

Об эффективности метода поиска ионосферных предвестников землетрясений по параметрам спорадического слоя E и регулярного слоя F2

КОРСУНОВА Л.П., ХЕГАЙ В.В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Россия

lpkors@rambler.ru

Введение

Вопрос о предвестниках землетрясений приобретает всё большую актуальность в связи с повышением сейсмической активности в различных регионах Земли. К настоящему времени выделено большое количество предвестников землетрясений, представляющих собой значимые отклонения в параметрах различных геофизических полей в литосфере, нижней атмосфере и ионосфере Земли [1-7]. Кроме того, в последние годы с помощью спутников интенсивно исследуются аномалии полного электронного содержания (ТЕС) в различных сейсмоактивных зонах [8, 9].

Изучаются закономерности появления предвестников для землетрясений с различными энергетическими характеристиками. Показано, что время появления предвестника в каком-либо пункте определяется магнитудой готовящегося землетрясения и удалённостью этого пункта от эпицентра [2, 7, 10]. Предвестники в ионосфере можно идентифицировать лишь с некоторой вероятностью из-за сильной изменчивости этой области геосферы, т. к. существенная часть ионосферных аномалий, даже в спокойных геомагнитных условиях, не сопровождается землетрясениями [11]. Для оценки реальности и значимости обнаруживаемых в ионосфере предполагаемых предвестников землетрясений в [12] была предложена оценка эффективности применяемой методики выделения ионосферного предвестника по изменениям критической частоты слоя F2 (f_oF_2). Оказалось, что она достаточно эффективна для сильных землетрясений с магнитудой $M > 5.5$, но малоэффективна для более слабых землетрясений, т. к. изменения в f_oF_2 в этих случаях редко превышают величину случайных выбросов.

Нами была предложена другая методика поиска возможных ионосферных предвестников землетрясений с учётом нескольких определяющих параметров спорадического слоя E ($h'E_s$, fE_s) и дополнительного параметра f_oF_2 [6, 7]. С помощью этой методики удалось выявить ионосферные предвестники более слабых землетрясений на значительном удалении от эпицентра. Однако, не было сделано оценки эффективности этой методики. Этот вопрос рассмотрен в настоящей работе, в которой используются данные по землетрясениям NEIC USA (<http://www.earthquake.usgs.gov>) и измерениям вертикального зондирования ионосферы в Петропавловске-Камчатском, взятые из ресурса NGDC USA (<http://www.ngdc.noaa.gov>)

Методика исследования

Предложенная нами методика выделения возможных ионосферных предвестников землетрясений основывается на соответствии аномальных изменений ряда ионосферных параметров определённому набору морфологических признаков в поведении ионосферы, обнаруженных в результате многолетних исследований в период подготовки землетрясений разной магнитуды в различных сейсмоактивных зонах. Согласно этой методике для ионосферных предвестников землетрясений характерны:

- появление аномально высокого спорадического слоя E (Es), превышающего фоновые значения действующих высот ($h'E_s$) в спокойных геофизических условиях для конкретного времени суток не менее чем на 10 км в течение $1 \div 3$ ч;

- увеличение частот Es не менее чем на 20 %, сопровождающееся повышением foF2 такой же продолжительности в пределах суточного интервала времени ± 12 ч относительно момента появления аномально высокого Es.

Следует заметить, что область применения предложенной методики естественным образом ограничена широтами, в которых достаточно часто наблюдается среднеширотный спорадический слой E, подчиняющийся уже хорошо известным суточным и сезонным закономерностям [13]. Для Петропавловска-Камчатского (географические координаты ионозонда $\varphi = 53.02^\circ \text{ N}$; $\lambda = 158.65^\circ \text{ E}$) это, в основном, летние месяцы. Поэтому нами были обработаны ионосферные данные за август 1998 г., июнь-август 1999 г., июль 2000 г., май-июнь и август-сентябрь 2001 г., апрель-май 2002 г. Для нахождения предполагаемых ионосферных предвестников землетрясений выполнялись следующие процедуры:

- вычислялись отклонения текущих значений действующих высот Es (ΔhEs), предельных частот отражения от Es (ΔfEs) и критических частот слоя F2 ($\Delta foF2$) от средних значений этих параметров по геомагнитно-спокойным дням ($A_p \leq 10-15$ нТл);

- определялись дни, когда отклонения во всех трёх параметрах отвечали критериям выбора ионосферного предвестника, т. е. $\Delta hEs \geq 10$ км, $\Delta fbEs / (fbEs)_{\text{ср.}} \geq 20\%$ и $\Delta foF2 / (foF2)_{\text{ср.}} \geq 10\%$ в течение времени $\tau = 1 \div 3$ ч.

В 38 случаях для отобранных месяцев были обнаружены аномалии в слоях Es и F2, отвечающие критериям выбора ионосферного предвестника землетрясения. В 29 случаях за этими аномалиями с различным временем запаздывания (ΔT) последовали землетрясения с магнитудами $M = 4.6 \div 6.0$, произошедшие на эпицентральных расстояниях (R) $100 \div 400$ км от пункта наблюдения. За рассмотренный период наблюдений (323 дня) произошло 34 землетрясения с указанными магнитудами, при этом в 9 случаях в спокойных геомагнитных условиях наблюдались аномалии в Es, за которыми не последовали землетрясения в указанном диапазоне магнитуд, поэтому эти случаи отнесены к “ложным тревогам”.

Результаты анализа

Для всех выделенных ионосферных аномалий прослеживается тенденция изменения времени упреждения предвестником момента землетрясения в зависимости от магнитуды землетрясения и эпицентрального расстояния до точки наблюдения. Чем больше величина M, тем раньше появляется предвестник для одинаковых R, т. е. время упреждения предвестником момента землетрясения ΔT больше. С увеличением R для одинаковых M заблаговременность появления предвестника уменьшается. Такое поведение характерно для среднесрочных и долгосрочных предвестников землетрясений и свидетельствует о распространении возмущения от эпицентра к границам зоны подготовки землетрясения [5].

Для 16 землетрясений с магнитудами $M = 5.0 \div 6.0$ на Рис. 1 представлены изменения времени упреждения моментов землетрясений (ΔT) выделенными предполагаемыми ионосферными предвестниками (темные кружки) в зависимости от магнитуды последовавших землетрясений с учетом эпицентрального расстояния. Линейная регрессия,

$$\lg(\Delta T \times R) = 0.83M - 1.11, (1)$$

полученная методом наименьших квадратов, показана сплошной линией на Рис. 1 с соответствующими стандартными отклонениями (штриховые линии)

Стандартная ошибка регрессии составляет $S_{lg(\Delta T \times R)} = 0.08$. Коэффициенты корреляции для 5%-го уровня значимости по критерию Стьюдента для отобранных 16 случаев составляют: $\rho = 0.96$ с доверительным интервалом (0.92; 0.99). Оба коэффициента регрес-

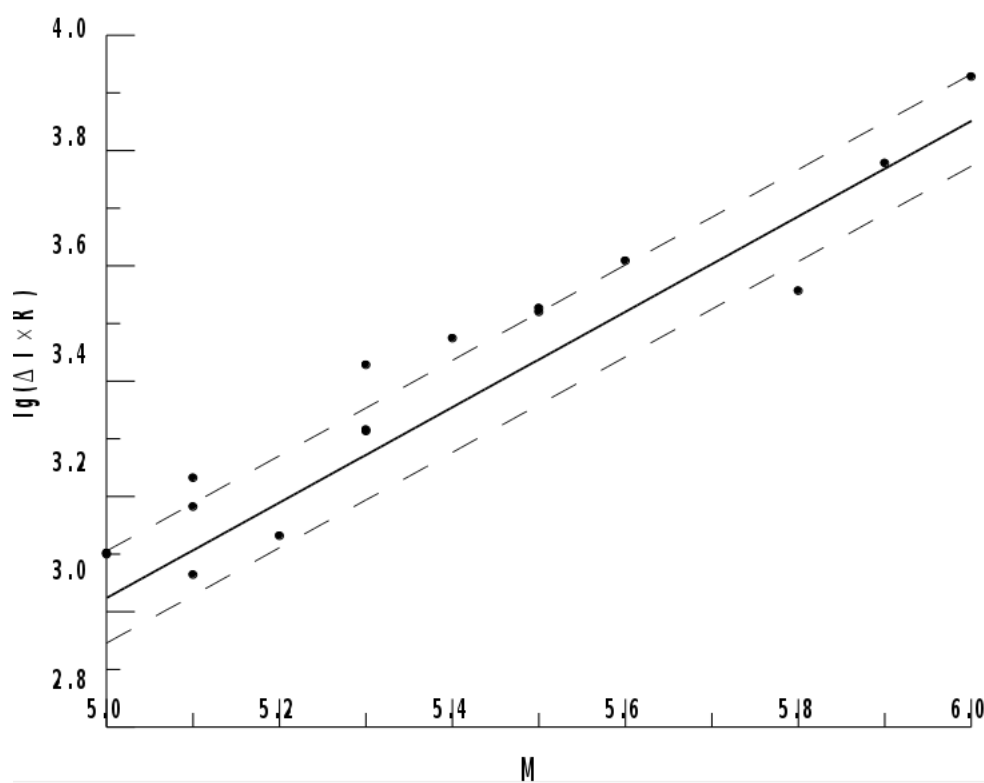


Рис. 1. Эмпирическая зависимость времен упреждения моментов землетрясений (ΔT) от магнитуд (M) и эпицентральных расстояний (R) до пункта наблюдения для аномалий в E_s . Соответствующие стандартные отклонения линии регрессии показаны штриховыми линиями

сии являются статистически значимыми, при этом стандартное отклонение коэффициента, определяющего наклон прямой регрессии составляет 0.07, а стандартное отклонение свободного члена равно 0.35. Проведенный анализ показывает, что несмотря на ограниченное число отобранных случаев вычисленные коэффициенты корреляции свидетельствуют о достаточно высокой степени достоверности полученных зависимостей между временем упреждения предвестником момента землетрясения и магнитудой землетрясения для конкретных эпицентральных расстояний.

Аналогичная зависимость ранее была получена в работе [3] по измерениям различных физических параметров в земной коре, проведённых в этом же сейсмоактивном регионе, но в другие годы (геодезические измерения, электротеллурическое поле, уровень подземных вод, наклоны земной поверхности, деформации, скорости сейсмических волн)

$$\lg(\Delta T \times R)_{\text{Сидорин}} = 0.82M - 1.26. \quad (2)$$

Числовые коэффициенты в формуле (2), попадают в диапазон разброса коэффициентов формулы (1) с учетом их стандартных отклонений. Это свидетельствует об увеличении степени надежности идентификации ионосферных предвестников землетрясений по приведенной выше методике.

Критерии эффективности применяемой методики выделения ионосферного предвестника землетрясений

Принципиальное отличие используемой нами методики [7] заключается в том, что в ней рассматривается несколько параметров, характеризующих состояние нижней и верхней ионосферы. Это повышает надёжность идентификации ионосферных аномалий, предше-

ствующих землетрясениям, именно как предвестников землетрясений, но не исключает ошибок, связанных с появлением ложных предвестников (“ложных тревог”), за которыми не следуют землетрясения. Такие случаи были обнаружены ранее при проведении подобных исследований в Италии [11], и в Камчатском регионе (см. выше, параграф 2). Возникает необходимость оценить эффективность применяемой методики выделения ионосферного предвестника землетрясений.

В работе [12] предложено несколько способов определения эффективности того или иного метода выделения предвестника землетрясения из экспериментальных данных в эпигозе. При этом составляется соответствующая таблица сопряженности признаков (contingency table) для выбранного интервала наблюдений, и дни распределяются в матрице 2×2 согласно своим характеристикам, а затем используется та или иная оценка качества выделения предполагаемых предвестников землетрясения, если бы на основании их появления был бы сделан прогноз.

Одна из таких оценок, это так называемая оценка Хансена-Койпера (Hanssen-Kuipers Score, True Skill Statistic, Pierce Skill Score, Rscore) [12], которая в нашем рассмотрении представляет собой разность между вероятностью обнаружения истинного предвестника землетрясения и вероятностью обнаружения “ложного” предвестника. Ее величина может принимать значения в диапазоне от -1 до 1, при этом последнее означает стопроцентную вероятность обнаружения истинного предвестника при отсутствии “ложных” тревог. Эта оценка дается выражением

$$Rscore = [a/(a+c)] - [b/(b+d)], \quad (3)$$

в котором a - число дней с тревогами, за которыми последовали землетрясения (корректный прогноз, “попадание в цель”, землетрясение происходит), c - число дней с землетрясениями в отсутствие тревог (“пропуск цели”), b - число дней с тревогами, за которыми не последовали землетрясения (“ложные тревоги”), d - число дней без тревог и землетрясений (корректный прогноз, верно указано что “цель” (землетрясение) не появится). В проведенном нами исследовании было рассмотрено 323 дня ионосферных наблюдений, в которые произошло 34 землетрясения с $M = 4.6 \div 6.0$. Для исследуемых временных интервалов оказалось, что: $a = 29$, $b = 9$, $c = 5$, $d = 280$. Тогда из (3) следует, что $Rscore = 0.82$. Это показывает, что используемая нами методика выделения ионосферного предвестника землетрясения по одновременным измерениям нескольких параметров ионосферных слоёв E_s и $F2$ достаточно эффективна.

Выводы

Проведённое исследование ионосферных эффектов, предшествующих землетрясениям с $M = 5.0 \div 6.0$, выявленных по параметрам E_s и $F2$ -слоёв, измеренных ионозондом вертикального зондирования на Камчатке с интервалом в 1 час, позволяет сделать следующие выводы.

1. Логарифмическая зависимость, связывающая магнитуду землетрясения, время упреждения предвестником момента землетрясения и расстояние от пункта наблюдения до эпицентра, полученная по ионосферным данным, соответствует аналогичной зависимости для предвестников землетрясений, полученной по данным измерений различных наземных геофизических параметров в этой же сейсмоактивной зоне.

2. Методика выделения ионосферного предвестника землетрясения, основанная на анализе отклонений действующей высоты спорадического слоя E , предельной частоты отражений от E_s и критической частоты регулярного слоя $F2$, характеризуется достаточно высокой эффективностью.

Литература

1. *Зубков С.И., Мигунов Н.И.* О времени возникновения электромагнитных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1975. Т. 15. № 6. С. 1070-1074.
2. *Сидорин А.Я.* Зависимость времени появления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. № 4. С. 825-828.
3. *Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 192 с.
4. *Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л.* Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука. – 1992. – 304 с.
5. *Гуфельд И.Л., Гусев Г.А.* Современное состояние работ по прогнозу землетрясений (Есть ли выход из тупика?) / Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов. Ред. Страхов В. Н., Липеровский В. А. М.: ОИФЗ РАН. 1998. С. 7-25.
6. *Korsunova L.P., Khegai V.V.* Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // Int. J. Geomagn. Aeron. 2006. V. 6. GI3005. doi:10.1029/2005GI000122.
7. *Корсунова Л.П., Хегай В.В.* Анализ сейсмоионосферных возмущений на цепочке Японских станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – Т. 48. – № 3. – 2008. – С. 407–415.
8. *Sarkar S., Gwal A.K., Parrot M.* Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2007. – V. 69. – N 13. – P. 1524-1540.
9. *Saroso S., Liu J.Y., Hattori K., Chen C.H.* Ionospheric GPS TEC anomalies and $M \geq 5.9$ earthquakes in Indonesia during 1993 - 2002 // Terr. Atmos. Ocean. Sci. – 2008. – V. 19. – N 5. – P. 481-488, doi: 10.3319/TAO.2008.19.5.481(T).
10. *Зубков С.И.* Времена возникновения предвестников землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1987. – №5. – С. 87-91.
11. *Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V.* Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // Ann. Geophysicae. – 2010. – V. 28. – №4. – P. 941–950.
12. *Chen Y.I., Liu J.-Y., Tsai Y.B., Chen C.S.* Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly // Terr. Atmos. Ocean. Sci. – 2004. – V. 15. – №. 3. – P. 385-396.
13. *Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.Н., Шефтель В.Н.* Среднеширотный спорадический слой E ионосферы. М.: Наука. – 1975. – 120 с.

On the efficiency of the method for selection of ionospheric precursors of earthquakes based on the parameters of Es and F2 layers

Korsunova L.P., Khegay V.V.

Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russia

The results of the study of ionospheric parameter deviations from their background values in summer months of 1998-2002 are presented for Petropavlovsk-Kamchatsky ionospheric station of vertical sounding. Anomalous variations of virtual sporadic E layer ($h'E_s$), reflection cutoff frequency from Es (fE_s) and critical frequencies of F2 (f_oF2) layer, which can be attributed to the possible earthquake precursors, were selected. High efficiency of the applied method for detection of ionospheric precursors of earthquakes basing on several parameters of Es and F2 layers has been shown. The empirical dependence, which reflects the connection between the advance time of a precursor for an earthquake moment with its magnitude and epicentral distance to the observation site, has been obtained. This dependence is consistent with the results of detection of earthquake precursors on the basis of measurement of the Earth's crust physical parameters in the same region.