

В.И. Акселевич, А.В. Тертышников

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Рассмотрены методические аспекты использования данных озонотрии для прогнозирования сильных землетрясений. Анализ скрытых сейсмогенных периодичностей в данных озонотрии проведен на основе модели маятника Максвелла. Отмечен эффект образования озонной <микродыры> над очагами сильных землетрясений. Результаты предлагается использовать в системе экологического мониторинга и слежения за изменением климата.

Изменение земной климатической системы и постоянное возрастание антропогенных нагрузок на экосистемы в последнее время все чаще приводят к неблагоприятным для жизнедеятельности человека условиям. В связи с этим растет практический интерес к проблеме контроля состояния природной среды в целях предвидения развития процессов неблагоприятной направленности. Для решения этой проблемы создаются прикладные системы контроля состояния природной среды, обеспечивающие измерение требуемых характеристик атмосферы и дальнейшую обработку полученной информации. Учитывая взаимодействие процессов в различных оболочках Земли, вполне обоснованным представляется поиск возможностей использования данных экологического мониторинга атмосферы для прогнозирования сейсмического режима.

К числу наиболее опасных для человечества стихийных бедствий относятся сильные землетрясения. Анализ последствий таких землетрясений связан с поиском их предвестников в состоянии геофизических полей различных оболочек Земли и с изучением соответствующих механизмов их взаимодействия. Эта проблема получила существенное развитие в исследованиях эффектов сейсмо-ионосферного взаимодействия [1].

Существующие представления о механизмах взаимодействия предвестниковых возмущений литосферы с ионосферой базируются на двух основных подходах [1]: первый – на теории распространения в атмосфере внутренних гравитационных волн (ВГВ) и инфразвука, второй – на взаимодействии через возмущения электромагнитного поля Земли в зонах подготовки землетрясений. Анализ предвестников землетрясений в относительно электрически-нейтральной средней атмосфере мог бы уточнить некоторые характеристики механизмов взаимодействия геосфер, а учитывая особенности распространения ВГВ, – оптимизировать функционирование сейсмологической сети. Эти данные были бы весьма полезны и для решения задач экологического и климатического мониторинга. Однако результаты поиска предвестников сильных землетрясений между литосферой и ионосферой встречаются в литературе крайне редко [2,3].

В качестве характеристики состояния средней атмосферы можно использовать общее содержание атмосферного озона (ОСО) и исследовать его в плане поиска предвестников сильных землетрясений в стратосфере. В сложной пространственной структуре возмущений геофизических полей следует ожидать лучшего проявления предвестниковых эффектов над сейсмо-тектоническими аномалиями (СТА), которые целесообразно представить в виде своеобразной <мембраны>, состоящей из отдельных самоорганизующихся литосферных блоков. В этой связи имеет смысл использовать некоторые результаты исследований величины ОСО над такими источниками ВГВ, как циклоны и антициклоны.

Приведенные в [4,5] результаты свидетельствуют о пониженном ОСО над циклонами и повышенном над зонами антициклонической циркуляции. Циклоны и антициклоны могут рассматриваться как гигантские источники ВГВ (также упрощенно представляемые как своеобразные <мембраны>). Изменения ОСО обусловлены динамическими факторами взаимодействия ВГВ с зональными потоками.

Спектр и энергия генерируемых подобными <мембранами> ВГВ зависят от размеров, структуры и особенностей эволюции барических образований. Учитывая линзовые свойства

атмосферы для распространения ВГВ, в [6] по результатам численного моделирования показана возможность существования над барическими образованиями резонансных высот для энергии ВГВ от отдельных когерентных источников, составляющих <мембрану> и обладающих элементами подобия. В связи с этим результаты, полученные в [4,5], можно рассматривать в качестве аналогов волновой <деятельности> СТА в атмосфере.

Консолидация литосферных блоков в СТА приводит к изменению ее массовых и термодинамических характеристик, к увеличению когерентности движений составляющих СТА. Анализ эволюции предвестниковых эффектов сильных землетрясений позволяет предположить возрастание частоты движений СТА за несколько недель до сейсмического события и возможность резонансных эффектов движений СТА в предвестниковых возмущениях геосфер. Поэтому для прогноза периодов повышенной сейсмической активности предлагается использовать результаты физико-математического моделирования маятниковых движений.

Теория маятниковых движений широко используется в исследованиях теории ползучести и длительной прочности материалов при описании процессов релаксации напряжений. В основе моделирования – модели маятников Максвелла и Фойгта. Хотя они не дают удовлетворительного согласия с результатами лабораторных экспериментов, однако неплохо качественно отражают некоторые аспекты эволюции аномальных напряжений в веществе. Эти модели являются комбинацией упругого элемента (пружина) и вязкого элемента (поршень), рис. 1.

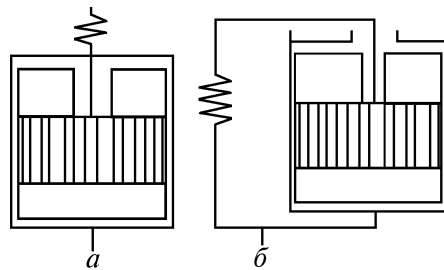


Рис. 1. Модели маятников: а – Максвелла; б – Фойгта

Рассмотрим подробнее модель Максвелла применительно к описанию движений очага подготовки землетрясения, как генератора импульсов переменной частоты. Если бы изменения частоты колебаний очагов подготовки землетрясений подчинялись устойчивой зависимости от времени, то анализ последовательных предвестниковых сигналов на фиксированной частоте позволил бы скорректировать и определить дату ожидаемого события. Предположим, что в модели тела Максвелла масса m маятника меняется равномерно и к моменту землетрясения:

$$m = k(t - t_0), \quad (1)$$

где t – текущий момент времени; k – коэффициент пропорциональности; t_0 – время начала отсчета (учитываем, что время уменьшается к моменту землетрясения).

Коэффициент упругости пружины обозначим через K_u . Предположим также выполнение закона сохранения энергии:

$$K + \Pi = \text{const}, \quad (2)$$

где K – кинетическая энергия маятника; Π – потенциальная энергия пружины;

$$K = m W^2 / 2, \quad (3)$$

где W – скорость движения маятника,

$$\Pi = K_u x^2 / 2, \quad (4)$$

а x – координата смещения маятника.

Дифференцируя выражение для полной энергии (2) и вводя новый масштаб времени

$$\tau = k(t - t_0), \quad (5)$$

получим

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + \frac{1}{2\tau} \frac{dx}{d\tau} + \frac{K_u x}{k^2 \tau} = 0. \quad (6)$$

Решение этого уравнения имеет следующий вид:

$$x = A \sin \beta \sqrt{\tau}; \quad \beta = 2 \sqrt{\frac{K_u}{k^2}}. \quad (7)$$

Фаза колебаний

$$\Phi(\tau) = \beta \sqrt{\tau}, \quad (8)$$

а частота колебаний согласно теории нелинейных колебаний

$$\omega(\tau) = \frac{d\Phi}{d\tau} = \frac{\beta}{2\sqrt{\tau}}. \quad (9)$$

Введенный масштаб времени совпадает с размерностью массы и по физическим соображениям не может быть отрицательным. Поэтому рассмотренное уравнение описывает колебания убывающей частоты при линейном увеличении массы. Активизация высокочастотных колебаний в зоне СТА непосредственно перед землетрясением, очевидно, связана с разрушением области неоднородности – очага землетрясения. Она может быть описана полученным уравнением, но только при допущении резкого уменьшения массы маятника до момента t_0 – времени основного толчка землетрясения.

Проблемы описания движений СТА по модели тела Максвелла связаны с неопределенностью и недостоверностью сведений о количественных характеристиках процесса подготовки землетрясения. Кроме того, в системах с пространственно-временными геологическими масштабами инерционные силы, пропорциональные ускорению, не играют существенной роли.

Исходя из данной модели, можно рассматривать очаг готовящегося землетрясения в качестве генератора импульсов возрастающей частоты, а наблюдательная озонометрическая система предстанет в виде резонатора, обладающего устойчивым собственным спектром колебаний. Возникновение наиболее четкого прогнозного сигнала будет связано с эффектом резонанса между генератором колебаний и наблюдательной системой. Если существует резонанс на кратных частотах в последовательные моменты времени n и m с отношением частот

$$\omega(\tau_m) / [\omega(\tau_n)] = n / m, \quad (10)$$

где n и m целые числа, то согласно [7]

$$\beta / 2 \sqrt{\tau_m} = 2 \sqrt{\tau_n} / \beta = n / m, \quad (11)$$

откуда

$$\tau_n / \tau_m = n^2 / m^2. \quad (12)$$

При использовании нескольких последовательных предвестников с помощью последнего соотношения можно уменьшить вероятность ложной тревоги в прогнозе землетрясения, обусловленной случайными вариациями анализируемого предвестника. Возможные помехи могут быть вызваны перекрытием прогнозных сигналов от близких СТА и их взаимодействием. Это важное обстоятельство необходимо учитывать при поиске момента наиболее сильного – основного землетрясения. Остальные землетрясения с меньшей интенсивностью могут подразделяться на предварительные (форшоки) и последующие (афтершоки) толчки, связанные с основным сейсмическим событием.

В рассмотренной нелинейной модели движений СТА, разработанной по аналогу известной модели маятника Максвелла, в наиболее простой форме увязан процесс подготовки землетрясения с фиксированным моментом его основного толчка. Это дает определенные преимущества в сравнении с традиционным подходом, основанным на теории линейных колебаний, в котором невозможно выделить приоритет главного события перед предварительными и последующими толчками, так как любая из точек системы может стать начальной точкой колебательного процесса.

По описанной модели для землетрясений Камчатки 1972–1989 гг. были проведены расчеты скрытых сейсмогенных периодичностей в типизированных данных озонотрии. Для этого использовался специально введенный коэффициент <связности>, похожий на коэффициент корреляции [8]. Его величина должна отражать взаимосвязь локальных экстремумов в типизированной озонотрии с периодичностью, определенной по соотношению резонансных колебаний. При этом точная величина связи не требуется и потому в качестве характеристики <связности> использовалось соотношение

$$A(k, t) = \sum_{n, m} \frac{v(\tau_m) v(\tau_n)}{L}, \quad (13)$$

где $v(\tau_m)$ и $v(\tau_n)$ – повторяемости появления локальных экстремумов в опорный момент времени $t_0 = \text{const}$ и вдоль анализируемого временного отрезка с переменной t ; L – сумма слагаемых в числителе, которую можно представить через число сочетаний чисел m и n .

На рис. 2 представлен один из серии полученных графиков коэффициента $A(k = 1,5 \dots 2,5, t_0 = 7 \text{ дней})$ связности локальных минимумов в данных озонотрии для мелкофокусных землетрясений (МЗ) Камчатки на фоне его естественных вариаций, полученных по <независимой> выборке. Время $t_0 = 7$ дней до МЗ выбрано из-за повышенной повторяемости локальных минимумов в этот день, почти вдвое превышающей фон. В диапазоне $k = 1,8 \dots 1,9$ коэффициент <связности> сейсмогенной озонотрии почти в полтора раза превышает его естественные вариации. Это подтверждает правомерность использования модели маятника Максвелла для прогнозирования землетрясений.

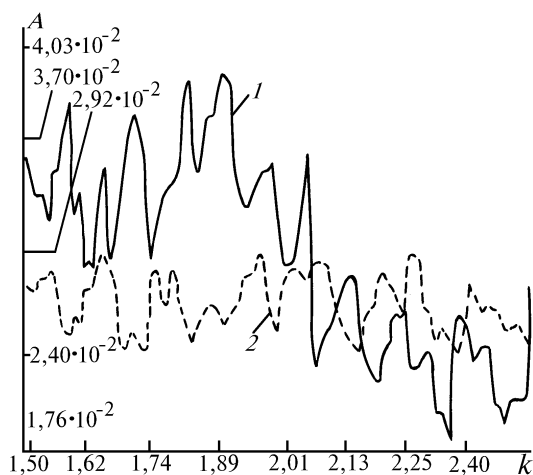


Рис. 2. Изменение связности локальных минимумов в данных озонотрии для мелкофокусных землетрясений: 1 – кривая коэффициентов связности, 2 – кривая фоновых возмущений

По графикам типа рис. 2, иллюстрирующим наличие сейсмогенных резонансов в данных озонотрии со станции Петропавловск–Камчатский, были выделены оптимальные диапазоны k , которые были использованы в программной реализации блока анализа сейсмогенных периодичностей в текущих данных озонотрии.

Полученные сейсмогенные периодичности в данных озонотрии могут быть свидетельством функционирования механизма лито-страто-ионосферного взаимодействия через ВГВ. Поэтому представляют интерес исследования климатических последствий сейсмоозонных эф-

фектов. Использование простейшей модели маятника Максвелла позволило выделить сейсмогенные периодичности в данных озонотрии. На их основе может быть разработана методика краткосрочного (за несколько дней – месяц до сильного землетрясения) прогнозирования периодов повышенной сейсмической активности. Предварительная оценка ее оправданности на Камчатке составила 50–70%, что не хуже результатов прогноза другими способами [9]. Однако заблаговременность оповещения о возможности сильного землетрясения несравненно выше.

В результате исследований сейсмоозонных эффектов была установлена целесообразность использования не только моделирования и поиска скрытых закономерностей, но и нормирования данных ОСО, их типизации. Для МЗ Камчатки проверка гипотезы о соответствии аномальных сейсмогенных предвестниковых выбросов ОСО их аномальным естественным вариациям из <независимой> выборки позволила оценить пригодность прогностических эффектов за 49, 48, 47 дней до момента МЗ (вероятность отличия не менее 80%), за 46 (95), за 33 и 29 (80), за 28 дней до МЗ (не менее 95%), и за 21 день (80%). Представляет несомненный интерес образование озонной <микродыры> над очагом произошедшего землетрясения. Этот эффект подтверждается по Камчатке, Средней Азии, Калифорнии, Кавказу и для Японии.

Полученные результаты могут быть основой разработки тематического задания на проектирование системы контроля сейсмического режима по данным озонотрии для глобальной наземно-космической системы экологического мониторинга и слежения за изменениями климата.

1. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
2. Асатрян Г.А., Асатрян Гр.А., Бабалян В.Х. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1991. Т. 55. N 10. С. 1979–1981.
3. Искандарова В.М. // Атмосферный озон. Труды Всесоюзной конференции по атмосферному озону. Суздаль, октябрь 1988 г. М.: ГМИ, 1990. С. 224–225.
4. Уранова Л.А. // Атмосферный озон. М.: Наука, 1982. С. 122–127.
5. Уранова Л.А. // Атмосферный озон. М.: Наука, 1982. С. 127–132.
6. Гаврилов Н.М., Медведев А.С. // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. М.: ГМИ, 1988. С. 184–187.
7. Беляев А.А. // Геохимия. 1991. N 7. С. 1061–1068.
8. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики. М.: Финансы и статистика, 1982. 344 с.
9. Одетов О.А. Землетрясения. М.: Знание, 1988. 48 с. (Новое в жизни, науке, технике. Сер. < Науки о Земле>. 1988. N 11).

Военная инженерно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург
Российский государственный гидрометеорологический институт, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
28 декабря 1994 г.

V.I. Akselevich, A.V. Tertyshnikov. Methodology of Ecology Monitoring Data Application to Seismic Forecasting.

Methodological problems of the ozonometry data use in forecasting strong earthquakes are treated in the paper. Analysis of latent seismogenic periodicities in the ozonometry data is conducted based on Maxwell pendulum model. The phenomena of ozone <microhole> formation over seismic centers of strong earthquakes is noted. We propose to use the results obtained in systems of ecology monitoring and climate variations observing.