

УДК 550.3

О. В. Золотов

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПОЛНОМ ЭЛЕКТРОННОМ СОДЕРЖАНИИ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Аннотация

Представлены результаты анализа методов и подходов, применяемых для определения аномальных возмущений в работах по сейсмо-ионосферной тематике. Сформулированы основные недостатки этих методов, затрудняющие анализ и интерпретацию данных, сопоставление результатов и их использование для построения комплексных методик прогноза сильных землетрясений.

Ключевые слова:

ионосферные предвестники землетрясений, полное электронное содержание, GPS.

O. V. Zolotov

ON SOME PROBLEMS TOWARDS DETECTION OF STRONG EARTHQUAKES PRECURSORS IN THE EARTH'S IONOSPHERE TOTAL ELECTRON CONTENT OBSERVATIONS

Abstract

The paper presents the analysis' results of the methods applied for anomalies detection in a variety of seismo-ionosphere researches. Here we formulate principle problems on the way to interpret and cross-compare the results for complex strong earthquakes forecast system (method) design and implementation.

Key words:

ionosphere precursors to earthquakes, total electron content, GPS.

Введение

Исследования, направленные на построение надёжных методик прогнозирования сильных землетрясений (т. е. определения их места, времени и магнитуды) ведутся давно и к настоящему времени не имеют адекватного решения. Отсутствие такого решения привело к появлению междисциплинарных работ, в которых анализировались вариации параметров различных "оболочек" Земли, в том числе ионосферы. Доступность большого массива регулярно пополняемых данных полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы способствовала появлению работ, исследующих ПЭС в целях обнаружения ионосферных предвестников землетрясений. В результате сформировались две тенденции среди исследователей: сообщения об успешном обнаружении предвестников в ПЭС ионосферы Земли; сообщения об их отсутствии или принципиальной невозможности их существования.

Проблемы на пути выявления аномальных возмущений

Анализ имеющихся публикаций показал следующие проблемы. Работы, посвящённые поиску ионосферных предвестников землетрясений, в большинстве посвящены исследованию отдельных сильных событий. Очевидно, 2-3 или 15 событий явно не достаточно для получения статистически значимого результата. При этом работы, анализирующие достаточно большой набор землетрясений, редки. Приведём ссылки на такие работы (сокращение «ЗТ» при количестве событий здесь обозначает «землетрясение/землетрясений»): Zaslavski et al. [1] – рассмотрено

706 ЗТ; Liu et al. [2-6] – 14/20/184/150/82 ЗТ соответственно; Singh et al. [7], – 43 ЗТ; Le et al. [8] – 736 ЗТ. Очевидно, малое количество этих исследований связано с большой трудоёмкостью этой работы. Расчёт фоновой вариации, отклонений от неё и вычисление пороговых значений («аномальности» выброса) обычно автоматизированы. Автоматизированное определение предвестника реализовано в немногих работах и исключительно для одномерных данных, что не позволяет изучить пространственные свойства предвестника, которые являются существенными для задач их выявления. Таким образом, анализ и выявление характеристик (особенно пространственных размеров, времён жизни, привязки к окрестности эпицентра и т. п.) в основном выполняются вручную, путём визуального анализа.

В критических исследованиях сомнению, в основном, подвергаются итоговые результаты такого анализа (частотные характеристики появления ионосферных предвестников землетрясений, их заблаговременность, преимущественно время появления, время жизни, пространственные размеры и пр.), а сама «аномальность» выявленных перед сильными землетрясениями возмущений ПЭС в сейсмоактивных районах. Например, Masci [9] анализирует три частных случая из работы Kon et al. [10] и приходит к выводу, что указанные вариации, скорее всего, имеют своей причиной геомагнитные возмущения. К другим недостаткам Masci [9] также относит игнорирование в Kon et al. [10] ряда аналогичных (по амплитуде) возмущений.

Приведём основные недостатки используемых различными авторами методик определения «аномальности» предсейсмических возмущений ПЭС и в конечном счёте методик определения базовой спокойной (фоновой) вариации.

1. Некорректная обработка исходных данных. Kon et al. [10] увеличили число отсчётов по времени (шаг исходных данных – 2 ч, использованных для анализа – 1 ч) за счёт линейной интерполяции. Обоснование, какие преимущества это дало, не приводится. Отсутствие искажений в статистических свойствах полученной выборки по сравнению с исходной не проверено. Таким образом, массив отсчётов увеличен в два раза, что в лучшем случае приведёт к увеличению расхода машинного времени, а в худшем может привести связанные с процедурой или накоплением ошибок особенности, не присутствующие в исходных данных.

2. На свойства выборки накладываются некоторые ограничения, наиболее частое из которых – гауссов (нормальный) закон распределения величины. При этом выполнение этих ограничений для конкретных используемых выборок не проверяется и в лучшем случае заменяется некоторыми общими рассуждениями, поэтому применимость метода и полученные с его помощью результаты оказываются под вопросом. Отдельно отметим, что и «критики» возможности существования ионосферных ПЭС-предвестников также не проверяют применимость используемых методов статистики.

3. Определение фоновой вариации. Анализ исследований по сейсмо-ионосферной тематике показал, что не существует общепринятой методики определения фоновой вариации ПЭС ионосферы в целях выявления ПЭС-предвестников. Тем не менее можно выделить ряд наиболее часто используемых подходов: выбор ближайшего магнитоспокойного дня в качестве опорного; расчёт «скользящих» средних; использование результатов расчёта эмпирической справочной модели ионосферы IRI (International Reference Ionosphere); вейвлет-анализ; калмановская фильтрация; метод главных компонент; применение однослойных и многослойных искусственных нейронных сетей и некоторые другие.

Наиболее часто (и исторически первыми) в качестве фоновой вариации используются различные средние, вероятно, в силу простоты их реализации и невысоких требований к вычислительным ресурсам. При их расчёте коллективами авторов использовалось различное количество дней для определения спокойных значений (т. е. различная ширина окна «бегущего» («скользящего») среднего: 7, 14, 15, 27, 30 или 31 день. Обоснования выбора именно такого количества дней для расчёта невозмущенной вариации в статьях обычно не приводится, зависимость получаемой вариации от количества дней, использованных при её определении, не исследуется и не обсуждается.

4. Определение ПЭС-возмущений и критериев «аномальности» вариации. Эта проблема напрямую связана с обсуждавшимся выше вопросом определения фоновой вариации. Авторы обычно не исследуют зависимость морфологических свойств выявленных ПЭС-предвестников, например, от количества дней, учтённых в расчёте фоновой вариации. Эта проблема обозначена в работах [11] (см. рис.3) и [12] (см. рис.33-34) и требует дальнейших исследований.

Сами отклонения определяются как в абсолютных (TECu – Total Electron Content units, $1 \text{ TECu} = 10^{16}$ электрон/ m^2), так и относительных (проценты, количество среднеквадратичных отклонений) единицах. При этом не исследуется вопрос зависимости выявленных особенностей от используемого подхода.

Определение в рассчитанных возмущениях аномальных значений требует задания количественного критерия «аномальности» данных. Обычно в качестве последнего задаётся некоторое фиксированное значение, например 50 %, или определяется по аналогии с доверительным интервалом. В этом случае аномальным считаются значения, выходящие за границы интервала $M(X) \pm k \cdot \text{СКО}$, где $M(X)$ – выборочное среднее совокупности, используемой в вычислениях, СКО – среднеквадратическое отклонение, k – множитель, обычно принимающий значения 1, 1.5, 2, 2.5 или 3. При этом игнорируется тот факт, что при одном и том же k , но разных расчётах фоновой вариации, будут получены разные ПЭС-предвестники – разной амплитуды и линейных размеров. Наглядно это проиллюстрировано на рис.34 работы [12]. Вопрос необходимости калибровки используемых методов определения порога «аномальности» данных многими авторами игнорируется.

Таким образом, из-за различий в способе вычислений фона, «аномальных» возмущений, величины порога для определения «аномальности» данных становится проблематично совместно анализировать работы различных авторов и полученные в них численные характеристики линейных размеров, амплитуд и характерного времени проявления ПЭС-вариаций, предшествующих сильным землетрясениям.

5. Множество работ анализирует одномерные точечные данные. Даже те работы, которые исследуют карты ПЭС, рассматривают их как совокупность независимых одномерных временных рядов. Такое рассмотрение не позволяет исследовать существенные особенности ПЭС-аномалий, связанные с их линейными размерами и размещением в пространстве. Те же работы, которые учитывают совместные вариации в нескольких точках, тоже имеют ряд ограничений: например, требуют, чтобы GPS-приёмники располагались на одной и той же или очень близкой геомагнитной широте, а долгота не различалась слишком сильно.

6. Не учитывается геомагнитная активность. В большинстве работ «учёт» геомагнитных возмущений осуществляется путём исключения возмущённых дней из рассмотрения. Из немногих работ, которые это делают, можно отметить [13].

He et al. [14] с помощью вейвлет-преобразований (в русскоязычной литературе вместо термина «вейвлет» иногда используется термин «всплеск») исключил из вариаций ПЭС ионосферы, предшествующих M9.0 землетрясению, составляющую, определяемую изменениями солнечной активности. Тем не менее в работе [14] не обосновывается выбранный базис вейвлет-разложения, его применимость для разных гелио-геомагнитных условий, а также не проведено исследование зависимости получаемых результатов от выбранного базиса, например широко распространённых вейвлет Хоара, вейвлет Гаусса, вейвлет Добеши, «Мексиканская шляпа» и пр. Приведён пример использования этого метода только для одного события; ничего не известно об успешном применении метода для обработки большой выборки событий.

7. Не учитываются данные об оценках СКО используемого набора данных. NASA вместе с глобальными картами ПЭС ионосферы поставляет для них же глобальные карты СКО. Ни одна известная нам работа, которая анализирует эти данные, сведения о СКО не использует. Исследователи, которые восстанавливают ПЭС самостоятельно, не приводят соответствующих оценок СКО для своих данных. Таким образом, не удаётся оценить, как полученные значения соотносятся с величиной СКО.

Выводы

Приведённый выше анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. Не существует общепринятой универсальной методики определения аномальных возмущений полного электронного содержания ионосферы в приложении к задачам поиска ионосферных предвестников землетрясения.

2. Различия в реализациях применяемых исследователями методик затрудняют их взаимное сопоставление, а также проверку корректности получаемых результатов.

3. Ряд методик (основанных на нейронных сетях, разложениях в вейвлет-базисах и пр.) не позволяет связать с получаемыми значениями физический смысл (физическую интерпретацию получаемых величин), что уводит проблему из ряда физических задач в статистические (классификация и распознавание «образа» предвестника в данных произвольной природы) или задачи машинного обучения. Тем самым отсекаются физические критерии «разумности» получаемого решения.

Таким образом, решение перечисленных выше проблем является необходимым условием для обеспечения достоверности и надёжности определения ПЭС-предвестников.

Литература

1. Zaslavski Y., Parrot M., Blanc E. Analysis of TEC measurements above active seismic regions // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1998. Vol. 105. P. 219-228, doi:10.1016/S0031-9201(97)00093-9.
2. Seismo-ionospheric signatures prior to M > 6.0 Taiwan earthquakes / J. Y. Liu, Y. I. Chen, S. A. Pulinets, Y. B. Tsai, Y. J. Chuo // *Geophysical Research Letters*. 2000. Vol. 27. P. 3113-3116, doi:10.1029/2000GL011395.
3. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements / J. Y. Liu, Y. J. Chuo, S. J. Shan, Y. B. Tsai, Y. I. Chen, S. A. Pulinets, S. B. Yu // *Annales Geophysicae*. 2004. Vol. 22, N. 5. P. 1585-1593, doi:10.5194/angeo-22-1585-2004.

4. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly / J. Y. Liu, Y. I. Chen, Y. J. Chuo, C. S. Chen // Journal of Geophysical Research. 2006. Vol. 111(A5), doi:10.1029/2005JA011333.
5. A statistical study of ionospheric earthquake precursors monitored by using equatorial ionization anomaly of GPS TEC in Taiwan during 2001–2007 / J. Y. Liu, C. H. Chen, Y. I. Chen, W. H. Yang, K. I. Oyama, K. W. Kuo // Journal of Asian Earth Sciences. 2010. Vol. 39, N 1-2. P. 76-80, doi:10.1016/j.jseaes.2010.02.012.
6. Liu Jing, Jianping Huang, Xuemin Zhang. Ionospheric perturbations in plasma parameters before global strong earthquakes // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, N 5. P. 776-787, doi:10.1016/j.asr.2013.12.029.
7. Anomalous variation in total electron content (TEC) associated with earthquakes in India during September 2006 – November 2007 / O. P. Singh, V. Chauhan, V. Singh, B. Singh // Physics and Chemistry of the Earth. 2009. Vol. 34, N 6-7. P. 479-484, doi:10.1016/j.pce.2008.07.012.
8. Le H., Liu J. Y., Liu L. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M 6.0+ earthquakes during 2002–2010 // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116(A2), doi:10.1029/2010JA015781.
9. Masci F. The study of ionospheric anomalies in Japan Area during 1998-2010 by Kon et al.: An inaccurate claim of earthquake-related signatures? // Journal of Asian Earth Sciences. 2012. Vol. 57. P. 1-5, doi:10.1016/j.jseaes.2012.06.009.
10. Kon S., Nishihashi M., Hattori K. Ionospheric anomalies possibly associated with M 6.0 earthquakes in the Japan Area during 1998-2010: Case studies and statistical study // Journal of Asian Earth Sciences. 2011. Vol. 41, N 4-5. P. 410-420, doi:10.1016/j.jseaes.2010.10.005.
11. Золотов О. В., Намгаладзе А. А., Прохоров Б. Е. Особенности вариаций полного электронного содержания ионосферы в периоды подготовки землетрясений 11 марта 2011 г. (Япония) и 23 октября 2011 г. (Турция) // Химическая физика. 2013. Т. 32, № 9. С. 20-26, doi:10.7868/S0207401X1309015X.
12. Золотов О. В. Эффекты землетрясений в вариациях полного электронного содержания ионосферы: дис. ... к.ф.-м.н. [Электронный ресурс] // Санкт-Петербургский государственный университет: сайт // Архив защит диссертаций. URL: <http://spbu.ru/science/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dislist/details/14/470> (дата обращения: 18.12.2015).
13. Давиденко Д. В. Диагностика ионосферных возмущений над сейсмоопасными регионами: автореф. дис. ... к. ф.-м. н. [Электронный ресурс] // Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: сайт. URL: http://ipg.geospace.ru/ref/20130716/auto_Davidenko.pdf (дата обращения: 18.12.2015).
14. A nonlinear background removal method for seismo-ionospheric anomaly analysis under a complex solar activity scenario: A case study of the M 9.0 Tohoku earthquake / L. He, L. Wu, S. Pulinet, S. Liu, F. Yang // Advances in Space Research. 2012. Vol. 50. P. 211-220, doi:10.1016/j.asr.2012.04.001.

Сведения об авторе

Золотов Олег Владимирович,

к.физ.-мат.н., младший научный сотрудник кафедры общей и прикладной физики, Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, zolotovo@gmail.com