

ИЗМЕНЕНИЯ В АТМОСФЕРНЫХ ПРИЗЕМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ КОРОВЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЯПОНИИ И КОНТИНЕНТАЛЬНОМ КИТАЕ
CHANGES IN THE NEAR EARTH-SURFACE ATMOSPHERIC ELECTROSTATIC FIELDS IN THE PREPARATION PERIOD OF CRUSTAL EARTHQUAKES IN JAPAN AND CONTINENTAL CHINA

Л. П. Корсунова, В. В. Хегай

Институт земного магнетизм, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, (ИЗМИРАН), lpkors@rambler.ru

According to measurements of near earth-surface vertical gradient of the electrostatic potential at the observatory Kakioka (Japan) identified specific maximums in the current daily E_z deviations from baseline values near the time of occurrence of ionospheric precursors of earthquakes (IPE) for conditions of "good weather". Delay-times of earthquakes with respect to these maxima moments demonstrate behavior similar to lead-times for medium-term ionospheric precursors of the same earthquakes which were previously identified according to the data of the vertical sounding Kokubunji station (this station is located at a distance of 85 km from the observatory Kakioka). We also obtain the empirical relationship for the lead-times of earthquake precursors based on measurements performed earlier in continental China. The dependence relates delay times between the appearance of significant negative anomalies in the vertical component of quasi-electrostatic field (precursor) and the moments of the subsequent strong earthquakes with the magnitudes of these earthquakes and the epicentral distances to the observation point.

В последние годы наблюдается возросший интерес к разного рода явлениям, предшествующим землетрясениям. И если исследования наземных геофизических полей привели к существенным подвижкам в понимании процесса подготовки землетрясения [1] и установлению ряда статистических закономерностей [2], то в изучении предвестников землетрясений в атмосфере и ионосфере преобладают, в основном, морфологические изыскания [1, 3, 4]. Противоречивые данные получены об отклике атмосферы Земли на подготовку землетрясений разной мощности. Так, исследования атмосферного электрического поля, проведенные на Камчатке в 1997-2002 г. г., не выявили зависимости максимальной амплитуды аномалии в E_z ни от магнитуды последовавшего землетрясения (в диапазоне магнитуд от 4.7 до 6.7), ни от расстояния до его эпицентра [5]. Аналогичные выводы следуют и из работы [4] для ионосферных предвестников, обнаруженных накануне сильнейшего землетрясения с магнитудой $M = 8.3$.

С другой стороны, измерения E_z в континентальном Китае в течение двадцати лет позволили обнаружить долгосрочные предвестники, которые появляются в течение месяца перед землетрясениями и характеризуются существенными отрицательными аномалиями в E_z с амплитудами, превышающими -300 В/м. Отмечено, что эти аномалии в E_z перед сильными землетрясениями ($M \geq 5$) наблюдались на более значительных расстояниях, чем перед слабыми ($M < 5$) [6]. В [3] показано, что вероятность обнаружения аномальных изменений критических частот слоя F2 перед землетрясениями возрастает с увеличением магнитуды землетрясения. Наконец, нами [7] были обнаружены среднесрочные ионосферные предвестники коровых землетрясений в Японии с $M \geq 5.0$, которые подчиняются зависимости, связывающей время упреждения предвестником момента землетрясения с магнитудой землетрясения и эпицентральной расстоянием до точки наблюдения. В работе [8] на примере нескольких Камчатских землетрясений было показано, что аномалии в E_z , которые могут быть отнесены к среднесрочным предвестникам землетрясений, сопровождаются аномальными изменениями ионосферных параметров. Для этих случаев также были получены эмпирические зависимости, качественно согласующиеся с приведенными в [7]. Все эти результаты инициировали проведение специального исследования поведения квазиэлектростатических полей в период подготовки ряда коровых землетрясений с $M \geq 6.0$ в Японии, где ранее уже были обнаружены ионосферные предвестники землетрясений. Если и для этой сейсмоактивной зоны будут получены согласующиеся между собой зависимости для E_z и ионосферных параметров, то это может свидетельствовать в пользу электродинамической природы литосферно-ионосферного взаимодействия. Кроме того, согласованность в появлении предвестников землетрясений в ионосфере и в приземном атмосферном электрическом поле будет способствовать выявлению реальных предвестников землетрясений в E_z в группе возмущений другой природы.

Известно, что в Японии, в отличие от континентального Китая, довольно редки случаи регистрации значительных отрицательных величин E_z в условиях «хорошей погоды» (отсутствие

тумана, сильного ветра, осадков, дыма и т. д.). Наиболее характерным поведением E_z перед землетрясениями на obs. Какиока является уменьшение его величины за несколько часов до толчка (примерно в 65% случаев) [9]. Поэтому имеются трудности в поиске и выделении возмущений в E_z , связанных с подготовкой землетрясений. Преодолеть эти трудности позволяют данные о времени появления ионосферных предвестников тех же землетрясений. Из [8] следует, что электрические предвестники землетрясений (ЭПЗ) проявляются вблизи времени появления ИПЗ, если измерения приземного атмосферного электрического поля и ионосферных параметров производятся в одном пункте. Обсерватория Какиока (36.2° с. ш., 140.2° в. д.) находится на расстоянии 85 км от ионосферной станции Кокубунжи (35.7° с. ш., 139.5° в. д.), для которой ранее уже были идентифицированы ИПЗ коровых землетрясений с магнитудами $M > 6.0$ [7]. В силу близкого расположения обеих станций оказалось, что обсерватория Какиока попадает в зоны подготовки указанных выше землетрясений, но эффекты в E_z и в ионосфере, связанные с их подготовкой, могут быть разнесены во времени. Поэтому поиск возмущений в E_z осуществлялся для интервала времени, составляющего ± 1.5 суток относительно момента появления ИПЗ. При этом был применен следующий способ.

1. Определялись среднемесячные значения E_z для каждого часа суток (по усредненным за час экспериментальным данным) для всех рассматриваемых землетрясений.

2. Вычислялись отклонения ΔE_z текущих среднечасовых значений E_z от соответствующих среднемесячных значений за каждый час: $\Delta E_z = E_z - \langle E_z \rangle_{\text{average}}$ для трехсуточного интервала, центрированного на день обнаружения ИПЗ, и стандартные отклонения (d) для ΔE_z .

3. Амплитуды E_z , удовлетворяющие условию $|\Delta E_z| > 1.5d$, были отнесены к возмущениям атмосферного электрического поля.

Пример такого анализа приведен на рис. 1 для землетрясения 04.08.1990 с магнитудой $M = 6.0$, подготовка которого происходила в отсутствие сильных геомагнитных возмущений, когда значения локального магнитного К-индекса не превышали 3 (нижняя панель на рис. 1).



Рис. 1. Текущая вариация ΔE_z (сплошная линия с точками), штрих-пунктир – стандартное отклонение величиной в $1.5d$ для исследуемого интервала времени. Стрелками обозначены момент землетрясения и время появления обнаруженного ранее ИПЗ. Зачерненные участки кривой отмечают предполагаемые сейсмогенные эффекты в приземном атмосферном электрическом поле

Критерием обнаружения аномалии E_z является условие $|\Delta E_z| \geq 1.5d$ продолжительностью $\tau \approx 2$ ч на исследуемом временном интервале. Именно такая продолжительность существования аномалии соответствует полученным наиболее вероятным значениям длительности аномалий в E_z по наблюдениям на Камчатке [5] и продолжительности существования ИПЗ по наблюдениям в Кокубунжи [7]. Видно, что за часы до толчка происходит уменьшение E_z , а за примерно двое суток до момента землетрясения отмечаются два всплеска амплитуды E_z . Более близкий к моменту появления ИПЗ экстремум в условиях «хорошей погоды» может быть связан с подготовкой землетрясения, более отдаленный (02.08.1990) отмечается в сложных

метеорологических условиях.

В соответствии с вышеописанной методикой были рассмотрены 19 землетрясений с $M \geq 6.0$, однако лишь в 11 случаях появление возмущений в ΔE_z соответствовало условиям «хорошей погоды». Во всех этих случаях за $1 \div 2$ суток до появления ИПЗ отмечался рост амплитуды ΔE_z , причем как в геомагнито-спокойных, так и в слабозвозмущенных геомагнитных условиях. Дальнейший анализ был проведен именно для этих 11 случаев обнаружения экстремумов в ΔE_z в условиях «хорошей погоды». Для того чтобы перейти к количественным оценкам возможной связи обнаруженных эффектов с последовавшими землетрясениями, были определены времена появления резких экстремумов в ΔE_z , а также времена упреждения ими моментов землетрясений (ΔT , сутки и их доли), которые можно сравнить с полученными в других экспериментах. Оказалось, что максимальное увеличение в ΔE_z для близких значений эпицентральных расстояний появляется тем раньше, чем больше магнитуда последовавшего землетрясения. Для одинаковых магнитуд максимум в ΔE_z наблюдается тем раньше, чем ближе к эпицентру находится obs.

Какиока. Такое поведение характерно для распространения сейсмического возмущения от эпицентра к периферии [2]. Этот факт может свидетельствовать в пользу сейсмогенного происхождения рассмотренных возмущений в вариациях ΔE_z , но подтверждением этого положения может служить лишь соответствие отмеченных тенденций в изменениях времени упреждения ΔT известным эмпирическим зависимостям.

Все обнаруженные на сегодняшний день предвестники землетрясений, как в наземных геофизических полях, так и в ионосфере появляются в разных условиях, на разных расстояниях от эпицентра с различным временем упреждения момента землетрясения ΔT , обусловленным энергией готовящегося землетрясения. Получены эмпирические зависимости, связывающие время упреждения предвестником момента землетрясения с его магнитудой и эпицентральной расстоянием [2]. Эти зависимости различны для предвестников землетрясений разной срочности, но близки в пределах одной и той же сейсмоактивной зоны для предвестников различной физической природы. Поэтому одним из критериев сейсмогенного происхождения того или иного эффекта, обнаруженного в период подготовки землетрясения, является соответствие времени его появления для фиксированного эпицентрального расстояния эмпирической зависимости, характерной для данного региона.

Из рис. 1 следует, что за $\Delta T \approx 4$ часа перед землетрясением наблюдается уменьшение ΔE_z . Сравним это время упреждения с расчетами по эмпирическому соотношению для краткосрочных предвестников, приведенному в [2]:

$$\lg(\Delta T \cdot R) = 0.65M - 3.25, \quad (1)$$

для значений $M = 6.0$, $R = 89$ км, получим $\Delta T = 1.2$ ч. Учитывая, что зависимость (1) получена в результате обобщения данных по разным сейсмоактивным зонам, можно считать, что полученные величины удовлетворительно согласуются между собой. Это свидетельствует в пользу того, что понижение ΔE_z за часы до землетрясения действительно может быть обусловлено процессами подготовки землетрясения.

На рис. 2 приведена эмпирическая зависимость для всех выделенных положительных максимумов в отклонениях ΔE_z (точки). Аппроксимирующая прямая (сплошная линия) получена методом наименьших квадратов

$$\lg(\Delta T \cdot R) = 1.14M - 4.58, \quad (2)$$

при этом величина коэффициента корреляции $\rho = 0.98$ на уровне значимости 5% в соответствии с критерием Стьюдента для всех рассмотренных землетрясений ($N = 11$). Полученная зависимость несколько отличается от зависимости для идентифицированных ранее среднесрочных ионосферных предвестников этих же землетрясений, наблюдавшихся на ст. Кокубунжи:

$$\lg(\Delta T \cdot R)_{\text{ИПЗ}} = 1.21M - 5.07, \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции $\rho = 0.98$ на уровне значимости 5% в соответствии с критерием Стьюдента для $N = 11$. Видно, что зависимости (2) и (3) близки между собой, но аномалии в ΔE_z чаще наблюдаются раньше, чем ИПЗ. Таким образом, есть основания полагать, что выявленные максимумы ΔE_z также являются возможными среднесрочными предвестниками этих землетрясений. Следовательно, в период подготовки коровых землетрясений с $M \geq 6$ происходит модификация приземных электрических полей, сопровождаемая изменениями в ионосферных параметрах.

В отличие от рассматриваемых нами в настоящей работе отклонений от среднемесячных значений ΔE_z , в [6] приведены результаты исследования отрицательных аномалий самой величины E_z с упреждением примерно в один месяц перед землетрясениями в континентальном Китае. Оказалось, что для аномалий в E_z , попадающих в область зоны подготовки землетрясений с $5.0 \leq M \leq 6.5$ также существует зависимость, связывающая время упреждения этими предвестниками момента землетрясения с магнитудой и эпицентральной расстоянием до пункта

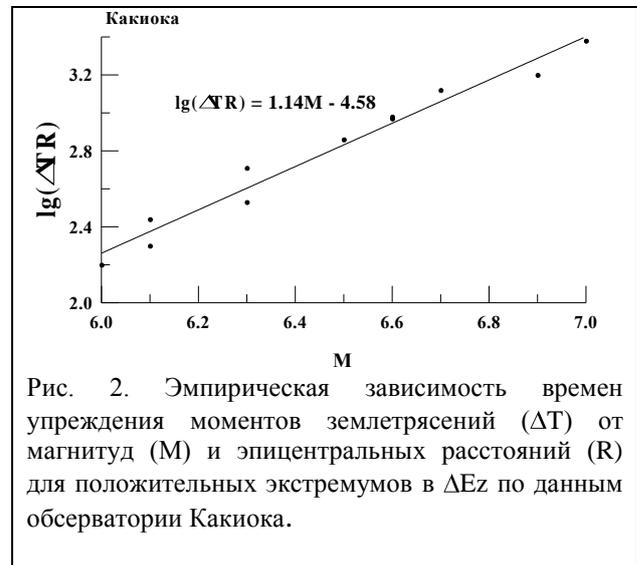


Рис. 2. Эмпирическая зависимость времен упреждения моментов землетрясений (ΔT) от магнитуд (M) и эпицентральных расстояний (R) для положительных экстремумов в ΔE_z по данным обсерватории Какиока.

наблюдения (рис. 3). Прямая линейной регрессии в соответствии с методом наименьших квадратов имеет следующий вид:

$$\lg(\Delta T \cdot R) = 0.56M + 0.06, \quad (4)$$

а вычисленный коэффициент корреляции для 12 отобранных случаев ($N = 12$) $\rho = 0.88$ для 5%-ного уровня значимости по критерию Стьюдента. Это выражение практически совпадает с полученной в [2] зависимостью для долгосрочных предвестников землетрясений в различных наземных геофизических полях на территории Центральной Азии:

$$\lg(\Delta T \cdot R) = 0.59M - 0.01 \quad (5)$$

Следовательно, выделенные в работе [6] отрицательные аномалии в E_z -компоненте приземного атмосферного электрического поля попадают под классификацию долгосрочных предвестников землетрясений. Кроме того, сравнение (4) и (5) показывает, что коэффициенты в этих формулах не зависят от физической природы предвестника, а обусловлены региональными особенностями сейсмической зоны и характером процесса подготовки землетрясений.

Проведенные исследования показывают, что зависимости времен упреждения моментов землетрясений (ΔT) от магнитуд (M) и эпицентральных расстояний (R) долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных предвестников подчиняются одним и тем же качественным закономерностям. Это соответствует выводам теории «включения» [10], описывающей процесс подготовки землетрясений. Согласно этой теории, появление предвестников разной «срочности» обусловлено изменением характера процесса трещинообразования в зоне «включения», имеющего меньший по сравнению с окружающей средой модуль упругости. При каждом таком изменении, т.е. на разных этапах подготовки землетрясения возникают предвестники с той или иной заблаговременностью появления.

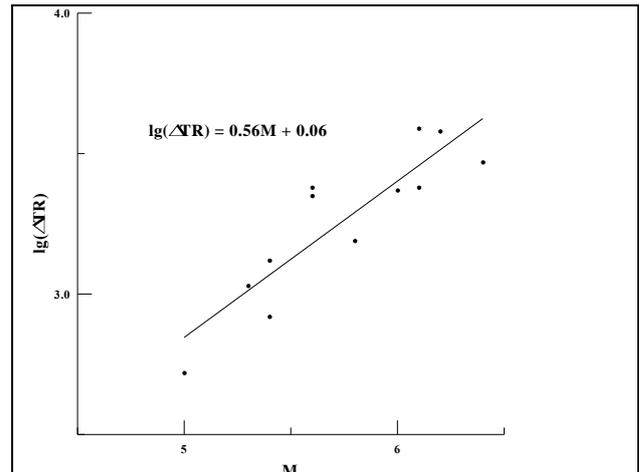


Рис. 3. Эмпирическая зависимость времен упреждения моментов землетрясений (ΔT) от магнитуд (M) и эпицентральных расстояний (R) для отрицательных аномалий в E_z , идентифицированных авторами [6] как предвестники землетрясений.

Литература

1. *Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов* / Под ред. ак. Страхова В.Н. и д.ф.-м.н. Липеровского В.А. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 176 с.
2. Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений. // М.: Наука, 1992. 192 с.
3. Liu J. Y., Chen Y. I., Chuo Y. J., Chen C. S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. V. 111. A05304. 2006, doi:10.1029/2005JA011333.
4. Hobaru Y., Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 67. № 7. P. 677 - 685. 2005.
5. Смирнов С. Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. №2. С. 282 - 287. 2005.
6. Hao J., Tang T., Li D. Progress in the research on atmospheric electric field anomaly as an index for short-impending prediction of earthquakes // J. Earthquake Prediction Res. V.8. N 3. P. 241-255. 2000.
7. Korsunova L.P., Khagai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 6. G13005, doi:10.1029/2005GI000122. 2006.
8. Корсунова Л. П., Михайлов Ю. М., Хегай В. В., Леценко Л. Н., Смирнов С. Э., Богданов В. В. Экспериментальное подтверждение взаимосвязи возможных предвестников землетрясений в приземных квазистатических электрических полях и в ионосфере // Солнечно-земная физика. Новосибирск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2010. Вып. 14 (в печати).
9. Kondo G. The variation of the atmosphere electric field at the time of earthquake // Memoirs of the Kakioka magnetic observatory. V. 13. N 1. P. 11 - 23. 1968.
10. Brady B. T. Theory of earthquakes.2. Inclusion theory of crustal earthquakes // Pure and Appl. Geophys. V. 113. N 1/2. P. 149-169. 1975.