МЕТЕОРОЛОГИЯ

В.Н. Боков, В.Н. Воробьев

ПРОГНОЗЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ

V.N. Bokov, V.N. Vorobyev

PREDICTIONS OF SEISMIC EVENTS USING GEOPHYSICAL AND ATMOSPHERIC PRECURSORS

В статье проведено сравнение характеристик геофизических и атмосферноциркуляционных предвестников, используемых при прогнозе Великого японского землетрясения 11 марта 2011 г.

Ключевые слова: геофизический предвестник, атмосферно-циркуляционный предвестник, краткосрочный прогноз землетрясений, деформационные процессы, низкочастотный сейсмический шум.

The article describes a comparison of the characteristics of geophysical and atmospheric circulation precursors used in the prediction of Great Japan earthquake 11 of March 2011.

Keywords: geophysical harbinger, atmospheric circulation precursor, short-term earthquake prediction, deformation, low-frequency seismic noise.

Геофизические предвестники сейсмических событий различают на долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные [15]. Однако существует тенденция придавать среднесрочным предвестникам роль краткосрочных. В этих случаях ретроспективно приписывают дату случившегося мощного землетрясения среднесрочному прогнозу, хотя в прогнозе указывается заблаговременность во временном интервале от 6 и более месяцев. Часто это связано с тем, что краткосрочные предвестники землетрясений плохо определяются [15, 16].

Специалисты, создающие методы краткосрочных прогнозов, обычно абсолютизируют значимость отдельно взятого предвестника. Практическое применение, казалось бы, достоверного предвестника обычно заканчивалось превращением такого предвестника в «мерцающий призрак» [16]. Например, М.Г. Савин ссылается на свой горький опыт: «Четверть века назад был предложен новый электромагнитный предвестник землетрясений. Численное моделирование показало, что в очаге резко изменяются импедансы (аналоги сопротивления для волновых процессов) быстрых колебаний естественного электромагнитного поля Земли. Чем не прогностический признак? Я был уверен, что он гарантирует точный прогноз, тем более что корреляция аномального поведения импедансов с сейсмической активностью на Камчатке была налицо. Со временем, однако, мой бесспорный признак перешел в разряд призраков» [16].

Специалисты утверждают, что все известные предвестники землетрясений появляются в результате воздействия на них деформационных процессов. В связи с этим можно предположить, что большинство зафиксированных предвестников землетрясений, за исключением деформации и наклонов земной коры, являются вторичными. Тем не менее дополнительная геофизическая информация является полезной в таком сложном процессе, как краткосрочный прогноз землетрясений.

Достаточно часто в качестве предвестника землетрясений пытаются использовать высокочастотный микросейсмический шум, который повсеместно наблюдается в земной коре и имеет много источников [8, 9, 11]. Сейсмоакустическая эмиссия возникает в твердых горных породах земной коры в основном из-за изменения их напряженного состояния, движения флюидов и прохождения волновых колебаний от сильных землетрясений, а также от воздействия штормов, гроз, водопадов, обвалов и оползней. Исследования последних лет показали, что в подавляющем числе случаев сейсмоакустическая эмиссия возникает в результате деформации земной поверхности под воздействием атмосферных вихрей, генерирующих волновые колебания [2, 5, 6, 11, 14].

В работах [10, 13] утверждается, что «последние исследования сейсмических шумов привели к осознанию того, что именно их статистические характеристики содержат в себе наиболее ценную прогностическую информацию». В соответствии с работами [10, 13] низкочастотный сейсмический шум позволяет осуществлять среднесрочный прогноз времени и места сильных землетрясений. Рассчитываемые статистики низкочастотного сейсмического шума имеют физические принципы [10, 13]. Кратко они заключаются в следующем. Предполагается консолидация малых блоков земной коры в структуру большого размера, формирующую очаг будущего землетрясения. При этом среднее значение обобщенного показателя Херста α и ширины носителя спектра сингулярности $\Delta \alpha$ в случае возникновения землетрясения стремятся к низким значениям [10]. Однако низкие значения этих параметров могут быть обусловлены взаимными движениями неконсолидированных малых блоков земной коры [10]. Двойственность формирования низких величин среднего значения обобщенного показателя Херста α и ширины носителя спектра сингулярности $\Delta \alpha$, вызывает неопределенность физического принципа составления прогностических оценок. Подчеркнем лишь то, что формирование низкочастотного сейсмического шума в большей мере, по нашему мнению, связано с деформацией земной коры под влиянием изменения атмосферной циркуляции [2, 4-7].

На примере землетрясения 11 марта 2011 г. у Японии (M = 9,0), приведшей к многочисленным жертвам, рассмотрим прогноз этой катастрофы по оценке повышенной корреляции свойств шумов геофизических полей при использовании данных GPS наблюдений [13] и атмосферно-циркуляционных предвестников [1–7].

Не останавливаясь на подробностях расчетов, выполняемых в работе [13], отметим лишь исходные данные и суть исследований. Рассматривались поля GPS-сигналов, зарегистрированных на Японских островах с 30 января по 26 марта 2011 г. сетью из 1203 стационарных станций. Временной интервал включал в себя чуть более 40 суток до мегаземлетрясения 11 марта 2011 г. и почти 16 суток после него. Зарегистрированные

сигналы представлялись в виде трехкомпонентных временных рядов с 30-минутным шагом по времени. Исследовались статистические свойства случайных флуктуаций GPS-сигналов после перехода к приращениям до и после сейсмической катастрофы. В качестве предвестника землетрясения использовались значения максимального нормированного собственного числа корреляционной матрицы размером 3×3 для главных компонент трех характеристик GPS-шума — μ_p . Данное число определяет меру синхронизации в пространстве вариаций главных компонент трех характеристик шума. Слева на рис. 1 представлена карта значений μ_p , построенная по данным до землетрясения.





Выполненный авторами [13] анализ показал, что значения μ_p до землетрясения значительно превосходят их значения после события. Область максимальных значений μ_p до сейсмического события включает в себя эпицентр будущего землетрясения, тогда как после события в зоне вокруг эпицентра наблюдается слабая корреляция шумов.

Данный анализ легко выполнить, поскольку в ретроспективе известны координаты эпицентра. Отметим, что центр области максимальных значений µ_p находится на 250 км южнее от эпицентра, а вся область простирается на 500 км к югу и покрывает территорию Японии.

Области с максимальных значений µ_p также находятся и над Японским морем, поэтому точно определить координаты эпицентра данного землетрясения по данным значений максимальных значений µ_p практически очень сложно. Также сложно определить дату землетрясения, поскольку для расчетов необходимы временные представительные ряды в реальном режиме времени, что затрудняет определение даты катастроф. Тем более что ретроспективно выполненные исследования ориентированы только на дату 11 марта, хотя сильное землетрясение произошло и 9 марта с M = 7,2 в эпицентре близком к эпицентру 11 марта.

Обратимся к анализу атмосферно-циркуляционных предвестников [3, 4] для рассматриваемых землетрясений и составленных краткосрочных прогнозов (с заблаговременностью за 2 суток). Подчеркнем, что в отличие от подхода статистической оценки GPS-шума мониторинг атмосферно-циркуляционных предвестников позволяет ежедневно оценивать вероятность сейсмического события в любой точке Земли. Это позволило определить высокую вероятность землетрясения 9 марта 2011 г. у Японии в эпицентре близком к эпицентру 11 марта. На рис. 2 представлены параметры данного землетрясения.



Рис. 2. Параметры сильного землетрясения 9 марта 2011 г.

Поле атмосферного давления представлено на рис. 3. Из рисунка видно, что местоположение эпицентра находится на периферии мощных атмосферных вихрей антициклона и циклона. Пространственное распределение барических нагрузок отражено на рис. 4, значение изолинии «нулевой» деформации [2, 6] позволяет вывить местоположение эпицентра землетрясения. Обе карты входят в комплект данных атмосферно-циркуляционного предвестника, который позволил определить дату и место землетрясения 9 марта 2011 г.



Рис. 3. Поле атмосферного давления на 9 марта 2011 г.



Рис. 4. Поле барической нагрузки на 9 марта 2011 г. Эпицентр землетрясения отмечен звездочкой

Прогностическая карта на 9 марта 2011 г. для территории Северного полушария, на которой указан эпицентр у Японии, была выставлена в сеть Интернета 7 марта 2011 г. Копия этой карты представлена на рис. 5.



Forecast 09.03.2011 - done 07.03.2011

Рис. 5. Прогностическая карта землетрясений, составленная 7 марта 2011 г.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Аналогичный подход, но на основе другого атмосферно-циркуляционного предвестника, позволил спрогнозировать землетрясение 11 марта 2011 г. Поле атмосферного давления представлено на рис. 6. Из рисунка видно, что местоположение эпицентра находится уже не на периферии атмосферных вихрей, а ближе к центру антициклона. В целом поле пространственного распределения атмосферного давления уже другое. Пространственное распределение барических нагрузок отражено на рис. 7, которое также отличается от барического поля для 9 марта. Неизменным остается лишь то, что значение изолинии «нулевой» деформации указывает местоположение эпицентра землетрясения.



Рис. 6. Поле атмосферного давления на 11 марта 2011 г.



Рис. 7. Поле барической деформации на 11 марта 2011 г. Эпицентр землетрясения отмечен звездочкой

Прогностическая карта на 11 марта 2011 г. для территории Северного полушария, на которой указан эпицентр у Японии, была выставлена в сеть Интернета 9 марта 2011 г. [4]. Копия этой карты представлена на рис. 8.

Для Японских островов в настоящее время составлен банк атмосферно-циркуляционных предвестников, включающий 332 случая землетрясений с магнитудой \geq 6. Это позволяет достаточно уверенно составлять краткосрочные прогнозы землетрясений с магнитудой \geq 6. Для достижения достаточной точности, для практики прогноза землетрясений, атмосферно-циркуляционные предвестники должны дополняться геофизическими предвестниками в целях оценки отклика изменений земной коры на атмосферные изменения. Представленные выше исследования и расчеты позволяют сделать заключение о прогностической информативности сейсмических событий на примере повышенной корреляции свойств шумов геофизических полей при использовании данных GPSнаблюдений [13] и атмосферно-циркуляционных предвестников [1–7].

Выводы, которые были представлены в работе [13]: «Результаты многомерного анализа свойств шума GPS-сигналов подтверждают гипотезу о повышенной корреляции свойств шумов геофизических полей в области подготовки крупных землетрясений и могут быть использованы при поиске предвестников землетрясений по данным GPS наблюдений».



Forecast 11.03.2011 - done 09.03.2011.

Рис. 8. Прогностическая карта землетрясений, составленная 11 марта 2011 г.

Данные выводы являются чрезмерно общими и не позволяют оценить координаты эпицентра землетрясения по данным значений максимальных значений μ_p , а также определить дату землетрясения. Существенно большей информативностью обладает подход, основанный на использовании атмосферно-циркуляционных предвестников. Представленные прогнозы, выполненные на основе атмосферно-циркуляционных предвестников, позволяют решить то, что не доступно выполнить по результатам многомерного анализа свойств шума GPS-сигналов. Во-первых, прогноз на основе атмосферно-циркуляционных предвестников действительно является краткосрочным, с заблаговременностью за 2 суток. Во-вторых, мониторинг изменения атмосферной циркуляции с большой достоверностью (75–80 %) позволяет определить дату землетрясения и координаты эпицентра. Сила землетрясений определяется несколько хуже — с достоверностью в 50 %, и это является предметом дальнейших исследований и усовершенствования сейсмо-синоптического метода [4]. Более точные краткосрочные прогнозы возможны при совместном использовании данных мониторинга геофизических предвестников и изменений атмосферной циркуляции.

Литература

- 1. *Боков В.Н.* Изменчивость атмосферной циркуляции инициатор сильных землетрясений // Уральский геофиз. вестник. 2004. № 6. С. 5–11.
- Боков В.Н. Увеличение интенсивности проявления геофизических предвестников землетрясений под влиянием изменчивости атмосферного давления / Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле

Земли. Интерпретация геофизических полей // V Межд. конф. чтения Булашевича. — Екатеринбург: УрО РАН, 2009. — С. 46–50.

- 3. Боков В.Н., Гутиабаш Е.Ш., Потиха Л.З. Атмосферные процессы как триггерный эффект возникновения землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. 2011. № 18. — С. 173–184.
- 4. *Боков В.Н.* Когда содрогнется Земля? Краткосрочные прогнозы землетрясений // Наука и Жизнь. 2011. № 9. С. 47–57.
- 5. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* Воздействие атмосферной циркуляции на наклоны земной поверхности // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 27. С. 94–99.
- 6. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Изменчивость геоакустической эмиссии и изменения атмосферной циркуляции // Учен. зап. РГГМУ. 2013. № 32. С. 43–54.
- 7. Боков В.Н., Воробьев В.Н. Мониторинг геофизических предвестников и прогноз землетрясений // Учен. зап. РГГМУ. 2014. № 36. С. 128–137.
- Гаврилов В.А., Морозова Ю.В., Сторчеус А.В. Вариации уровня геоакустической эмиссии в глубокой скважине Г-1 (Камчатка) и их связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. № 1. — С. 52–67.
- 9. Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Купцов А.В. и др. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // Докл. РАН. 2006. Т. 407. № 5. — С. 669–672.
- Копылова Г.Н., Любушин А.А., Касимова В.А., Таранова Л.Н. О разработке новой технологии оценки сейсмической опасности на основе прогностических свойств поля низкочастотных сейсмических шумов (На примере Камчатки) // Сб. мат-лов Всеросс. конф. с междун. участием «Геодинамич. процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска». — С. 115–119.
- 11. *Купцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М.* Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. — С. 45–59.
- 12. Латынина Л.А., Васильев И.М. Деформация земной коры под влиянием атмосферного давления // Физика Земли. 2001. № 5. С. 45–54.
- Любушин А.А., Яковлев П.В., Родионов Е.А. Многомерный анализ параметров флуктуаций GPS сигналов до и после мегаземлетрясения 11 марта 2011 г. в Японии // Геофиз. исслед. 2015. Т. 16. № 1. — С. 14–23.
- Перцев Б.П., Ковалева О.В. Оценка влияния колебаний атмосферного давления на наклоны и линейные деформации земной поверхности // Физика Земли. 2004. № 8. — С. 79–81.
- 15. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.
- 16. Савин М.Г. Лечу землетрясения. Услуги платные // Химия и жизнь. 2005. № 11. С. 8-13.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность О.В. Бенкендорф за помощь в подготовке статьи.