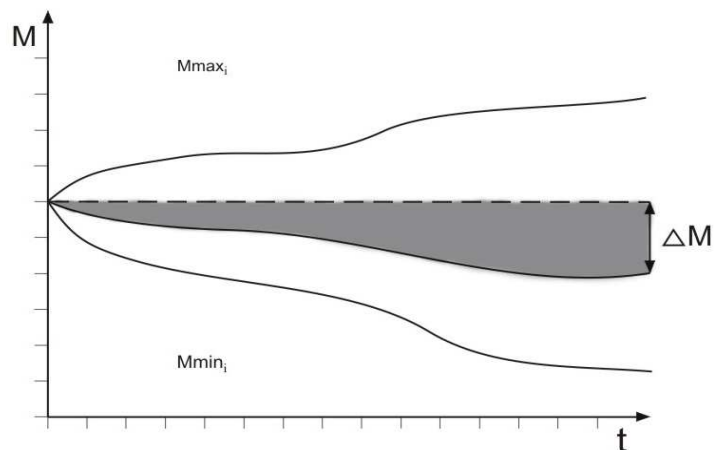


Рисунок 1 – Графики накопления энтропии для высокоэнергетических и низкоэнергетических уровней рассматриваемой пространственно-временной последовательности

Также найдена линейная зависимость между энергетической характеристикой процесса и энергетическим классом (см. рис. 2). Таким образом, с помощью предложенного подхода на основе специального анализа данных сейсмического мониторинга изучаемого процесса оценивается магнитуда ожидаемого сильнейшего землетрясения.

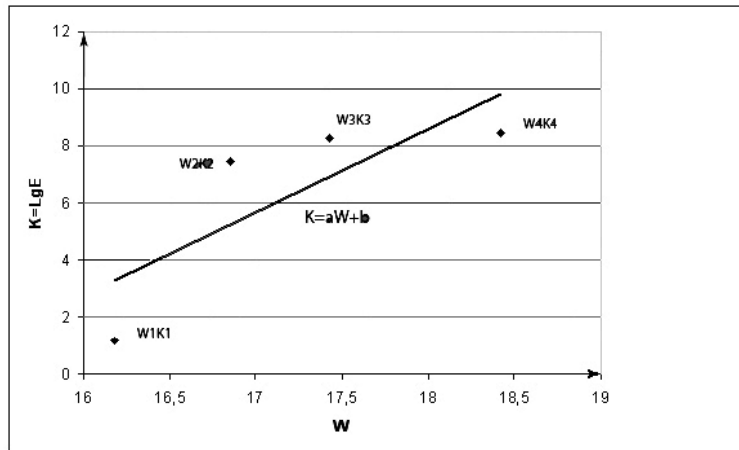


Рисунок 3 – График линейного уравнения, контролирующего сейсмический процесс

На третьем этапе на основе анализа эмпирических временных рядов $M(t)$ сейсмического мониторинга процесса подготовки сильного землетрясения для выделенных очаговых областей выполняется аппроксимация неизвестная функциональная зависимость по известным парам $(t, M(t))$. Разработанное эффективное алгоритмическое и программное обеспечение позволяет оценить время наступления ожидаемого сильного сейсмического события. Для этого используется алгоритм, основанный на быстрой нелинейной многопараметрической регрессии, по данным точкам наблюдений строится аппроксимирующую модель, т.е. аналитическая функция, задающая зависимость $y = f(x)$.

В качестве аппроксимирующей модели используется следующая функция:

$$M(t) = b + c \sum_{j=1}^3 \sin(\varphi_j + \omega_j t), \quad (12)$$

где t – вход, $M(t)$ – выход (оценка), b – первая ячейка столбца выходов (первого столбца), полученного в результате работы программного комплекса для расчета параметров, c – вторая ячейка столбца выходов, ($j = 1 \dots 3$) – третья, четвертая и пятая ячейки столбца выходов, ($j = 1 \dots 3$) – третья, четвертая и пятая ячейки столбца входов (второго столбца).

В результате получаем аппроксимирующие функции, пересечение которых формирует «энергетический клин», позволяющий оценить время ожидаемого сейсмического процесса (см. рис. 3). В ходе работы выявлена точность оценки по времени. Отклонения от реально произошедшего события составляют 24 часа.

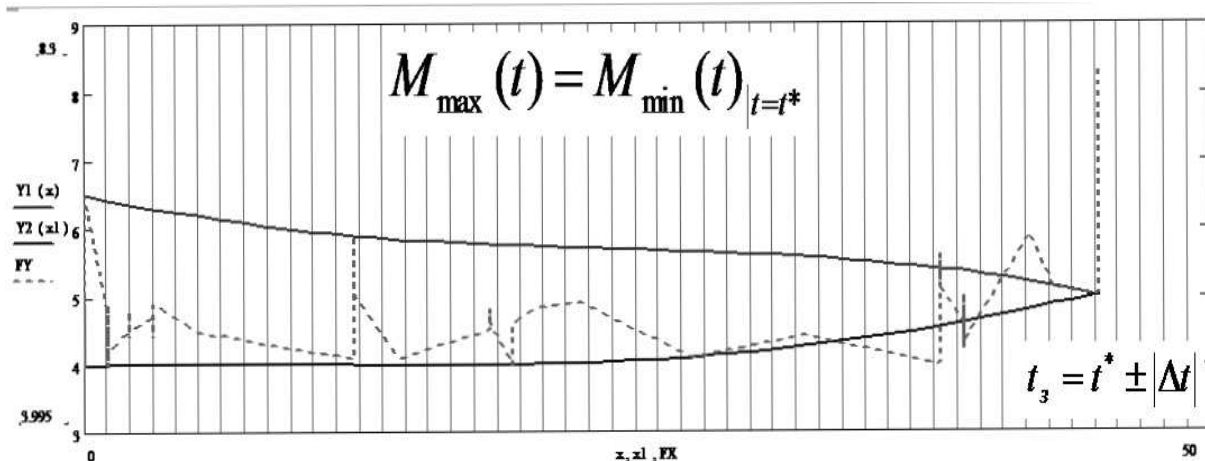


Рисунок 3 – Оценка времени ожидаемого землетрясения

Тестирование и апробация вычислительной методики выполнены для очаговых области сильнейших цунамигенных землетрясений в районе Центральных Курил (2006), а также очаговых областей катастрофических цунамигенных землетрясений в районе Соломоновых островов (2010), о. Гаити (2010), побережья Чили (2010) и Японии (2011).

Таким образом, создана вычислительная технология численного анализа данных сейсмического мониторинга процесса подготовки сильного цунамигенного землетрясения и оценки его параметров. Вычислительная технология позволяет быстро обрабатывать и анализировать данные, что важно, так как точность оценки параметров ожидаемого сильнейшего землетрясения увеличивается с каждым новым сейсмическим событием. Заблаговременная оценка параметров цунамигенного землетрясения позволяет выполнить численное моделирование распространения ожидаемого цунами для предварительного прогноза опасности катастрофических волн.