

**ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ТИПОВЫЕ ПРОГНОЗНЫЕ ПРИЗНАКИ,
РАСШИРЕНИЕ НАБОРА ПРИЗНАКОВ**

М. В. Родкин^{1,*}, А. А. Любушин², Е. В. Липеровская²

¹*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия*

²*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Проблема прогноза землетрясений – актуальная задача науки. Научное сообщество прошло путь от надежды на скорое получение прогноза, через как-бы доказательство невозможности прогноза, до доказательства в реальном времени: лучшие алгоритмы прогноза работают много лучше случайного угадывания (но не отвечают практическим требованиям). Препятствиями в получении эффективного прогноза полагаются сильная изменчивость сейсмического режима, отсутствие развитой физической модели сейсмического процесса и неучет различия разноглубинных землетрясений, недостаточное развитие методологии прогноза. По этим вопросам в последнее время был достигнут определенный прогресс.

В результате анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) был детально описан набор типовых прогнозных аномалий, различающихся для разноглубинных землетрясений [1].

Для мировых ISC-GEM и GCMT и региональных каталогов землетрясений Камчатки и Японии было показано, что для достаточно полных каталогов вероятность выделения в форшоковой зоне целевых M_0+ землетрясений одной и более типовой прогнозной аномалии составляет более 80% (для каталогов с уровнем регистрации $M_c = M_0 - 4$).

Практическая ценность таких прогнозов, однако, существенно снижается большим числом ложных тревог. Одним из возможных путей решения может быть увеличение числа независимых прогнозных признаков. Но насколько надежны такие признаки?

В качестве примера дополнительного признака рассмотрим, вполне типичный, случай сейсмоионосферных аномалий. За сейсмоионосферные аномалии принимают возникновение повышенных или пониженных значений плотности ионизации в пространственно-временной окрестности землетрясений. Теория может служить в исследовании сейсмоионосферных эффектов лишь слабым ориентиром. Поведение ионосферы очень изменчиво; при разных событиях могут наблюдаться самые разные эффекты. Поэтому следует ограничиться случаями статистических аномалий. Но и тогда единообразия результатов не наблюдается.

Для верификации реальности сейсмоионосферных аномалий актуально применение разных статистических подходов на возможно более однородном и качественном массиве данных большой продолжительности. В качестве такого массива используются данные вертикального зондирования по станции Токио за 1957–2020 гг.

Анализ данных проводился методом наложения эпох и новым методом выявления скрытых взаимосвязей между двумя рядами данных. Первый, стандартный, подход показал тенденцию развития положительной аномалии за несколько дней до сейсмического события и отрицательной – после [2 и др.]. Вторым методом [3, 4] выявляются формальные связи между моментами землетрясений и характеристиками данных вертикального зондирования. Наиболее информативными оказались огибающие вейвлет-разложения ряда уровня детальности, отвечающего интервалу времени несколько (2–5) дней. Второй метод так же показал, что землетрясениям предшествуют положительные аномалии в данных вертикального зондирования ионосферы, и что землетрясения сопровождаются отрицательными аномалиями. Характерная длительность аномалий и знак аномалий по результатам двух методов совпали.

Вышесказанное указывает на достоверность сейсмоионосферных аномалий и допустимость включения их (аналогично другим верифицированным физическим предвестникам) в алгоритм прогноза на основе типовых ООСЗ аномалий.

Литература

1. Rodkin M.V. A Typical Foreshock and Aftershock Anomaly: Observations, Interpretation, and Applications // Journal of Volcanology and Seismology. 2020. Vol. 14. No. 1. P. 58–69.
2. Rodkin M.V., E.V. Liperovskaya. On the differences in the physical mechanisms of earthquakes at different depths and the nature of their ionospheric response // Physics of the Earth. 2023. No. 3. P. 48–62.
3. Lyubushin A., Rodionov E. Prognostic Properties of Instantaneous Amplitudes Maxima of Earth Surface Tremor // Entropy. 2024. Vol. 26. P. 710. <https://doi.org/10.3390/e26080710>
4. Lyubushin A., Rodionov E. Quantitative Assessment of the Trigger Effect of Proton Flux on Seismicity // Entropy. 2025. Vol. 27. P. 505. <https://doi.org/10.3390/e27050505>

EARTHQUAKE FORECASTING: TYPICAL FORECAST INDICATORS, EXPANSION OF THE SET OF INDICATORS

M. V. Rodkin^{1,*}, A. A. Lyubushin², E. V. Liperovskaya¹

¹*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian academy of sciences, Moscow, Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: rodkin@mitp.ru

Earthquake forecasting is a pressing scientific challenge. The scientific community has evolved from hoping for a quick forecast, through seemingly demonstrating the impossibility of forecasting, to real-time proof that the best forecasting algorithms perform significantly better than random guessing (but fall short of practical requirements). Obstacles to effective forecasting include the high variability of the seismic regime, the lack of a developed physical model of the seismic process, the failure to account for the differences between earthquakes at different depths, and the insufficient development of forecasting methodology. Some progress has been made recently in these areas.

Analysis of the generalized vicinity of large earthquakes (GVLE) resulted in a detailed description of a set of typical forecast anomalies that differ for earthquakes at different depths. For the global ISC-GEM and GCMT earthquake catalogs and regional earthquake catalogs for Kamchatka and Japan, it was shown that for sufficiently complete catalogs, the probability of identifying one or more typical forecast anomalies in the foreshock zone of target M_0+ earthquakes is over 80% (for catalogs with a recording level of $M_c = M_0 - 4$).

The practical value of such forecasts, however, is significantly reduced by the high number of false alarms. One possible solution may be to increase the number of independent forecast features. But how reliable are such features?

As an example of an additional feature, let's consider the quite typical case of seismoionospheric anomalies. To verify the reality of seismoionospheric anomalies, it is important to apply various statistical approaches to the most homogeneous and high-quality long-term data set possible. Vertical sounding data from the Tokyo station for 1957–2020 is used.

The data was analyzed using the epoch superposition method and the method for identifying hidden relationships between data series. The first, standard approach showed a tendency for a positive anomaly to develop several days before a seismic event and a negative one after. The second method identifies relationships between earthquake timing and vertical sounding data characteristics. The most informative results were obtained from the wavelet decomposition envelopes of a series at a detail level corresponding to a time interval of several (3) days. The second method also showed that earthquakes are preceded by positive anomalies in vertical ionospheric sounding data, and that earthquakes are accompanied by negative anomalies. Both the characteristic duration of the anomalies and the sign of the anomalies were consistent across the two methods.

This indicates the reliability of seismoionospheric anomalies and the admissibility of including them in the forecast algorithm based on GVLE anomalies.