

Прогнозирование землетрясений по результатам анализа тренда сейсмического сигнала

В. В. Нагорный, 2018

Сумский государственный университет, Сумы, Украина
Поступила 17 августа 2018 г.

На прикладі землетрусів, що сталися в Японії, в 2003 і 2011 рр., наведено результати верифікації запропонованої автором методики прогнозування руйнівних землетрусів. Методика передбачає виявлення зон з підвищеним відносно оточуючих територій рівнем сейсмічного сигналу, побудову сумарного тренду сейсмічних сигналів, зареєстрованих на кожній з розміщених у цій зоні опорних сейсмостанцій. Сумарний тренд апроксимовано моделлю тренду. Модель складена таким чином, що прогнозовані параметри: час настання землетрусу і координати його епіцентру, включені в її математичну структуру. Ці параметри визначають в процесі параметричної ідентифікації моделі за результатами регулярного моніторингу сейсмічних сигналів, що виконується на кожній з опорних сейсмостанцій. Далі на підставі цих даних і відомої сили еталонного землетрусу визначають силу майбутнього землетрусу. Верифікація показала, що прогнозування землетрусів, здійснюване відповідно до розглянутої в статті методики, має високий ступінь достовірності і стійку повторюваність прогнозу протягом усього періоду спостереження за землетрусом, що зріє. Ця властивість методики пояснюється тим, що вона ґрунтується на вивченні динаміки зміни прогностичної ознаки, а не на загальноприйнятому в даний час розгляді поточного (статичного) значення ознаки. Позитивні результати верифікації стали підставою для апробації методики, в результаті чого було прогнозовано час, координати епіцентру і силу землетрусу, що зріє в районі Нанкінської западини.

Ключові слова: прогнозування землетрусу, рівень сейсмічного сигналу, опорна сейсмостанція, епіцентр землетрусу, сила землетрусу, тренд прогностичної ознаки, апробація та верифікація прогнозу.

Введение. Землетрясения постоянно находятся в центре внимания специалистов [Заманова, 2014; Кульчицкий, 2014; Малицкий та ін., 2014; Мишин и др. 2018]. Особый интерес представляет поиск предвестников стихийного бедствия [Довбня, 2014; Николаевский, Собисевич, 2015; Шапка та ін., 2016] с целью прогнозирования землетрясений. В качестве предвестников рассматривается множество различных по характеру и природе геофизических, геохимических, механических, геологических, метеорологических и других предвестников землетрясений [Кульчицкий, 2014; Рокитянский и др., 2015; Собисевич, и др., 2016; Цветкова и др., 2018]. Численность предвестников превышает

три сотни [Рикитаке, 1978]. Данный факт свидетельствует о том, что каждый из них не в полной мере соответствует предъявляемым к ним следующим требованиям [Завьялов, 2006]:

- ясный физический смысл прогностических признаков;
- физическая обоснованность связи каждого прогностического признака с процессом подготовки землетрясений;
- обеспеченность каждого прогностического признака данными наблюдений как во времени (наличие долговременных рядов значений прогностических признаков), так и в пространстве, т. е. возможность их картирования;

- наличие формализованной процедуры выделения аномалий прогностических признаков, основанной на модели их поведения в период подготовки землетрясения;
- возможность получения оценок ретроспективных статистических характеристик каждого предвестника:

вероятности успешных прогнозов (вероятности обнаружения), вероятности ложных тревог, прогностической эффективности (информативности) и т. п.

При этом общепринятые методики прогнозирования землетрясений, в независимости от физической природы их пред-

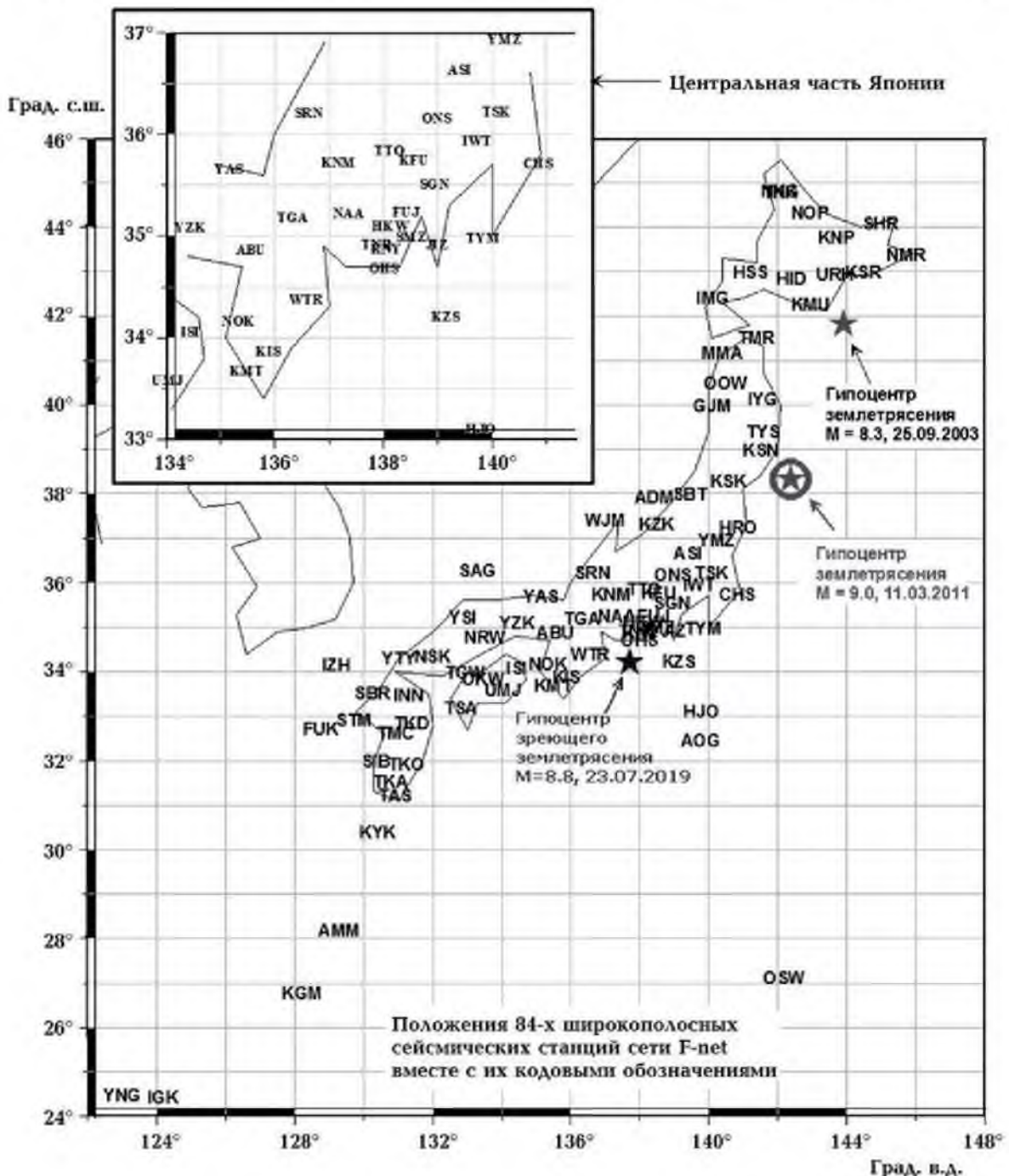


Рис. 1. Положение 84-сейсмических станций японской сети F-net.

вестников, сводятся в конечном счете к сравнению текущей сейсмической обстановки с неким ее эталоном. Однако отсутствие в практике прогнозирования сейсмических явлений подобных эталонов существенно ограничивает эффективность действующих методик прогнозирования.

В статье рассматривается методика прогнозирования землетрясения, лишенная указанных недостатков. Методика основана на анализе тенденции (тренда) изменения величины предвестника в период подготовки землетрясения.

Следует отметить, что безотносительно к физической природе того или иного предвестника землетрясения, поведение его тренда в период подготовки землетрясения уже само по себе является весьма информативным прогностическим признаком.

Таким образом, рассматривается поведение тренда традиционного прогностического признака — интенсивности сейсмических колебаний земной поверхности. Данный признак [Любушин, 2014] наиболее полно соответствует сформулированным выше требованиям к предвестникам землетрясений.

Методика прогнозирования землетрясений. Согласно рассматриваемой в статье методике, в качестве исходных данных при прогнозировании землетрясений используются результаты непрерывного мониторинга сейсмической обстановки в стране, выполняемой посредством ее национальной сети сейсмостанций. В качестве примера подобной сети в статье использовалась сеть F-net расположенных в Японии сейсмостанций (рис. 1).

Типовая форма регистрируемых при этом сейсмических сигналов, представляющих знакопеременный временной ряд, показана на рис. 2.

Как следует из рис. 2, временной сигнал модулирован по амплитуде. Частота модулирующего сигнала обусловлена лунно-солнечным приливным воздействием на Землю. Период этого воздействия равен 14,75 сут. [Юрков, 2005]. По результатам мониторинга выявляется зона с повышенным уровнем сейсмических колеба-

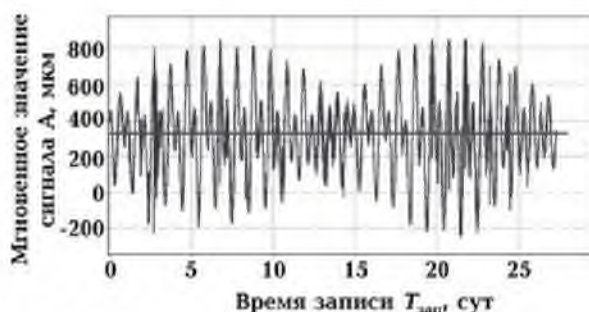


Рис. 2. Пример записи временной реализации сейсмического сигнала.

ний земной поверхности. В последующем измерении, выполняемые каждой из расположенных в данной зоне сейсмостанций (далее по тексту опорных сейсмостанций), подвергаются более детальному анализу с целью подготовки исходных для прогнозирования землетрясения данных.

В перечень исходных данных входят также:

- количество (N) опорных сейсмостанций и геодезические координаты x , y их расположения;

- календарное время t , измерений, проводимых на каждой из опорных станций.

Подготовка исходных данных для прогнозирования предусматривает спектральный анализ сейсмосигнала, зарегистрированного каждой из N опорных сейсмостанций, с выделением инфранизкочастотной части спектра (рис. 3), содержащей частотные составляющие, периоды которых равны [Юрков, 2005]:

- $T_{ам} = 14,75$ сут (период частоты амплитудной модуляции $f_{ам}$ ($f_{ам} = 1/T_{ам} = 1/14,75 = 0,0678$ ц/сут) сейсмического сигнала (рис. 2, 3), обусловленной периодически повторяющимся взаимным расположением Земли, Луны и Солнца);

- $T_{вр} = 1$ сут (период частоты вращения Земли $f_{вр}$ ($f_{вр} = 1/T_{вр} = 1/1 = 1$ ц/сут.));

- $T_{лп} = 12,42$ ч (период частоты полусуточных лунных приливов $f_{лп}$ (далее по тексту частоты лунных приливов), ($f_{лп} = 1/T_{лп} = 24 = 24/12,42 = 1,93$ ц/сут));

- формирование для каждой из N опорных сейсмостанций на базе амплитуд $A_{лп}$ частотной составляющей, расположенной

на частоте лунных приливов $f_{лп}$ (далее по тексту приливной гармонике), и календарного времени t_j их регистрации, тренда $A_{лп}(t_j)$, характеризующего изменение данных амплитуд в период подготовки зреющего землетрясения.

Спектр содержит частотные составляющие, расположенные на частоте вращения

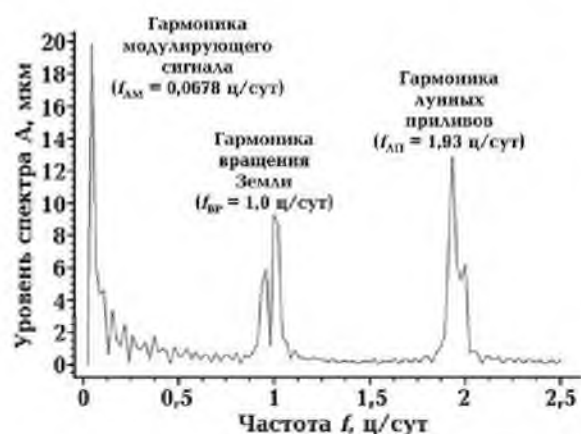


Рис. 3. Пример типовой инфранизкочастотной части спектра сейсмического сигнала.

Земли, следования лунных приливов и модулирующего сигнала. На основе подготовленных таким образом исходных данных осуществляется процедура собственно прогнозирования землетрясения, которое предусматривает определение момента наступления очередного землетрясения, указание координат его очага и силы. Рассмотрим порядок прогнозирования каждого из этих параметров подробнее.

Прогнозирование момента наступления землетрясения и координат его эпицентра. Время наступления землетрясения и координаты его очага определяются в процессе минимизации функционала U (1) [Пат., 2018а,б].

$$U = \sum_{j=1}^m [A_{об}(t_j) - A_m^p(t_j)]^2, \quad (1)$$

где $A_{об}(t_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{ми}(t_j)}{L_i} \right)^2}$ — амплитуда приливной гармонике сейсмической

волны в точке, расположенной на единичном расстоянии ($L_i=1$ км, 1 м) от очага зреющего землетрясения; $A_{лп i}$ — амплитуда приливной гармонике сейсмосигнала, зарегистрированного i -й опорной сейсмостанцией в j -й момент времени; t_j — время регистрации сейсмосигнала в долях года; L_i — расстояние от i -й опорной сейсмостанции до очага зреющего землетрясения [Степанов, 1948]:

$$L_i = \arctg \times \left\{ \frac{\sqrt{(\cos x_i \sin \Delta y_i)^2 + (\cos x_i \sin x_1 - \sin x_i \cos x_1 \cos \Delta y_i)^2}}{\sin x_i \sin x_1 + \cos x_i \cos x_1 \cos \Delta y_i} \right\} \times 6372,8.$$

Здесь x_i, x_1 — геодезическая широта местоположения соответственно i -й опорной сейсмостанции и точки с единичным эпицентральным расстоянием; $\Delta y_i = y_1 - y_i$ — разность геодезической долготы местоположения точки с единичным эпицентральным расстоянием и i -й опорной сейсмостанции; m — количество измерений сейсмического сигнала; N — количество опорных сейсмостанций;

$$A_m^p(t_i) = A_{об}(t_0) \left[1 + \alpha \frac{(t_i - t_0)^p}{(T_{вр} - t_i)^q} \right]$$

— прогнозная модель, где

$$A_{об}(t_0) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{ми}(t_0)}{L_i} \right)^2}$$

— величина амплитуды приливной гармонике сейсмической волны в точке, расположенной на единичном расстоянии от очага зреющего землетрясения в первоначальный момент времени t_0 ; $T_{вр}$ — верхняя граница прогнозного диапазона и календарное время выполнения первого t_0 и последующих измерений t_j ; p, q — показатели степени ($p < q$); α — опытный параметр ($\alpha \neq 0$).

Подставив в (1) формулу для тренда амплитуды сейсмической волны $A_{об}(t_j)$ и прогнозной модели $A_m^p(t_j)$, перейдем от общего выражения (1) к рабочей формуле (2),

образующей совместно с выражением для расстояния L_i систему из двух уравнений (3):

$$U = \sum_{j=1}^M \left[\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{mi}(t_j)}{L_i} \right)^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{mi}(t_0)}{L_i} \right)^2} \right]^2 \Rightarrow \min, \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} U &= \sum_{j=1}^m \left[\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{mi}(t_j)}{L_i} \right)^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{mi}(t_0)}{L_i} \right)^2} \right] \times \\ &\times \left[1 + \alpha \frac{(t_j - t_0)^p}{(T_{вр} - t_j)^q} \right]^2 \Rightarrow \min, \\ L_i &= \arctg \times \\ &\times \sqrt{\frac{(\cos x_0 \sin \Delta y_i)^2 + (\cos x_i \sin x_0 - \sin x_i \cos x_0 \cos \Delta y_i)^2}{\sin x_i \sin x_0 + \cos x_i \cos x_0 \cos \Delta y_i}} \times \\ &\times 6372,8. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В результате численного решения системы (3) определяется пять параметров: $T_{вр}$, x_0 , y_0 , α , p , q , основными из которых является параметр $T_{вр}$ и геодезические координаты очага зреющего землетрясения x_0 , y_0 . При решении данной системы основной операцией является минимизация среднеквадратического отклонения прогнозной модели $A_{mi}^P(t_j)$ от тренда амплитуды приливной гармоники сейсмической волны $A_{св}^P(t_j)$.

На основе параметра $T_{вр}$, являющегося верхней границей прогнозного диапазона, определим нижнюю границу прогнозного диапазона $T_{нр}$. При этом в качестве нижней границы $T_{нр}$ рассматривается матожидание параметра $T_{вр}$ и календарного времени t_j , измеряемого в долях года:

$$T_{нр} = t_j(1 - P(t_j)) + T_{вр}P(t_j), \quad (4)$$

где $P(t_j)$ — вероятность отсутствия зем-

летрясения в текущий момент времени t_j ($P(t_j) = \exp(-t_j/T_{вр})$).

Далее на основе граничных значений прогнозного диапазона $T_{вр}$ и $T_{нр}$ рассчитывается их среднее значение, принимаемое в качестве наиболее вероятного значения прогноза $T_{нв}$ времени наступления зреющего землетрясения, измеряемого в годах:

$$T_{нв} = \frac{T_{вр} + T_{нр}}{2}. \quad (5)$$

Результаты подобного уточняющего расчета позволяют представить прогноз календарного времени $T_{пр}$ наступления зреющего землетрясения на территории размещения опорных станций в виде следующего прогнозного диапазона:

$$T_{пр} \Rightarrow T_{нр} < T_{нв} < T_{вр}. \quad (6)$$

Прогнозирование силы землетрясения. Сила землетрясения, измеряемая в магнитудах M , рассчитывается по следующей формуле [Рихтер, 1963]:

$$M = \log A - \log A_0, \quad (7)$$

где A , A_0 — амплитуда соответственно записи стандартным сейсмографом данного землетрясения на данном расстоянии и таким же сейсмографом землетрясения, выбранного в качестве эталона.

Согласно [Рихтер, 1963], в качестве нулевого уровня A_0 принят уровень, равный 1 мкм на расстоянии 100 км от эпицентра эталонного землетрясения.

Запишем выражение (7) для двух землетрясений, присвоив им условные номера 1 и 2, считая нулевой уровень A_0 неизменным как по величине, так и по условиям его регистрации (типу сейсмографа и удаленности от эпицентра):

$$M_1 = \log A_1 - \log A_0, \quad (8)$$

$$M_2 = \log A_2 - \log A_0. \quad (9)$$

Вычтем уравнение (8) из уравнения (9):

$$M_2 - M_1 = \log A_2 - \log A_1. \quad (10)$$

Запишем выражение (10) в более общей форме, убрав с этой целью индекс 2 и при-

няв первое землетрясение в качестве эталонного, заменив соответственно индекс 1 на буквенное обозначение «э»:

$$M = M_э + \log \frac{A}{A_э} \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет определять магнитуду M данного землетрясения, сравнивая ее с магнитудой $M_э$ землетрясения, принятого в качестве эталона.

Подставив в (11) выражение для амплитуды приливной гармоники сейсмической волны $A_{св}$ и полагая, что $A = A_{св}$ и $A_э = A_{св}^э$,

получим рабочую формулу для прогноза силы зреющего землетрясения [Пат., 2018в]:

$$M = M_э + \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_{mi}}{L_i} \right)^2 \right] - \log \left[\frac{1}{N_э} \sum_{k=1}^{N_э} \left(\frac{A_{mk}^э}{L_k^э} \right)^2 \right] \quad (12)$$

где A_{mi} — амплитуда приливной гармоники сейсмосигнала, зарегистрированного i -й опорной сейсмостанцией в период,

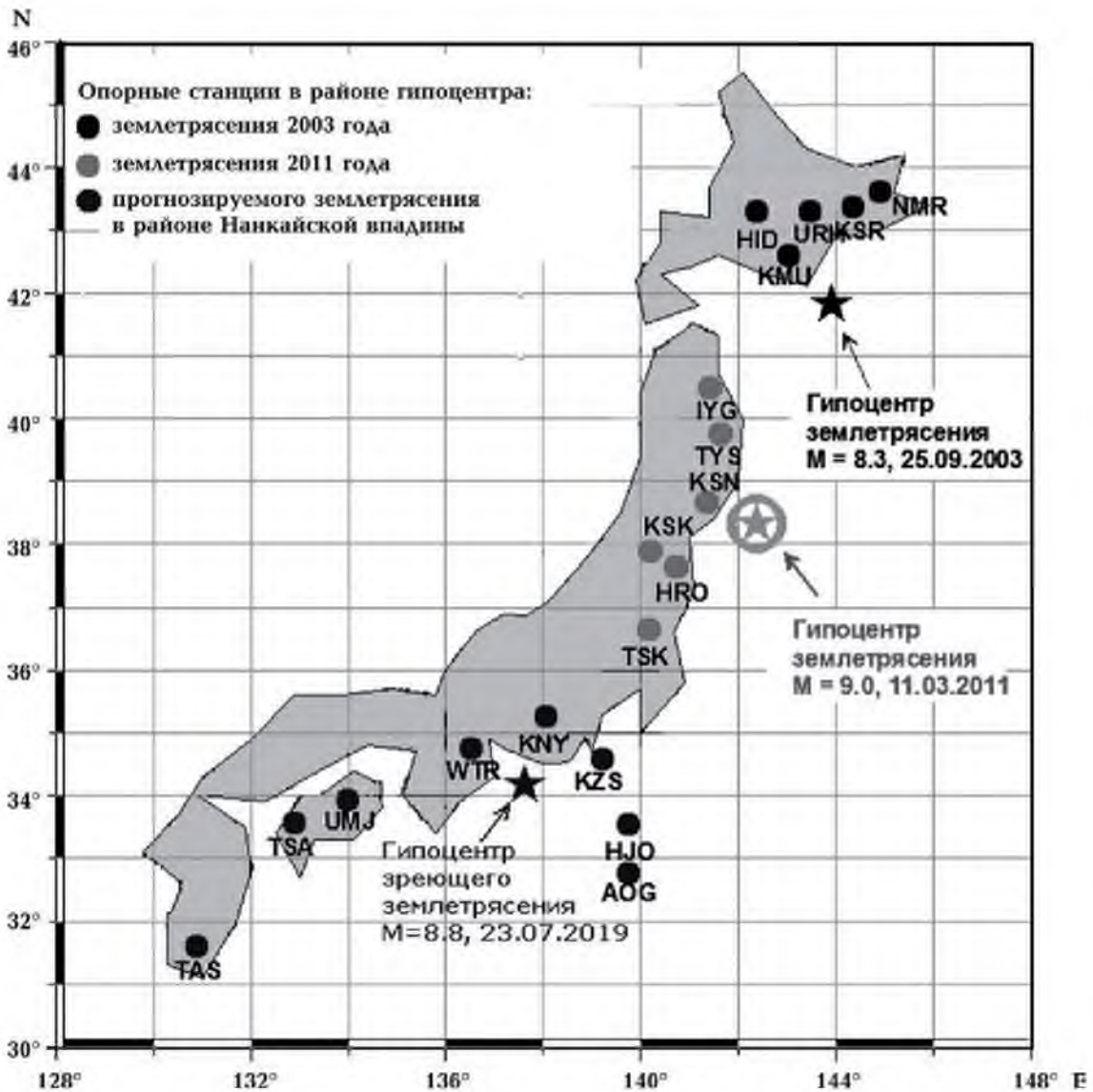


Рис. 4. Положение и кодовые обозначения японских сейсмических станций сети F-нет, которые рассматривались в статье в качестве опорных.

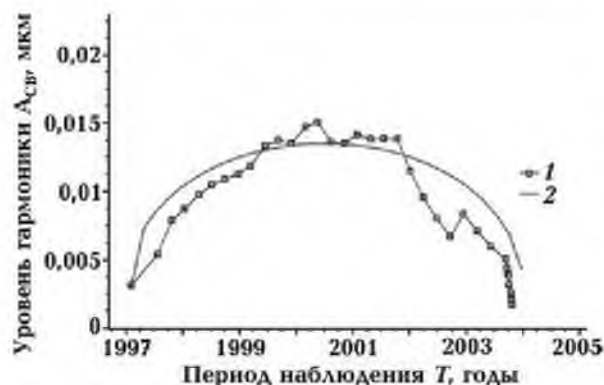


Рис. 5. Аппроксимация суммарного тренда амплитуды приливной гармоники $A_{св}(t_j)$ графиком прогнозной модели $A_{св}^p(t_j)$: 1 — суммарный тренд амплитуды приливной гармоники $A_{св}(t_j)$; 2 — график прогнозной модели $A_{св}^p(t_j)$.

предшествующий зреющему на данной территории землетрясению; $A_{штк}^p$ — амплитуда приливной гармоники эталонного сейсмосигнала, зарегистрированного k -й опорной сейсмостанцией; L_i — расстояние от i -й опорной сейсмостанции до очага зреющего землетрясения; L_k^z — эпицентрального расстояния k -й опорной сейсмостанции, использовавшейся при измерении эталонного сейсмосигнала; N, N_3 — количество опорных сейсмостанций, использующихся для контроля сейсмосигнала в периоды подготовки соответственно зреющего и эталонного землетрясений.

В общем случае количество станций может не совпадать ($N \neq N_3$), поэтому в (12) суммарное значение амплитуд пронорми-

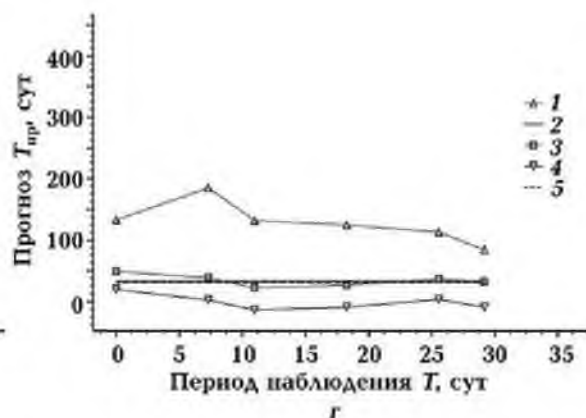
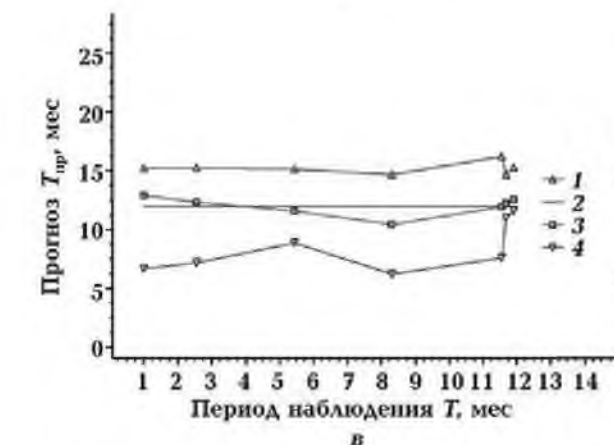
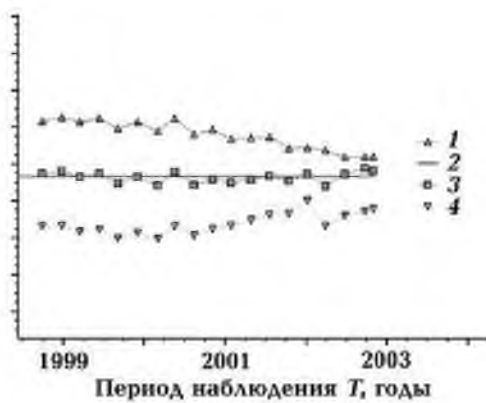


Рис. 6. Изменение прогнозного диапазона в течение наблюдаемого периода с 1.01.1997 по 25.09.2003 г. (а), долгосрочного с 1.01.97 по 25.09.2002 г. (б), среднесрочного с 25.09.2002 по 25.08.2003 г. (в) и краткосрочного прогнозирований в период с 25.08.2003 по 25.09.2003 г. (г): 1 — верхняя граница прогноза $T_{вр}$; 2 — фактическое время наступления землетрясения $T_{ф}=2003.83$ г. (25.09.2003 г.); 3 — наиболее вероятный прогноз $T_{ш}$ (среднеквадратическое отклонение $\sigma_{пр}$ прогноза составляет 0,067 лет); 4 — нижняя граница прогноза $T_{ш}$; 5 — среднее значение наиболее вероятного прогноза 23.09.2003 г.

ровано количеством опорных станций, измерения на которых проводились при подготовке эталонного и зреющего землетрясений.

Результаты исследований включают в себя результаты верификации описанной выше методики и ее апробации при прогнозировании зреющего землетрясения. На рис. 4 приведены схемы размещения опорных сейсмостанций в трех зонах. В двух из этих зон (на о. Хоккайдо и окрестности г. Фукусима) произошли разрушительные землетрясения в 2003 и 2011 г., результаты измерений на которых использовались при верификации рассматриваемой методики.

Апробация рассматриваемой методики прогнозирования осуществлялась по результатам измерений сейсмосигнала, выполненных в третьей зоне, расположенной в районе Нанкайской впадины (см. рис. 4).

Результаты верификации методики прогнозирования. Верификация, как процедура оценки достоверности прогноза, проводилась путем ретроспективного прогнозирования в соответствии с рассматриваемой в статье методикой параметров ранее состоявшихся землетрясений и последующим сравнением спрогнозированных и фактических параметров землетрясений.

В качестве фактических рассматривались параметры двух японских землетрясений, произошедших в районе о. Хоккайдо 25 сентября 2003 г. (координаты эпицентра 42.0°N , 143.0°E) и в районе г. Фукусима 11 марта 2011 г. (координаты эпицентра 38.32°N , 142.38°E).

Верификация прогноза землетрясения в районе о. Хоккайдо. При верификации использовались результаты измерений, выполненных на протяжении шести лет (с 1.01.1997 по 25.09.2003 г.) на пяти опорных сейсмостанциях, расположенных на побережье о. Хоккайдо: KMU, HID, KSR, URH, NMR (см. рис. 4).

Прогноз момента наступления землетрясения. Результаты прогноза момента наступления землетрясения приведены на рис. 5, 6 и описывают:

- изменение в течение периода наблюдений с 1.01.1997 по 25.09.2003 г. суммарного тренда амплитуды приливной гармоники $A_{\text{св}}(t_j)$ (1) и графика прогнозной модели $A_{\text{м}}^p(t_j)$ (3) (рис. 5);
- характер изменения в течение периода наблюдений прогнозного диапазона и наиболее вероятного значения прогноза, выполненного без дифференциации его на принятые виды прогноза: долгосрочное, среднесрочное и краткосрочное (рис. 6, а);

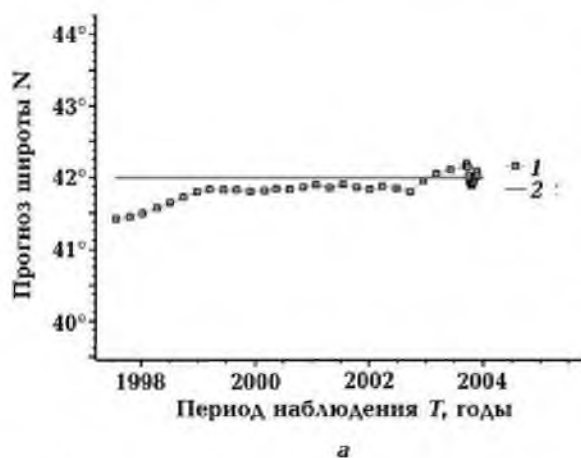


Рис. 7. Изменение в течение периода наблюдения с 1.01.1997 по 25.09.2003 г. прогноза северной широты (а) и восточной долготы (б) эпицентра землетрясения, происшедшего 25.09.2003 г.: 1 — прогноз координаты $N_{\text{пр}}^{\circ}$ (среднеквадратическое отклонение σ_N прогноза широты составляет $0,16^{\circ}$) и $E_{\text{пр}}^{\circ}$ (среднеквадратическое отклонение σ_E прогноза долготы составляет $0,27^{\circ}$); 2 — фактическое значение координаты N_{ϕ}° и $E_{\phi}^{\circ}=143^{\circ}$ соответственно.

– результаты прогноза, выполненного в соответствии с традиционной дифференциацией видов прогноза на долгосрочный (рис. 6, б), среднесрочный (рис. 6, в) и краткосрочный (рис. 6, г).

Верификация долгосрочного прогноза показывает, что среднеквадратическая величина $\sigma_{\text{пр}}$ колебаний наиболее вероятного значения долгосрочного прогноза $T_{\text{вв}}$, рассчитанного по формуле (6), изменяется в пределах 0,067–0,07 лет.

Протокол

долгосрочного прогнозирования
от 16.2.1999 г.

Прогнозируемая дата землетрясения
2003.887 г.

(31.10.2003 г. (16 ч 56 мин))

изменяется в следующих границах:

2003.209...2004.566 гг.

(от 15.2.2003 г. (9 ч 34 мин) до 24.6.2004 г.
(23 ч 53 мин))

Протокол долгосрочного прогнозирования от 16.2.1999 г. показывает, что наиболее вероятный прогноз $T_{\text{вв}}$ отличается от фактической даты $T_{\text{ф}}$ землетрясения в большую сторону на шесть дней ($T_{\text{вв}} = 31.10.2003 \text{ г.} > T_{\text{ф}} = 25.09.2003 \text{ г.}$).

Верификация среднесрочного прогноза показывает, что среднеквадратическая величина $\sigma_{\text{пр}}$ колебаний наиболее вероятного значения среднесрочного прогноза $T_{\text{вв}}$, рассчитанного по формуле (6), составляет 0,68 мес.

Протокол

среднесрочного прогнозирования
от 31.8.2002 г.

Прогнозируемая дата землетрясения
2003.772 г.

(8.9.2003 г. (22 ч 21 мин))

изменяется в следующих границах:

2003.375...2004.168 гг.

(от 15.4.2003 г. (7 ч 8 мин) до 1.2.2004 г.
(14 ч 58 мин))

Из **Протокола** среднесрочного прогнозирования, выполненного практически за год до фактической даты землетрясения, следует, что наиболее вероятный прогноз $T_{\text{вв}}$ отличается от фактической даты в меньшую сторону на 17 дней ($T_{\text{вв}} = 8.09.2003 \text{ г.}$ меньше, чем $T_{\text{ф}} = 25.09.2003 \text{ г.}$).

Протокол

краткосрочного прогнозирования
от 14.9.2003 г.

Прогнозируемая дата землетрясения
2003.801 г.

(19.9.2003 г. (18 ч 11 мин))

изменяется в следующих границах:

2003.796...2003.807 гг.

(от 17.9.2003 г. (16 ч 7 мин) до 21.9.2003 г.
(19 ч 56 мин))

Верификация краткосрочного прогноза показывает, что среднеквадратическая величина $\sigma_{\text{пр}}$ отклонения наиболее вероятного значения $T_{\text{вв}}$ краткосрочного прогноза, рассчитанного по формуле (6), составляет 6,6 суток.

Из **Протокола** краткосрочного прогнозирования, выполненного за 11 дней до фактической даты землетрясения, следует, что наиболее вероятный прогноз $T_{\text{вв}}$ отличается от фактической даты $T_{\text{ф}}$ в меньшую сторону на 6 дней ($T_{\text{вв}} = 19.09.2003 \text{ г.}$ меньше, чем $T_{\text{ф}} = 25.09.2003 \text{ г.}$).

Прогноз координат эпицентра землетрясения. Результаты прогнозирования представлены на рис. 7.

Прогноз показывает, что отклонение прогноза координат широты $N_{\text{пр}}^{\circ}$ (см. рис. 7, а) и долготы $E_{\text{пр}}^{\circ}$ (см. рис. 7, б) эпицентра от их фактического значения $N_{\text{ф}}^{\circ}$ и $E_{\text{ф}}^{\circ}$ характеризуется среднеквадратиче-

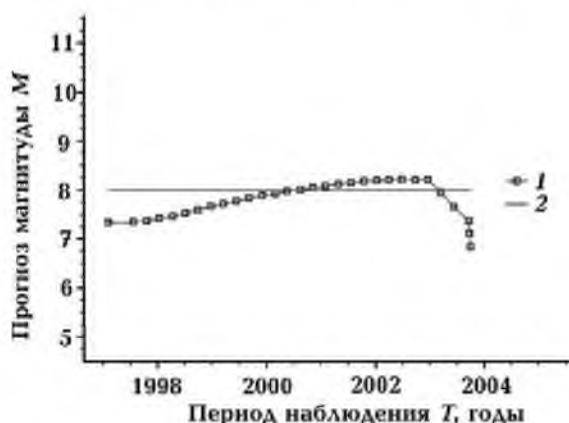


Рис. 8. Изменение в течение периода наблюдения с 1.01.1997 по 25.09.2003 г. прогноза силы землетрясения, произошедшего 25.09.2003 г.: 1 — прогноз силы землетрясения $M_{\text{пр}}$ (среднеквадратическое отклонение σ_M магнитуды землетрясения равно 0,32); 2 — фактическая магнитуда $M_{\text{ф}} = 8$.

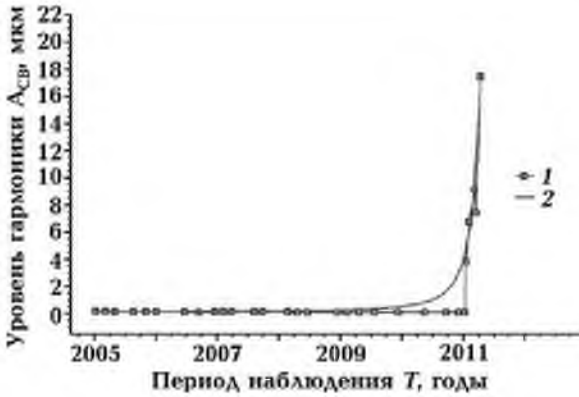


Рис. 9. Аппроксимация суммарного тренда амплитуды приливной гармоники $A_{св}(t_j)$ графиком прогнозной модели $A_{св}^p(t_j)$: 1 — суммарный тренд амплитуды приливной гармоники $A_{св}(t_j)$; 2 — график прогнозной модели $A_{св}^p(t_j)$.

ской величиной σ , изменяющейся в пределах $0,16^\circ$ — $0,27^\circ$, что в перерасчете на расстояние составляет соответственно 18 и 30 км. Данные расстояния соответствуют приемлемой в сейсмологии [Рихтер, 1963] точности определения координат эпицентров землетрясений.

Прогноз силы землетрясения. Результат прогнозирования представлен на рис. 8.

Из рис. 8 следует, что прогноз магнитуды землетрясения $M_{пр}$, рассчитанной по формуле (13), колеблется относительно фактической магнитуды $M_{ф}$. В качестве эталонного рассматривалось землетрясение, произошедшее в Японии в 2011 г. Среднее квадратическое отклонение σ_M колебаний прогноза равно 0,32 магнитуды

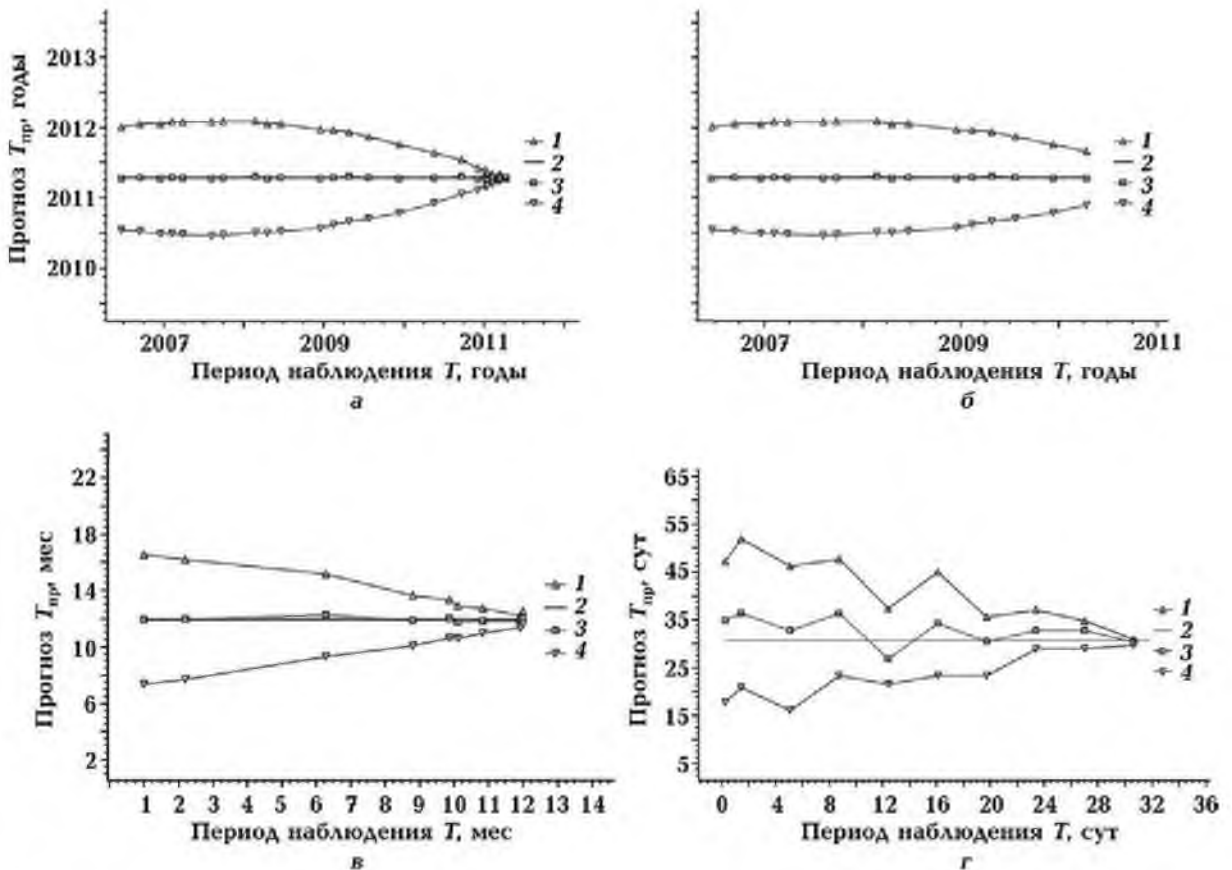


Рис. 10. Изменение прогнозного диапазона в течение наблюдаемого периода с 1.01.2004 по 11.03.2011 г. (а), долгосрочного прогнозирования в период с 1.01.2004 по 11.03.2010 г. (б), среднесрочного в период с 11.03.2010 по 11.02.2011 г. (в) и краткосрочного в период с 11.02.2011 по 11.03.2011 г. (г): 1 — верхняя граница прогноза $T_{пр}$; 2 — фактическое время наступления землетрясения $T_{ф}=2011.28$ г. (11.03.2011); 3 — наиболее вероятный прогноз $T_{пр}$ (среднеквадратическое отклонение $\sigma_{пр}$ прогноза составляет 0,0118 лет); 4 — нижняя граница прогноза $T_{пр}$.

и составляет 4 % от фактической характеристики силы землетрясения ($M_{\phi}=8$).

Верификация прогноза землетрясения в районе г. Фукусима. При верификации использовались результаты измерений, выполненных на протяжении 10 лет с 1 января 2004 по 11 марта 2011 г. шестью опорными сейсмостанциями, расположенными в районе г. Фукусима: TSK, HRO, KSK, KSN, TYS, IYG (см. рис. 4).

Прогноз момента наступления землетрясения. Результаты прогноза момента наступления землетрясения приведены на рис. 9 и описывают:

– изменение в течение периода наблюдений с 1 января 2004 по 11 марта 2011 г. тренда амплитуды приливной гармоника $A_{св}(t_j)$ и аппроксимирующего его графика прогнозной модели $A_{ш}^P(t_j)$ (рис. 9);

– характер изменения в течение периода наблюдений прогнозного диапазона и наиболее вероятного значения прогноза, выполненного без дифференциации его на общепринятые виды прогноза: долгосрочное, среднесрочное и краткосрочное (рис. 10, а);

– результаты прогноза, выполненного в соответствии с общепринятой дифференциацией видов прогноза на долгосрочный (рис. 10, б), среднесрочный (рис. 10, в) и краткосрочный (рис. 10, г).

Протокол

долгосрочного прогнозирования
от **14.11.2006 г.**

Прогнозируемая дата землетрясения

2011.252 г.

(1.3.2011 г. (18 ч 11 мин))

изменяется в следующих границах:

2010.471...2012.034 гг.

(от 20.5.2010 (16 ч 17 мин) до 12.1.2012 г.
(7 ч 2 мин))

Верификация долгосрочного прогноза показывает, что среднеквадратическое отклонение $\sigma_{пр}$ наиболее вероятного значения прогноза $T_{нв}$ рассчитанного по формуле (6), изменяется в пределах 0,010—0,018 лет.

Протокол долгосрочного прогнозирования от **14.11.2006 г.** показывает, что

наиболее вероятный прогноз $T_{нв}$, сделанный более чем за четыре года до землетрясения, отличается от фактической даты землетрясения T_{ϕ} в меньшую сторону на 8 дней ($T_{нв}=1.03.2011$ г. меньше, чем $T_{\phi}=11.03.2011$ г.).

Верификация среднесрочного прогноза показывает, что среднеквадратическая величина $\sigma_{пр}$ колебаний наиболее вероятного значения $T_{нв}$ среднесрочного прогноза составляет 0,30 мес.

Протокол

среднесрочного прогнозирования
от **9.11.2009 г.**

Прогнозируемая дата землетрясения
2011.293 г.

(16.3.2011 г. (12 ч 8 мин))

изменяется в следующих границах:

2010.800...2011.785 лет

(от 18.9.2010 г. (10 час 38 мин) до
13.9.2011 г. (15 час 31 мин))

Из **Протокола** среднесрочного прогнозирования от **9.11.2009 г.**, выполненного более чем за год до фактической даты землетрясения T_{ϕ} , следует, что наиболее вероятный прогноз $T_{нв}$ отличается от фактической даты в большую сторону на 5 дней ($T_{нв}=16.03.2011$ г. больше, чем $T_{\phi}=11.03.2011$ г.).

Протокол

краткосрочного прогнозирования
от **9.03.2011 г.**

Прогнозируемая дата землетрясения
2011.281 лет

(11.3.2011 г. (12 ч 53 мин))

изменяется в следующих границах:

2011.278...2011.284 гг.

(от 10.3.2011 (9 ч 9 мин) до 13.3.2011 г.
(14 ч 13 мин))

Верификация краткосрочного прогноза показывает, что среднеквадратическое отклонение $\sigma_{пр}$ вариации наиболее вероятного значения $T_{нв}$ краткосрочного прогноза составляет 2,9 сут.

В **Протоколе** краткосрочного прогнозирования от **9.03.2011 г.**, составленного за 2 дня до фактической даты землетрясения T_{ϕ} , наиболее вероятный прогноз $T_{нв}$ совпадает с фактической датой землетрясения ($T_{нв}=11.03.2011$ г. равно $T_{\phi}=11.03.2011$ г.).

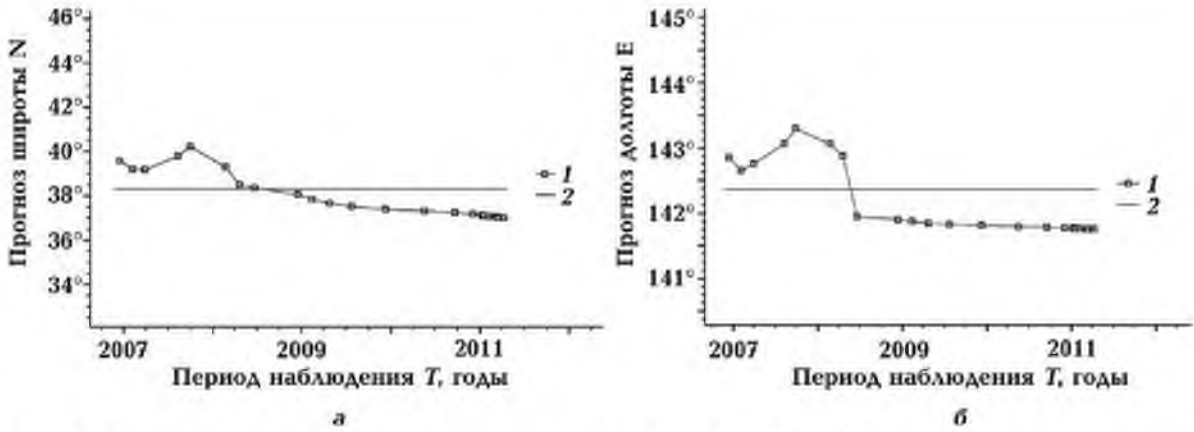


Рис. 11. Изменение в течение периода наблюдения с 1.01.2004 по 11.03.2011 г. прогноза северной широты N° (а) и восточной долготы E° (б) эпицентра землетрясения, происшедшего 11 марта 2011 г.: 1 — прогноз координаты $N^\circ_{пр}$ (среднеквадратическое отклонение σ_N прогноза широты составляет $0,99^\circ$) и $E^\circ_{пр}$ (среднеквадратическое отклонение σ_E прогноза долготы составляет $0,54^\circ$); 2 — фактическое значение координаты $N^\circ_\phi=38,32^\circ$ и $E^\circ_\phi=142,37^\circ$ соответственно.

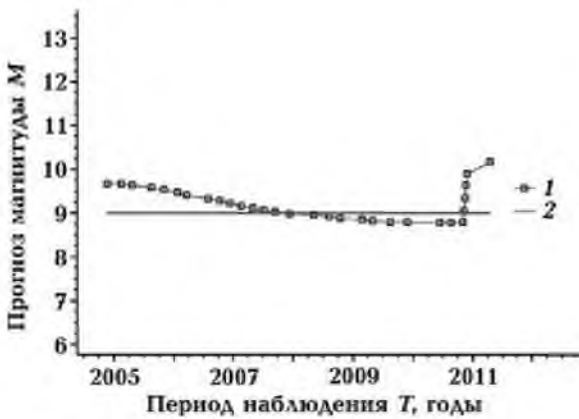


Рис. 12. Изменение прогноза силы землетрясения, происшедшего 11.03.2011 г., с 1.01.2004 по 11.03.2011 г.: 1 — прогноз силы землетрясения $M_{пр}$ (среднеквадратическое отклонение σ_M прогноза магнитуды составляет $0,29$); 2 — фактическое значение магнитуды $M_\phi=9$.

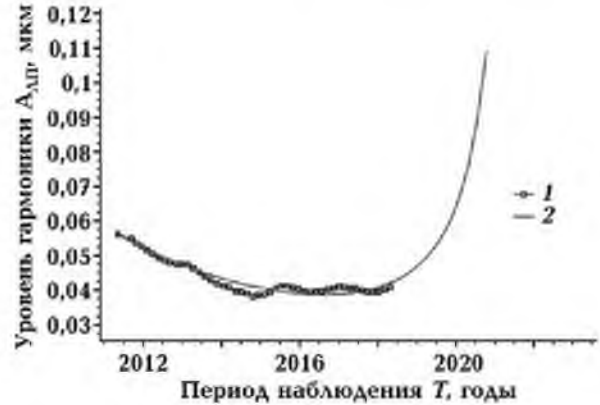


Рис. 13. Аппроксимация суммарного тренда амплитуды приливной гармоники $A_{св}(t)$ графиком прогнозной модели $A_{св}^p(t)$: 1 — суммарный тренд амплитуды приливной гармоники $A_{св}(t)$; 2 — график прогнозной модели $A_{св}^p(t)$.

Прогноз координат эпицентра землетрясения. Результаты прогноза приведены на рис. 11.

Результаты расчетов показывают, что прогноз координат широты $N^\circ_{пр}$ (см. рис. 11, а) и долготы $E^\circ_{пр}$ (см. рис. 11, б) эпицентра соответствует фактическому значению N°_ϕ и E°_ϕ . Среднеквадратическое отклонение σ прогноза координат изменяется в пределах $0,54-0,99^\circ$. В процентном отношении это составляет соответственно $0,38-2,6\%$.

Прогноз силы землетрясения. Результат

прогнозирования представлен на рис. 12.

Из рис. 12 следует, что прогноз магнитуды землетрясения $M_{пр}$, рассчитанной по формуле (13), колеблется относительно фактической магнитуды M_ϕ . В качестве эталонного рассматривалось землетрясение, происшедшее в Японии в 2003 г. Среднеквадратическое отклонение σ_M магнитуды колебаний равно $0,29$ и составляет $3,2\%$ от фактической характеристики силы землетрясения ($M_\phi=9$).

Таким образом, результаты верификации свидетельствуют об устойчивости и

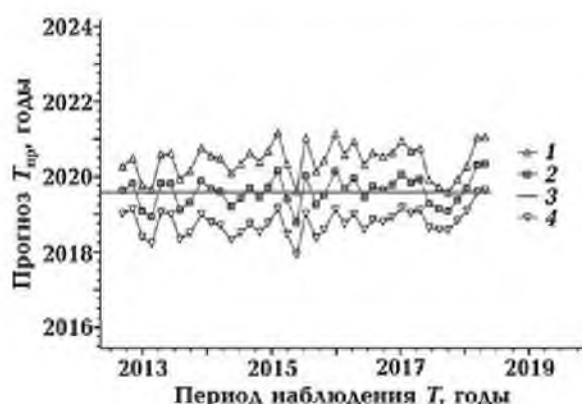


Рис. 14. Изменение прогнозного диапазона в течение наблюдаемого периода с 1.01.2011 г. по 25.03.2018 г.: 1 — верхняя граница прогноза $T_{пр}$; 2 — наиболее вероятный прогноз $T_{пр}$ (среднее квадратическое отклонение $\sigma_{пр}$ прогноза составляет 0,9 лет); 3 — усредненное значение наиболее вероятного прогноза $T_{ус}=2019,59$ г. (02.07.2019); 4 — нижняя граница прогноза $T_{пр}$.

незначительной вариативности на протяжении всего периода наблюдения за сейсмическими сигналами прогнозов времени, места и силы землетрясения. Причем прогнозы каждого из трех параметров землетрясения удается получить задолго до наступления прогнозируемого стихийного бедствия, в результате чего отпадает необходимость в применении общепринятой в сейсмологии дифференциации прогнозов на долго-, средне- и краткосрочные.

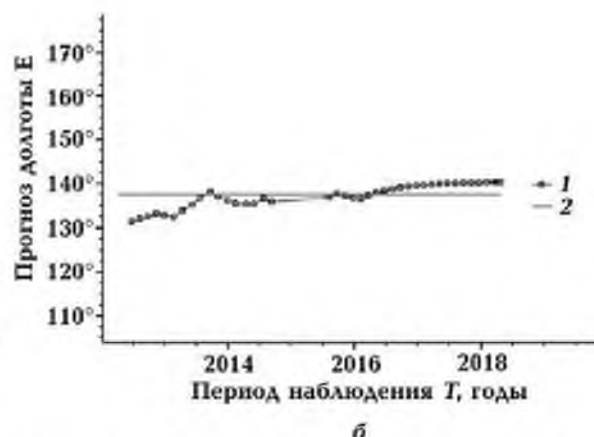
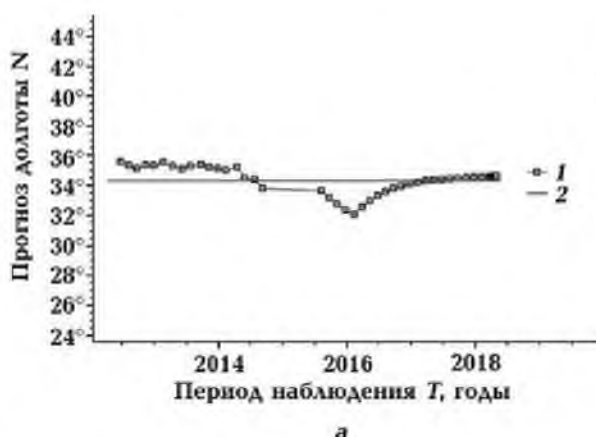


Рис. 15. Изменение в течение периода наблюдения с 1.01.2011 по 25.03.2018 г. прогноза северной широты (а) и восточной долготы (б) эпицентра зреющего землетрясения: 1 — прогноз координаты $N_{пр}^{\circ}$ (среднеквадратическое отклонение σ_N прогноза широты составляет $0,89^{\circ}$) и $E_{пр}^{\circ}$ (среднеквадратическое отклонение σ_E прогноза долготы составляет $2,53^{\circ}$); 2 — усредненное значение координаты $N_{ус}=34,34^{\circ}$ и $E_{ус}=137,55^{\circ}$ соответственно.

Результаты верификации предложенной автором методики прогнозирования землетрясений послужили основанием для проведения апробации методики путем прогнозирования параметров будущего землетрясения.

Результаты апробации методики прогнозирования, которые использовались на семи опорных сейсмостанциях, расположенных в районе Нанкайской долины: TAS, AOG, HJO, UMJ, KZS, WTR, KNY (см. рис. 4). Измерения проводились с 1.01.2012 по 25.03.2018 г.

Прогнозирование времени наступления землетрясения. Результаты прогнозирования времени наступления землетрясения приведены на рис. 13, 14.

Протокол

долгосрочного прогнозирования
от 27.3.2018 г.

Прогнозируемая дата землетрясения
2019.646 г.

(23.7.2019 г. (18 ч 43 мин))

изменяется в следующих границах:
2019.143...2020.148 гг.

(от 22.1.2019 (22 ч 28 мин) до 24.1.2020 г.
(13 ч 34 мин))

Апробация долгосрочного прогноза показывает, что среднеквадратическое отклонение $\sigma_{пр}$ наиболее вероятного значе-

ния прогноза $T_{\text{нв}}$, рассчитанного по формуле (6), составляет 0,16 лет.

Протокол долгосрочного прогнозирования от 27.3.2018 г. показывает, что наиболее вероятный прогноз $T_{\text{нв}}$ даты землетрясения равен 23.7.2019 г. и изменяется в пределах от 22.01.2019 до 24.01.2020 г.

Прогнозирование координат эпицентра зреющего землетрясения. Результаты прогнозирования представлены на рис. 15.

Расчет показывает, что среднеквадратическое отклонение σ прогноза координат изменяется в пределах 0,89—2,53°. В процентном отношении это составляет соответственно 2,6—1,8 %.

Усредненные значения координат эпицентра зреющего землетрясения составляют: 34,34° с.ш. и 137,55° в.д.

Прогнозирование силы зреющего землетрясения. Из рис. 16 следует, что усредненное значение прогноза магнитуды землетрясения $M_{\text{пр}}$, рассчитанной по формуле (13), равно 8,85. В качестве эталонного рассматривалось землетрясение, происшедшее в Японии в 2011 г. Среднеквадратическое отклонение σ_M колебаний прогноза относительно этой величины равно 0,035 магнитуды, что составляет 0,4 % от усредненного значения магнитуды $M_{\text{ус}}$.

Обсуждение. На рис. 17 для сравнения приведены ретроспективные прогнозы

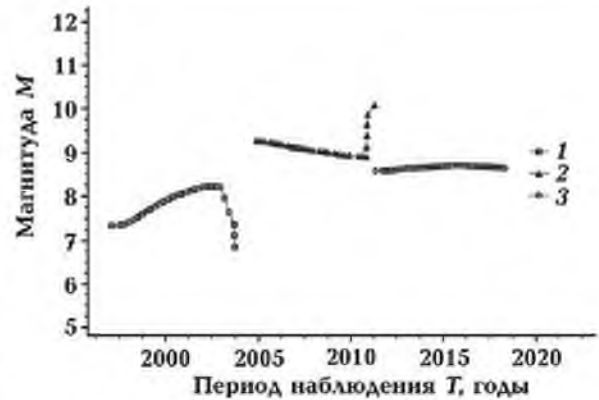


Рис. 17. Изменение в течение периода наблюдения прогноза магнитуды: 1 — землетрясения, состоявшегося 28.08.2003 г.; 2 — землетрясения, состоявшегося 11.03.2011 г.; 3 — зреющего землетрясения.

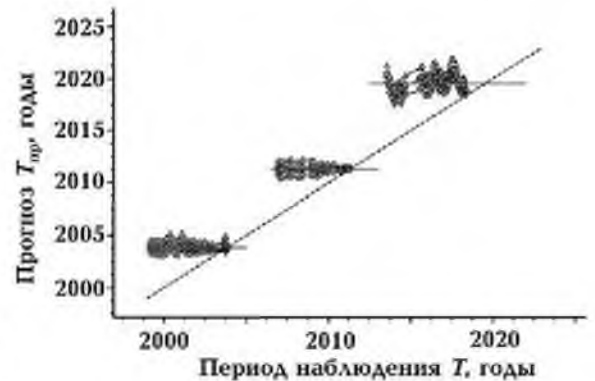


Рис. 18. Сопоставление прогноза времени землетрясения и текущего календарного времени. Условные обозначения см. на рис. 17.

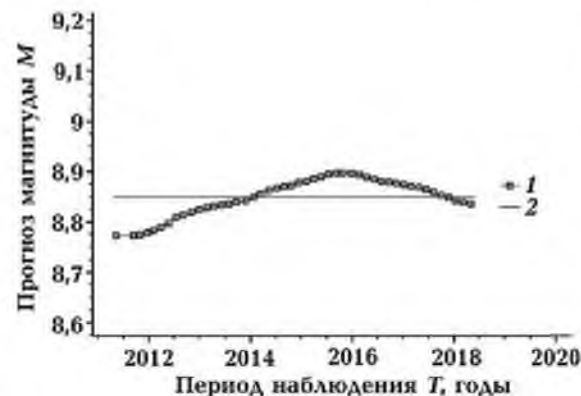


Рис. 16. Изменение в течение периода наблюдения с 1.01.2011 по 25.03.2018 г. прогноза силы зреющего землетрясения: 1 — прогноз силы землетрясения $M_{\text{пр}}$ (среднее квадратическое отклонение σ_M прогноза магнитуды составляет 0,035); 2 — усредненное значение прогноза магнитуды $M_{\text{ус}}=8,85$.

магнитуд землетрясений, полученные при верификации методики прогнозирования, и прогноз силы зреющего землетрясения, ожидаемого в период с 22.01.2019 по 24.01.2020 г.

Сравнение показывает, что зреющее землетрясение по силе занимает промежуточное положение относительно произошедших.

На рис. 18 сопоставлены прогнозные диапазоны и изменение текущей даты (обозначена пунктирной прямой). Как видим, на момент выполнения прогноза между наиболее вероятной датой зреющего землетрясения (23.07.2019 г.) и датой выполнения прогноза (25.03.2018 г.) существует более чем годичный запас.

На протяжении этого периода следует проводить непрерывный с целью повышения точности прогнозирования мониторинг уровня сейсмического сигнала на каждой из рассматриваемых опорных сейсмостанций.

На рис. 19 приведены два тренда амплитуды приливной гармоник $A_{cb}(t_j)$, первый из которых регистрировался в период подготовки землетрясения, состоявшегося в Японии 11 марта 2011 г., и играет роль калибровочного графика для второго тренда, наблюдаемого в настоящее время. Для удобства сравнения трендов на оси абсцисс отложено время, пронормированное временем наступления землетрясений (состоявшегося 11 марта 2011 г. и зреющего — 27 июля 2019 г.).

Тренд амплитуды приливной гармоник зреющего землетрясения, наблюдаемый в текущий период времени, визуально, практически, эквидистантен стационарной части калибровочного тренда. Эквидистантность количественно подтверждается высоким уровнем корреляции сравниваемых трендов ($R=0,98976$, рис. 20).

Заключение. Результаты исследований, проведенных автором при разработке методики прогнозирования землетрясений, показали, что характер поведения тренда прогностического признака землетрясения сам по себе является эффективным

и весьма информативным предвестником землетрясения, что, собственно, и подтвердили приведенные в статье результаты верификации и апробации методики прогнозирования землетрясений, основывающейся в данном случае на анализе сейсмических колебаний земной поверхности.

Поведение тренда как прогностического признака в полной мере соответствует предъявляемым к ним требованиям, приведенным во введении, а именно:

- тренд имеет ясный физический смысл, закономерно описывая в период подготовки очередного землетрясения рассмотренное в статье поведение прогностического признака — амплитуды приливной гармоник;
- связь тренда как прогностического признака с процессом подготовки землетрясений физически обоснована;
- как прогностический признак тренд обеспечен данными наблюдений как во времени за счет наличия долговременных рядов значений, например амплитуд приливных гармоник, так и в пространстве за счет использования нескольких опорных сейсмостанций, расположенных в сеймоопасной зоне, что обеспечивает картирование результатов мониторинга сейсмообстановки в стране;

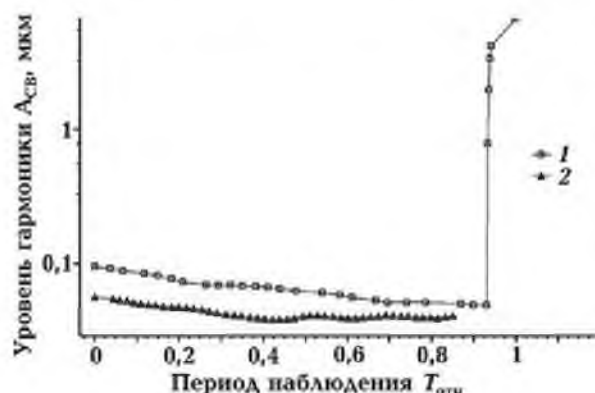


Рис. 19. Сравнение трендов амплитуды приливной гармоник A_{cb} : 1 — изменение амплитуды в период с 1.01.2004 по 11.03.2011 г. (калибровочный тренд); 2 — изменение амплитуды в период с 1.01.2011 по 25.03.2018 г. (тренд, наблюдаемый в текущий период времени).

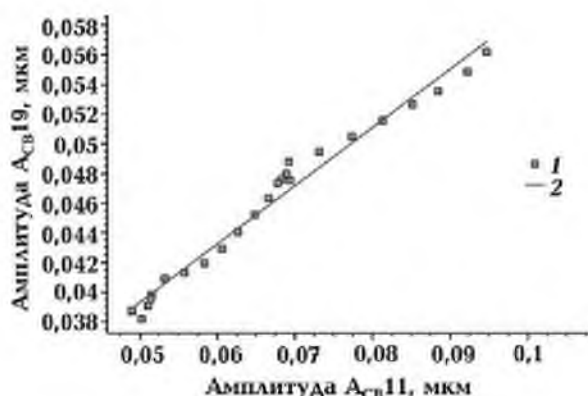


Рис. 20. Регрессионная зависимость между калибровочным трендом и трендом зреющего землетрясения, зафиксированными соответственно в периоды с 1.01.2004 по 11.03.2011 г. (A_{cb11}) и с 1.01.2011 по 25.03.2018 г. (A_{cb19}): 1 — экспериментальные данные; 2 — график корреляционной зависимости ($A_{cb19}=0,01967+0,39298A_{cb11}$, $R=0,98976$).

- модель тренда, описывающая его поведение как в период подготовки землетрясения, так и в момент проявления его аномалий, формализует процедуру прогнозирования момента, координат эпицентра и силы зреющего землетрясения;

- тренд позволяет при необходимости получать традиционные оценки ретроспективных статистических характеристик каждого предвестника, поведение которого он описывает: вероятности успешных прогнозов (вероятности обнаружения), ложных тревог, прогностической эффективности (информативности) и т. п.

Для использования в полной мере преимуществ данного предвестника землетрясений необходимо последовательно выполнять следующее:

- в результате непрерывного мониторинга показаний национальной сети сейсмических станций выявлять зоны с по-

вышенным относительно окружающей территории уровнем сейсмического сигнала и рассматривать расположенные в данной зоне сейсмостанции в качестве опорных;

- проводить спектральный анализ сигнала, зарегистрированного каждой из опорных станций, выделять в ультранизкочастотной части спектра приливную гармонику и определять ее амплитуду, фиксируя одновременно текущую дату измерений;

- составлять для каждой из опорных сейсмостанций тренд амплитуды приливной гармоники на основе пары параметров: «амплитуда приливной гармоники — дата регистрации сейсмосигнала»;

- решать систему уравнений (3), определяя по результатам этого и дополняющих расчетов по формулам (6) и (12) искомые параметры зреющего землетрясения $T_{пр}$, x_0 , y_0 , M .

Список литературы

- Довбня Б. В. Электромагнитные предвестники землетрясений и их повторяемость. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 3. С. 160—165. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116069>.
- Завьялов А. Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. Москва: Наука, 2006. 254 с.
- Заманова А. Г. Структура субдукционной зоны Южно-Каспийской впадины и сейсмичность. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 6. С. 188—196. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111065>.
- Кульчицкий В. Е. Оценка параметров затухания интенсивности анизотропных макросейсмических полей. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 2. С. 138—149. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014.116127>.
- Любушин А. А. Прогностические свойства случайных флуктуаций геофизических характеристик. *Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера»*. 2014. Т. 6. № 4. С. 319—338.
- Малицкий Д. В., Грицай О. Д., Муйла О. О., Кутнів О. І., Козловський Е. М. Визначення механізмів вогнищ землетрусів Карпатського регіону. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 118—135. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.116032>.
- Мишин С. В., Панфилов А. А., Хасанов И. М. Изостазия и сейсмичность. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 2. С. 154—163. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128937>.
- Николаевский В. Н., Собисевич Л. Е. Природа бифокального очага землетрясения и предвестники удара. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 4. С. 51—74. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111125>.
- Пат. 124943 UA. Спосіб довгострокового прогнозування координат епіцентру наступного землетрусу. В. В. Нагорний. Опубл. 25.04.2018а, Бюл. № 8.
- Пат. 126808 UA. Спосіб прогнозування часу чергового землетрусу. В. В. Нагорний. Опубл. 10.07.2018б, Бюл. № 13.
- Пат. 127519 UA. Спосіб прогнозування сили передбачуваного землетрусу. В. В. Нагорний. Опубл. 10.01.2018в, Бюл. № 2568.
- Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. Москва: Мир, 1978. 388 с.

- Рихтер Ч. Ф. Элементарная сейсмология. Москва: Изд-во иностр. лит., 1963. 665 с.
- Москва-Ленинград: ОГИЗ ГИТЛА, 1948. 154 с.
- Рокитянский И. И., Бабак В. И., Терешин А. В. Вариации геомагнитных функций отклика в Японии. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 4. С. 126—138. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111133>.
- Цветкова Т. А., Бугаенко И. В., Заец Л. Н. Землетрясения Центральной Италии и скоростное строение мантии. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 2. С. 48—66. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128929>.
- Собисевич Л. Е., Старостенко В. И., Рогожин Е. А., Лутиков А. И., Собисевич А. Л., Канониди К. Х., Кендзера А. В., Орлюк М. И. Аномальные геофизические и сейсмо-тектонические процессы, наблюдавшиеся в период подготовки и развития землетрясения с магнитудой 8,8 в Мауле 2010 г. (Чили). *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 6. С. 25—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91957>.
- Шапка В. М., Ляшук О. І., Андрущенко Ю. А., Корнієнко І. В., Грабченко В. В. Система раннього оповіщення про потужні підкоркові землетруси зони Вранча. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 138—144. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107788>.
- Степанов Р. Н. Сферическая тригонометрия. Юрков Ю. Ф., Гиттис В. Г. О связи сейсмичности с фазами приливных волн. *Физика Земли.* 2005. № 4. С. 4—15.

Earthquake forecasting by the results of the seismic signal trend analysis

V. V. Nagorny, 2018

In the article, using the example of earthquakes that occurred in Japan in 2003 and 2011, the results of the method verification proposed by the author for destructive earthquakes prediction are given. The method involves the identification of zones with a seismic signal level higher in relation to the surrounding areas, the construction of a seismic signals total trend registered at each of the seismic stations located in this zone. The total trend is approximated by the trend model. The model is designed in such a way that the predicted parameters: the time of the earthquake and the coordinates of its epicenter are included in its mathematical structure. These parameters are determined in the parametric identification process of the model based on the results of seismic signals regular monitoring performed on each of the reference seismic stations. Further, on the basis of these data and the known strength of the reference earthquake, the strength of the future earthquake is determined. Verification showed that the prediction of earthquakes, carried out in accordance with the method considered in the article, has a high degree of reliability and stable repeatability of the forecast throughout the entire period of observation of the developing earthquake. This property of the technique is explained by the fact that it is based on the study of the dynamics of the change in the prognostic trait, and not on the generally accepted current consideration of the current (static) value of the trait. Positive results of verification served as the basis for the approbation of the method, which allowed predicting the time, coordinates of the epicenter and the strength of the ripening earthquakes in the Nanking Valley area.

Key words: earthquake prediction, seismic signal level, reference seismic station, earthquake epicenter, earthquake strength, trend of prognostic sign, approbation and verification of the forecast.

References

- Dovbnya, B. V. (2014). Electromagnetic precursors of earthquakes and their frequency. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(3), 160—165. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i3.2014.116069> (in Russian).
- Zavyalov, A. D. (2006). *Medium-term forecast of*

- earthquakes: basics, methodology, implementation*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Zamanova, A. H. (2014). The structure of subduction zone of the South Caspian basin and seismicity. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(6), 188—196. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111065> (in Russian).
- Kulchitskiy, V. E. (2014). Valuation of extinction parameters of anisotropic macro-seismic wave intensities. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(2), 138—149. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i2.2014.116127> (in Russian).
- Lyubushin, A. A. (2014). Prognostic properties of stochastic variations of geophysical parameters. *Mezhdisciplinarnyy nauchnyy i prikladnyy zhurnal «Biosfera»*, 6(4), 319—338 (in Russian).
- Malytskiy, D. V., Hrytsay, O. D., Muyla, O. O., Kutniv, O. I., & Kozlovskyy, E. M. (2014). Specification of mechanisms of earthquake sources in the Carpathian region. *Geofizicheskiy zhurnal*, 36(4), 118—135. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.116032> (in Ukrainian).
- Mishin, S. V., Panfilov, A. A., & Khasanov, I. M. (2018). Isostasy and seismicity. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(2), 154—163. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128937> (in Russian).
- Nikolayevskiy, V. N., & Sobisevich, L. E. (2015). The nature of bifocal source of the earthquake and precursors of the blow. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(4), 51—74. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111125> (in Russian).
- Nagorniy, V. V. (2018a). Pat. 124943 UA. The method of long-term prediction of coordinates of the epicenter of the next earthquake. Date of publication 25.04.2018. Bull. No. 8 (in Ukrainian).
- Nagorniy, V. V. (2018b). Pat. 126808 UA. A method of forecasting the time of a regular earthquake. Date of publication 07.10.2018. Bull. No. 13 (in Ukrainian).
- Nagorniy, V. V. (2018c). Pat. 127519 UA. Method of predicting the strength of the predicted earthquake. Date of publication 10.01.2018. Bul. No. 2568. (in Ukrainian). Rikitake, T. (1979). *Prediction of earthquakes*. Moscow: Mir (in Russian).
- Rixter, C. F. (1963). *Elementary seismology*. Moscow: Izdatelstvo Inostrannoy Literatury (in Russian).
- Rokityansky, I. I., Babak, V. I., & Tereshyn, A. V. (2015). Variations of geomagnetic response functions in Japan. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(4), 126—138. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111133> (in Russian).
- Sobisevich, L. E., Starostenko, V. I., Rogozhyn, E. A., Lutikov, A. I., Sobisevich, A. L., Kanonidi, K. H., Kendzera, A. V. & Oryuk, M. I. (2012). Abnormal geophysical and seismotectonic processes observed during the period of preparation and development of the earthquake with a magnitude of 8,8 Maule 2010 (Chile). *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(6), 25—39. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i6.2016.91957> (in Russian).
- Stepanov, R. N. (1948). *Spherical trigonometry*. Moscow-Leningrad: State publ. technical and theoretical literature (in Russian).
- Tsvetkova, T. A., Bugaenko, I. V., & Zaets, L. N. (2018). Earthquake in central Italy and velocities structure of the mantle. *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(2), 48—66. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128929> (in Russian).
- Shapka, V. M., Lyaschuk, O. I., Andrushchenko, Yu. A., Kornienko, I. V., & Grabchenko, V. V. (2016). The system of early warning on strong sub-crustal earthquakes of the Vrancea zone. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(3), 138—144. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107788> (in Ukrainian).
- Yurkov, Yu. F., & Gittis, V. G. (2005). On the connection of seismicity with the phases of tidal waves. *Fizika Zemli*, (4), 4—15 (in Russian).