

Секция 5 «Влияние сейсмической активности на атмосферные процессы и физика предвестников землетрясений»

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О ЛОКАЛЬНОСТИ НАРУШЕНИЯ СУТОЧНОГО ХОДА ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

VERIFICATION OF THE HYPOTHESIS ON LOCALITY IN DEVIATIONS OF DAILY VALUES OF TOTAL ELECTRON CONTENT BEFORE EARTHQUAKES

Э.Л. Афраймович¹, Э.И. Астафьева¹, Н.С. Гаврилюк¹, И.В. Живетьев²

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН*

²*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН*

A number of papers have reported about deviations of daily values of the maximum electron concentration of the ionospheric F2 layer and/or total electron content (TEC) in the vicinity of an earthquake's epicenter within some days prior to the main shock. Owing to the importance of this problem, a question of locality of those effects is arising. It is necessary to distinguish clearly the ionosphere changes caused by processes of earthquakes preparation and global changes of the atmosphere ionization as a whole, due to variations of solar EUV radiation within wide range of time periods. We have developed a method that is based on calculations of the mean TEC value for selected region. In this paper the effect of TEC increasing before strong earthquakes is analyzed. It is shown that in a number of cases the effect of TEC increasing before strong earthquakes might be a reflection of global increasing of the ionization at a positive phase of 27-day TEC variations.

1. Введение

Ионосферные эффекты, так или иначе связанные с сейсмической активностью, вызывают повышенный интерес многих исследователей уже в течение нескольких десятков лет [3, 8, 12]. В последнее время развитие мониторинга ионосферных предвестников землетрясений связывается с использованием сигналов глобальных навигационных систем GPS-Глонасс-GALILEO, позволяющих определить пространственное распределение и динамику полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере. Это обусловлено целым рядом преимуществ по сравнению с классическими радиофизическими средствами зондирования ионосферы – непрерывность, высокое пространственно-временное разрешение и глобальность мониторинга ионосферных возмущений различной природы, а также экономичность, обусловленная использованием уже существующей космической и наземной инфраструктуры навигационных систем.

Исследования [4-11] посвящены поиску аномалий ПЭС, сопряженных с готовящимися землетрясениями, на фоне «спокойной» ионосферы. Описанные в указанных работах аномалии носят локальный характер, длятся несколько часов в течение периода, достигающего 5-6 дней, и появляются в течение указанного периода в одно и то же местное время.

Основываясь на анализе глобальных ионосферных карт ПЭС, авторы работы [5] показали, что за несколько суток до землетрясения в ионосфере начинает формироваться область положительных возмущенных значений, причем не обязательно точно над вертикальной проекцией эпицентра. Величина возмущенности может достигать 85-95% от невозмущенных значений. Пространственные размеры аномалии достигают 1000 км по широте и более 4000 км по долготе.

По данным работы [10] для ряда землетрясений на о. Тайвань с магнитудой $M > 6.0$ интенсивность ионосферных предвестников ПЭС составляла 10 и более TECU (общепринятая единица измерения ПЭС TECU, равная 10^{16} м^{-2}), при этом чаще всего они детектировались в вечернее время (18-22 LT). Дневная аномалия ПЭС наблюдалась перед землетрясением в Турции 12 ноября 1999 г. ($M \sim 7.5$) за сутки до главного события, при этом дневное увеличение ПЭС составило ~ 10 TECU [11].

В работе [6] по данным GPS наблюдений проведен анализ вариаций ПЭС для землетрясения в Калининграде 21 сентября 2004 г. В вариациях ПЭС за сутки до главного толчка была обнаружена ионосферная «аномалия» в виде специфического повышения уровня ПЭС в районе будущего землетрясения. Анализ аномалии показал, что по ряду признаков – локальность, размеры зоны проявления, характерное время существования – ее можно ассоциировать с предвестниками сейсмической активности. Результаты исследования продемонстрировали, что при достаточно благоприятных геофизических условиях сейсмо-ионосферные предвестники могут быть выделены даже для несильного землетрясения.

В работе [7] рассматривается гипотеза о возникновении в ионосфере макромасштабных плазменных сгущений, горизонтальные размеры которых достигают 4 тыс. км, превышение над фоном – 15-30%. Такие неоднородности возникают в области F2 на высоте главного максимума за 10-15 ч до катастрофических землетрясений ($M \geq 6$) в окрестностях эпицентра, затем перемещаются горизонтально примерно вдоль дуги большого круга под различными азимутами с околосвуковой скоростью на расстояния до 15 тыс. км.

В работах [4-11] выделяются следующие основные особенности вариаций значений ПЭС, ассоциируемые с предвестниками землетрясений: 1) проявление сейсмо-ионосферных эффектов наблюдается в среднем за двое-трое суток до главного толчка; 2) предвестники имеют вид локального увеличения электронной концентрации; 3) максимум возмущенной области расположен в непосредственной близости от эпицентрального района; 4) пространственный масштаб – несколько тысяч километров по долготе и около 1000 км по широте; 5) амплитуда возмущения достигает значения в среднем 40-60% относительного фонового уровня.

Однако в цитируемых выше работах отсутствует доказательство статистической значимости обнаруженных предвестников с учетом реальной точности измерений ПЭС (не лучше 20-30% [13]), а также анализ подобных аномалий, никак не связанных с подготовкой землетрясений. В связи с важностью этой проблемы возникает необходимость проверки гипотезы о локальности нарушения суточного хода ПЭС перед землетрясением. В настоящем докладе мы предлагаем метод такой проверки.

2. Метод проверки гипотезы о локальности аномалии

В 2005 г. в ИСЗФ СО РАН был впервые предложен новый подход к решению проблемы солнечно-земных связей путем определения глобального электронного содержания (ГЭС), равного полному количеству электронов в околоземном космическом пространстве, ограниченном высотой орбиты ИСЗ радионавигационной системы GPS (около 20200 км) [1]. Преимуществом такого подхода является то, что локальные особенности характеристик ионосферы нивелируются, в итоге выявляются закономерности, характеризующие динамику глобального электронного содержания.

Основная идея предложенного нами способа проверки заключается в следующем. Монотонный рост (или спад) максимального значения ПЭС в течение нескольких дней может быть связан не с локальными изменениями, а ростом (или спадом) глобального содержания электронов, обусловленного соответствующими изменениями потока УФ излучения Солнца. В [1, 2] установлено, что для ГЭС характерны сильные (до 30%) сезонные вариации с максимумом в периоды равноденствия, однако период этих вариаций много больше длительности аномалий ПЭС, так что их можно не принимать во внимание.

В то же время относительная амплитуда 27-дневных вариаций уменьшается с 8% в периоды роста и спада солнечной активности до 2% в период максимума, что соответствует динамике активных образований на Солнце в течение 11-летнего цикла активности [1, 2]. Приведенные выше оценки получены при сглаживании рядов ГЭС с временным окном 10 дней; относительная амплитуда 27-дневных вариаций исходных рядов ГЭС может достигать весьма значимой величины ± 15 -20% [2]. В абсолютных

величинах ПЭС при среднем уровне 20 TECU это означает изменение ПЭС в пределах от 12 до 28 TECU, что сравнимо с обнаруженными в [4-11] аномалиями ПЭС. При этом длительность фазы 27-дневной вариации ГЭС с максимальным значением производной ПЭС того же порядка (около 7-10 дней), что и длительность обсуждаемых в [4-11] аномалий ПЭС.

В настоящей работе мы используем концепцию ГЭС для проверки гипотезы о локальности обнаруженных аномалий ПЭС, с тем отличием, что вместо расчетов глобального электронного содержания более удобным представляется вычисление среднего для выбранного региона значения ПЭС.

Метод основан на использовании GIM-карт [13], вычисляемых по данным международной сети приемников GPS в нескольких научных центрах (JPL, США; CODE, Швейцария, и др.). Пространственный диапазон карт GIM в стандартном формате IONEX $\pm 180^\circ$ по долготе и $\pm 90^\circ$ по широте; размер элементарной ячейки GIM – 5° по долготе и 2.5° по широте; общее количество ячеек GIM $N_{\max} = 5184$. Для каждого момента времени с двухчасовым временным разрешением из файлов IONEX известны значения вертикального ПЭС $I_{i,j}$, где индексы i, j указывают на координаты (широту и долготу) ячейки GIM.

Среднее значение ПЭС $\langle I(t) \rangle$ по всему земному шару или выбранному региону вычисляется путем суммирования по всем N ячейкам GIM значений ПЭС

$$\langle I \rangle = \sum I_{i,j} / N \quad (1)$$

3. Примеры землетрясений

3.1. Рассмотрим в качестве первого примера локальную зависимость среднего значения ПЭС перед землетрясением 25 сентября 2003 г. вблизи о. Хоккайдо в Японии с магнитудой $M=8.3$. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории $32-38^\circ\text{N}$; $130-140^\circ\text{E}$ в интервале времени за 10 дней до и 10 дней после землетрясения (рис.1в; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой). Кружком на панели в) отмечено «аномальное» (по сравнению с предыдущими днями) повышение максимального значения ПЭС за 2-3 дня до землетрясения. Этот эффект авторы [5] интерпретируют как возможный предвестник землетрясения. В [5] отмечен также большой пространственный масштаб обнаруженной «аномалии» (до 2000 км).

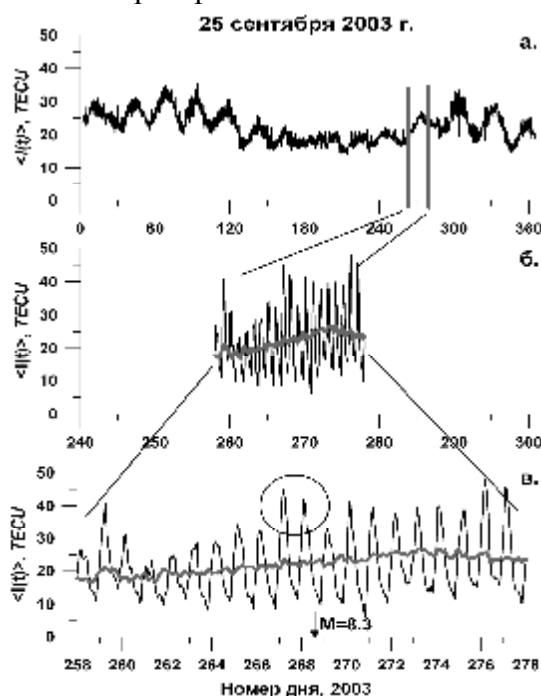


Рис.1. Сравнение локальных и глобальных вариаций ПЭС до и после землетрясения 25 сентября 2003 г.

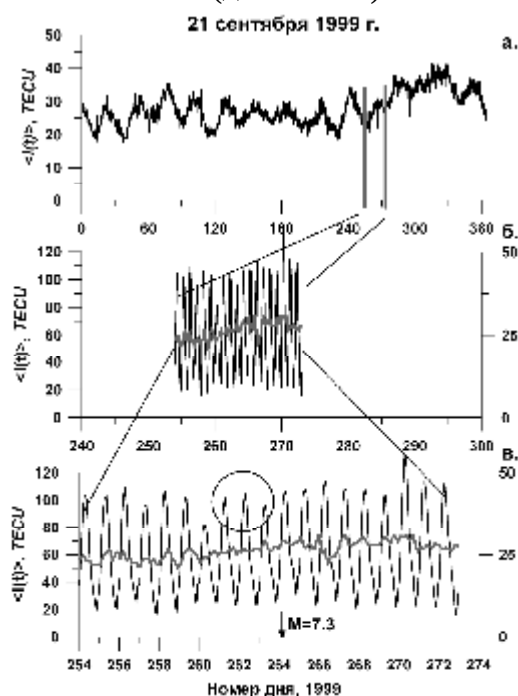


Рис.2. То же, что на рис.1, но для землетрясения 21 сентября 1999 г.

Проверим, является ли данная «аномалия» суточного хода ПЭС действительно локальной, т.е. связанной с регионом будущего землетрясения. Технология расчета среднего по всему земному шару значения ПЭС $\langle I(t) \rangle$ дает возможность сравнить локальные изменения с динамикой глобального электронного содержания. На рис. 1а эта зависимость нанесена для всего 2003 г., а на рис. 1б, в – для анализируемого 20-дневного интервала времени (толстые серые кривые).

Сравнение локальной и глобальной зависимостей $\langle I(t) \rangle$ позволяет усомниться в локальности обнаруженной «аномалии» ПЭС. Обнаруженный в [5] эффект увеличения максимального значения ПЭС перед землетрясением 25.09.03 г. может быть отражением глобального увеличения ионизации на положительной фазе 27-дневной вариации ПЭС.

Эффективность проведенной проверки основана на высокой точности вычисления среднего по всему земному шару $\langle I(t) \rangle$ - лучше 0.5 TECU по сравнению со средней по территории ~ 5 TECU.

3.2. В качестве второго примера рассмотрим локальную зависимость среднего значения ПЭС перед землетрясением 21 сентября 1999 г. на о. Тайвань с магнитудой $M=7.3$. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории 20-26°N; 118-124°E в интервале времени за 10 дней до и 9 дней после землетрясения (рис.2в; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой). На рис. 2а эта зависимость нанесена для всего 1999 г., а на рис. 2б, в – для анализируемого 20-дневного интервала времени (толстые серые кривые; соответствующая шкала ПЭС нанесена справа). Кружком на панели в) отмечено «аномальное» (по сравнению с предыдущими днями) повышение максимального значения ПЭС за 2-3 дня до землетрясения.

И в этом случае сравнение локальной и глобальной зависимостей $\langle I(t) \rangle$ позволяет усомниться в локальности обнаруженной «аномалии» ПЭС. Обнаруженный в [10] эффект увеличения максимального значения ПЭС перед землетрясением 21.09.1999 г. может быть отражением глобального увеличения ионизации на положительной фазе 27-дневной вариации ПЭС.

3.3. Аналогичный вывод можно сделать при сравнении глобальной и локальной зависимости среднего значения ПЭС и относительно землетрясения 12 ноября 1999 г. в Турции с магнитудой $M=7.5$. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории 36-44°N; 24-36°E в интервале времени за 10 дней до и 10 дней после землетрясения (рис.3в; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой). Кружком на панели в) отмечено «аномальное» (по сравнению с предыдущими днями) повышение максимального значения ПЭС за 2-3 дня до землетрясения.

3.4. Рассмотрим теперь землетрясение 26 декабря 2004 г. вблизи о. Суматра с магнитудой 9.0. Локальные значения $\langle I(t) \rangle$ получены путем усреднения на территории 0-10°N; 95-105°E в интервале времени за 10 дней до и 10 дней после землетрясения (рис.4в; момент главного толчка отмечен вертикальной стрелкой).

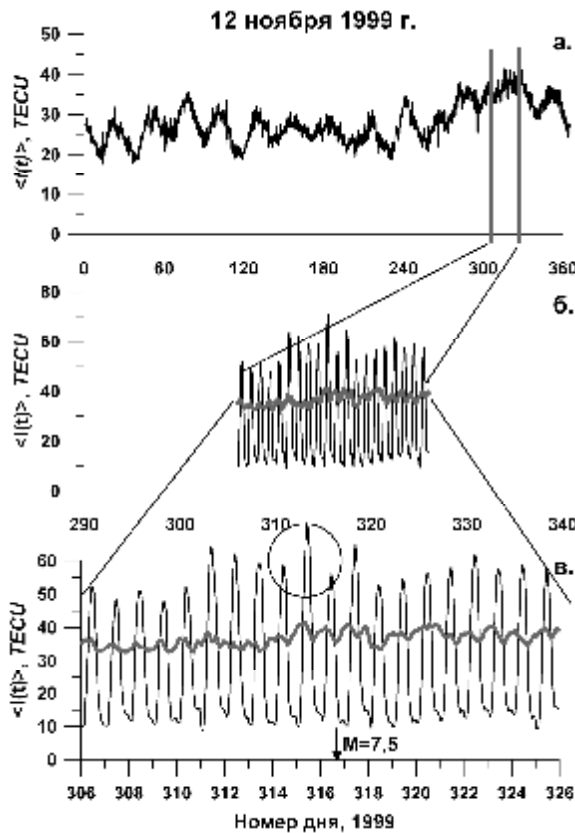


Рис.3. То же, что на рис.1, но для землетрясения 12 ноября 1999 г.

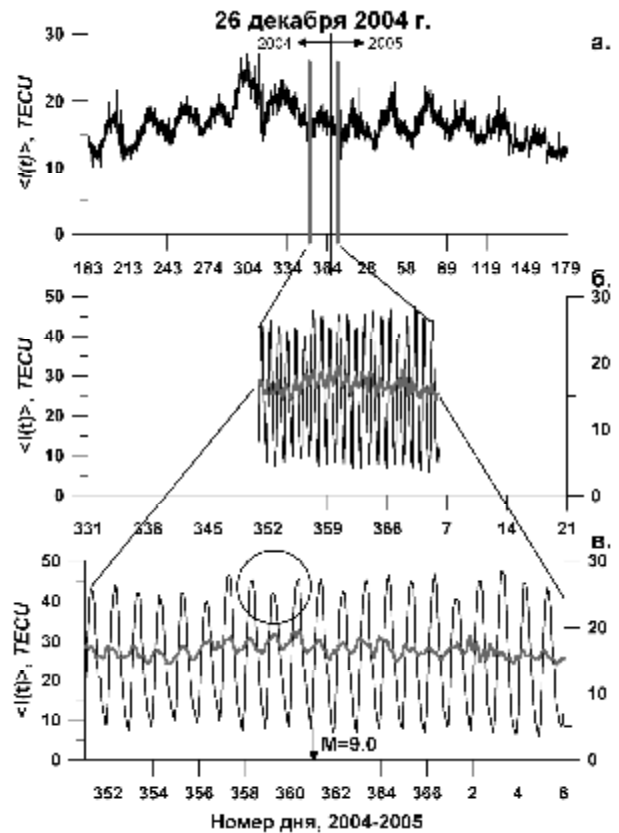


Рис.4. То же, что на рис.1, но для землетрясения 26 декабря 2004 г.

Анализ данных рис.4 не позволяет сделать заключение о какой-либо значимой связи вариаций ПЭС вблизи эпицентра с предстоящим землетрясением, поскольку увеличение амплитуды суточных колебаний ПЭС в регионе (Рис.4б, в, тонкие кривые) фактически повторяет динамику соответствующих колебаний среднего значения ПЭС по всему земному шару (Рис.4б, в, толстые серые кривые).

Таким образом, сравнение глобальных и локальных зависимостей ПЭС для всех анализируемых событий, проведенное в настоящей работе, показало, что зарегистрированные в серии публикаций [4-11] «аномалии» ПЭС могут быть вызваны не столько усилением сейсмической активности перед землетрясением, сколько изменениями глобальной ионизации, связанной с динамикой УФ излучения Солнца. Для того, чтобы разделить относительный вклад этих процессов в изменения ПЭС, необходимы дополнительные исследования.

Предложенный нами подход можно использовать во всех ситуациях, когда обнаруженные «отклонения от нормы» ионосферных параметров связывают не только с землетрясениями, но и с другими локальными событиями типа ураганов, тайфунов, погодных аномалий и антропогенных воздействий.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ N 06-05-39026, 07-05-00127, а также интеграционного гранта СО РАН-ДВО РАН-НАН Украины N 3.24.

Список литературы

1. Афраимович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // Доклады Академии Наук. 2006. Т.409. №3. С.399-402.
2. Э.Л. Афраимович, Э.И. Астафьева, И.В. Живетьев, Ю.В. Ясюкевич. 27-дневные вариации глобального электронного содержания во время 23-го цикла солнечной активности (в настоящем сборнике докладов).
3. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. 1988. М.: Наука. – 174 с.

4. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Калининград. 2007. С. 20.
5. Захаренкова И.Е., Шагмуратов И.И., Лаговский А.Ф. Модификация ионосферы в период подготовки землетрясений по данным спутниковой системы GPS // Труды XXI Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн". 2005. Т.1. С. 194-198.
6. Захаренкова И.Е., Шагмуратов И.И., Лаговский А.Ф., Кранковский А. Исследование ионосферных предвестников для Землетрясений класса $m \sim 5.0$ // Электронный журнал «Исследовано в России». 2006. Т. 39. С. 1047-1055.
7. Калинин Ю.К., Сергеев Н.П. Движущиеся уединенные макронеоднородности, возникающие в ионосфере за несколько часов до катастрофических землетрясений // Доклады Академии Наук. 2002. Т.387. №1. С.105-107.
8. Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.И. Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя от местного времени // Геомагнетизм и аэрономия. 1998. Т. 38. № 3.
9. Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Tsai H.F. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 7. P. 1383-1386.
10. Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulnits S.A., Yu S.B. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1585-1593.
11. Oraevsky V.N., Ruzhin Y.Y., Shagimuratov I.I. Anomalies of ionospheric TEC above Turkey before two strong earthquakes at 1999 // Proceed. 15th Wroclaw EMC Symposium. 2000.
12. Pulnits S.A. Seismic activity as a source of the ionospheric variability // Adv. Space Res. 1998. V. 22. № 6. P. 903-906.
13. Schaer S., Gurtner W. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1 // Proceedings of the IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9-11. 1998. P. 307-320.

SPECTRAL FREQUENCY ENVELOPES RELATED TO VLF/ELF EMISSIONS OBSERVED BY ICE EXPERIMENT ON BOARD THE DEMETER MICRO-SATELLITE

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ОГИБАЮЩИЕ, СВЯЗАННЫЕ С ОНЧ/КНЧ ИЗЛУЧЕНИЯМИ, НАБЛЮДАЕМЫЕ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ICE НА БОРТУ МИКРОСПУТНИКА DEMETER

***M.Y. Boudjada¹, H.K. Biernat^{1,2,3}, K. Schwingenschuh¹, J.J. Berthelier⁴, M. Horn²,
H. Lammer¹, P. Nenovski⁵, G. Prattes⁶, E. Cristea¹, M. Stachel¹***

¹*Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria*

²*Institute of Physics, Department of Geophysics, Astrophysics and Meteorology (IGAM),
Karl-Franzens-University Graz, Austria*

³*Institute of Physics, Department of Theoretical Physics, KF University Graz, Austria,*

⁴*Centre d'Etude des Environnements Terrestre et Planétaires Observatoire de Saint-Maur,
France*

⁵*Geophysical Institute, Sofia, Bulgaria*

⁶*Communication Networks and Satellite Communications Institute, Technical University Graz,
Austria*

В докладе описана возможная связь между сейсмическими событиями и ОНЧ и КНЧ излучениями на основе экспериментальных данных с микроспутника DEMETER института 'Instrument Capteur Electrique' (ICE). Мы применяем так называемый спектральный метод, который позволяет измерять и рассчитывать степень активности ОНЧ/КНЧ, наблюдаемых во время каждой полутраектории микро спутника. Мы определяем коэффициент индекса ОНЧ/КНЧ, который указывает активность основных наблюдаемых компонент, т.е. шипящих и хоровых излучений. Наши результаты используются для распознавания, разделения и классификации

ОНЧ/КНЧ излучений по записям эксперимента DEMETER/ICE. Мы обсуждаем преимущества этого метода и возможности связи его с сейсмическими событиями.

1. Introduction

It is well known since several decades that electromagnetic effects, like the electric and magnetic perturbations, are caused by natural geophysical activity such as earthquakes and volcanic eruptions. It includes: electromagnetic emissions in a large frequency range, perturbations of ionospheric layers, anomalies on the records of VLF transmitter signals, and night airglow observations (Parrot, 1996). Such phenomena, called seismo-electromagnetic phenomena, can be considered as short term precursors because they occur between few hours and/or days before the shock. Two papers published by Gokhberg et al. (1982) and Warwick et al. (1982) advanced the investigation of the seismo-electromagnetic effects. Authors reported earthquakes events which were accidentally recorded by experiments not devoted to this study. Also they detailed observations of various parameters measured in the atmosphere or in the ionosphere in relation with seismic activity. There are many hypotheses on the generation mechanism of these seismo-electromagnetic perturbations which can be found in the following recent review papers: Hayakawa and Molchanov (2002), Pulinets and Boyarchuk (2004), and Meloni et al. (2004). Since the beginning of the 21st century three satellites were launched: COMPASS-1, (Russia, December 2001), QuakeSat, (USA, June 2003), and DEMETER, (France, June 2004). These space missions were mainly devoted to investigate the precursors emissions related to seismo-electromagnetic effects.

In this paper we report on ELF/VLF emissions observed by the 'Instrument Capteur Electrique' (ICE) experiment onboard the DEMETER micro-satellite. We apply the so-called 'spectral method' which allows to quantify and to estimate the VLF/ELF activity level observed during each half-orbit of the micro-satellite. We discuss the advantage of such a method and the means to link it to the occurrence of seismic events.

2. ICE experiment onboard DEMETER micro-satellite

The main objective of the ICE experiment is to detect and characterize the electromagnetic perturbations in the ionosphere that are associated with seismic activity. As a secondary objective, this instrument also aims at characterizing the electromagnetic effects that can be generated by tropospheric storms in the ionosphere. In addition, this experiment provides real time observations that can be of use for space weather purposes. The objective of the ICE instrument on DEMETER is thus to perform a continuous survey of the DC and AC electric fields over a wide frequency range and with a high sensitivity in order to search for possible electrostatic and/or electromagnetic waves in the ionosphere that might be induced by seismic activity. The instrument and the onboard data processing have been designed to provide an optimum set of data in the various frequency ranges, emphasizing full characterization of the 3 components of the waves at frequencies below 1 kHz and single axis waveform transmission and spectrum measurements at higher frequencies (Berthelier et al., 2006).

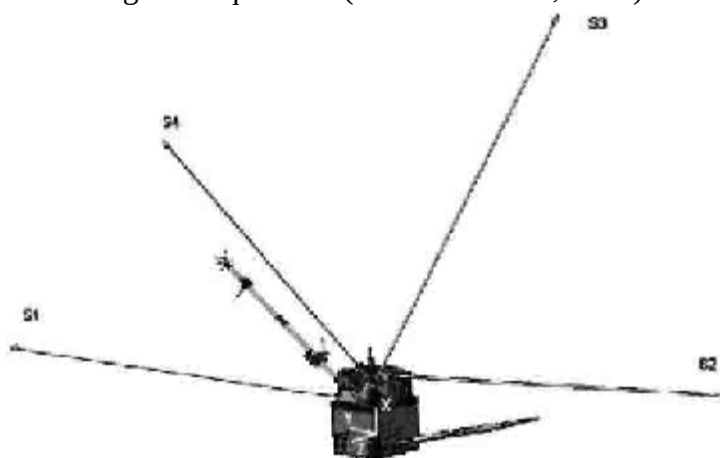


Fig.1: Position of the ICE sensors on the spacecraft

The ICE experiment consists of 4 spherical sensors with embedded pre-amplifier electronics mounted on the ends of 4 booms or antenna “arms” and associated electronics, included in the BANT module, to fulfill the onboard signal processing requirements. When measuring the potential difference between two of these sensors, ICE operates as a double probe instrument in which the component of the electric field is determined along the axis defined by the two sensors. Any pair of sensors among the four can be used for this objective which enables the 3 components of the DC and AC vector electric field to be obtained. Four frequency ranges have been defined, **DC / ULF** [0-15 Hz], **ELF** [15 Hz-1 kHz], **VLF** [15 Hz-17.4 kHz] and **HF** [10 kHz-3.175 MHz]. Depending on the frequency range and on the spacecraft and ICE modes of operation, the data that are stored in the mass memory can be the waveform of the signal obtained from either the voltage difference between two sensors or that measured by a single sensor and the spacecraft potential, and/or the power spectra of the signal obtained from the voltage difference between two sensors.

The 4 sensors, labeled S1, S2, S3 and S4 in **Figure 1**, are spherical aluminum electrodes 60 mm in diameter each mounted at the end of a 4 meter deployable boom. Due to the remote position of the sensors with respect to the spacecraft body, electromagnetic interferences generated by the spacecraft subsystems or other payload instruments are significantly reduced. Finally, the orientation of the 4 booms have also been chosen so that the 3 components of the electric fields that can be obtained from the voltage differences between individual sensors, as indicated below, are close to a three axis orthogonal configuration. The sensors are coated with a thin layer of carbon filled epoxy in order to minimize the variations of the surface potential over the surface and improve the quality of DC electric field measurements. The spherical shell of each sensor includes a small electronics board consisting of a unity gain preamplifier and a polarization current source.

3. Spectral method applied to ELF/VLF observations

We attempt in our analysis to apply the spectral method to classify the different components observed on the dynamic spectrum recorded by DEMETER/ICE experiment. Such method was used to separate Jovian decametric radio emissions recorded by ground based stations (Boudjada and Genova, 1991; Boudjada et al., 1995). Several components were classified using basically the instantaneous frequency bandwidth of the emission combined to the frequency and time resolutions of the receiver.

Figure 2 shows a dynamic spectrum of the ELF/VLF radiation recorded on 24th Nov. 2004 by the ICE experiment where the time (in hours) and the frequency (in Hz) are indicated by the horizontal and vertical axes, respectively. For our study we have used only one of the electric field components. In the nominal configuration this is the E12 component, but a tele-command order allows one of the 2 other components, E34 or E13, to be selected. The power spectrum is computed with frequency and temporal resolutions that depend on the spacecraft and ICE modes of operation. In the burst mode the power spectrum is stored with a 19.53 Hz frequency resolution and averaged over 2.048 s.

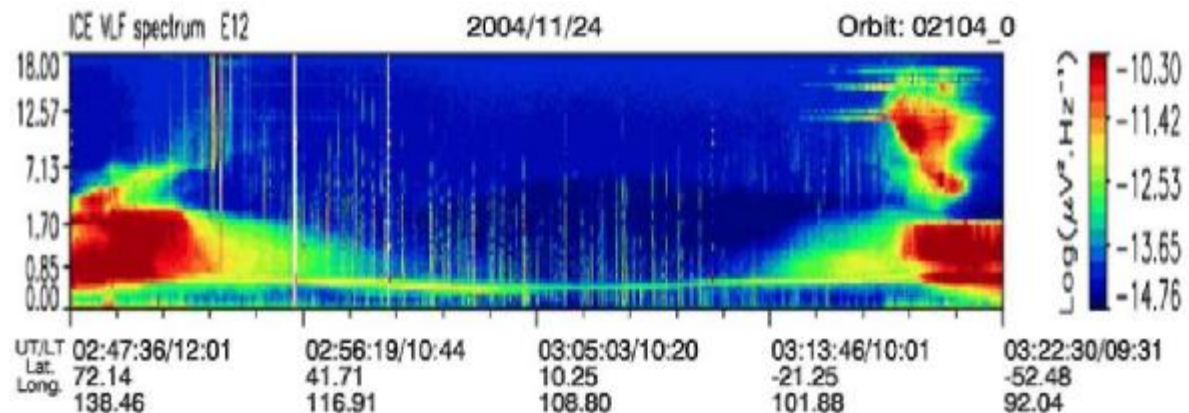


Fig.2: Dynamic spectrum recorded by the ICE experiment onboard DEMETER micro-satellite.

The intensity is indicated by color level where the strongest (red) and lowest (bleu) signal level are of about 10^{-10} and 10^{-14} $\mu\text{V}^2 \text{ Hz}^{-1}$, respectively. We proceed to a classification of the ELF/VLF emissions taken into considerations their corresponding spectral shapes: (a) continuum and not structured (Type-1), (b) radiations with positive (Type-2) or negative (Type-3) frequency drift rates, and (c) bursty emissions without frequency drift rates (Type-4). Considering a given spectral shape we store the following parameters: (a) time of the beginning and the ending of the emissions, (b) minimum and maximum frequencies, and (c) intensity level ($\mu\text{V}^2.\text{Hz}^{-1}$, or $\text{mV}^2.\text{Hz}^{-1}$). Also the corresponding satellite positions like (a) local time (LT in hour and minutes), and (b) latitude and longitude satellite positions. We apply this method to the two earthquakes observed in 2004 in the Adriatic region. The first event has a magnitude of 5.30 and was observed on 24th Nov. 2004 (22:59 UT) at a latitude of 45.66°N and longitude of 10.64°E. The second seismic event occurred one day later at 06:21 UT, magnitude 5.20, and a latitude of 43.24°N and a longitude of 15.58°E. Afterwards we consider frequency occurrence for all observed components (Type 1, Type 2, Type 3 and Type 4) for two periods:

- 23rd, 24th, 25th Nov. 2004 which is close the Adriatic events
- 03rd, 04th, 05th Nov. 2004 which is about three weeks before the Adriatic events

The main propose is to combine the ELF/VLF frequency occurrences before and close to the Adriatic seismic events. It appears clearly from **Figure 3** that the frequency occurrence seems to be similar. It is not possible to conclude concerning a possible shift in frequency between the two periods taking into consideration the ELF/VLF selected types.

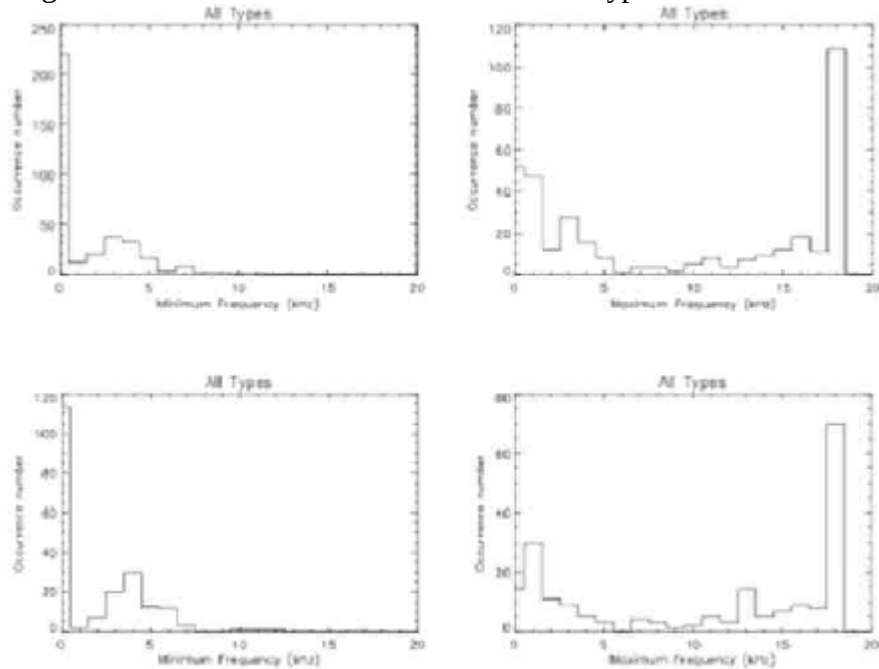


Fig.3: Frequency occurrence histograms associated to ELF/VLF components observed during two periods: (a) 23rd, 24th, 25th Nov. 2004 (two upper panels) and (b) 03rd, 04th, 05th Nov. 2004 (two lower panels)

4. Conclusion

We apply the spectral method to the ELF/VLF emissions recorded by the ICE experiment onboard the DEMETER micro-satellite. We consider different types of emissions which are classified taking into considerations the corresponding shapes on the dynamic spectrum. In the case of the two Adriatic seismic events, we analyze the frequency occurrences for two given periods. It turns out that: (a) the same features are observed before and close to the seismic events and (b) their corresponding frequency occurrences are identical.

5. References

1. Berthelier, J.J., M. Godefroy, F. Leblanc, M. Malingre, M. Menvielle, D. Lagoutte, J.Y. Brochot, F. Colin, F. Elie, C. Legendre, P. Zamora, D. Benoist, Y. Chapuis, J. Artru, R. Pfaff, ICE, the electric field experiment on DEMETER, Planetary and Space Science, 2006. 54. P. 456-471.
2. Boudjada, M.Y., F. Genova, The left-hand polarization sense of the Jovian decameter radiation, Astronomy and Astrophysics Supplements series, 1991. 91. P. 453-467.
3. Boudjada, M.Y., H.O. Rucker, P.H. Ladreiter, The Io-C Jovian decameter emissions, Astronomy and Astrophysics, 1995. 303. P. 255-264.
4. Gokhberg, M.B., Morgunov, V.A., Yoshino, T., Tomizawa, I., Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan. J. Geophys. Res. 1982. 87, 7824-7828.
5. Hayakawa, M., Molchanov, O.A. Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, 2002.
6. Meloni, A., Spichak, V.V., Uyeda, S. Magnetic, electric and electromagnetic methods in seismology and volcanology, Ann. Geophys. 2004. 47 (1).
7. Parrot, M., Electromagnetic noise due to earthquakes. In: Volland, H. (Ed.), Handbook of Atmospheric Electrodynamics, vol. II. CRC Press, Boca Raton, FL, 1996. P. 95-116.
8. Pulnits, S.A., Boyarchuk, K.A., 2004. Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer, New York., 2004.
9. Warwick, J.W., Stoker, C., Meyer, T.R., 1982. Radio emission associated with rock fracture: possible application to the great Chilean earthquake of May 22, 1960. J. Geophys. Res. 1982. 87. P. 2851-2859.

О ВОЗМУЩЕНИЯХ f_oF2 В СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

f_oF2 DISTURBANCES IN MIDDLE LATITUDE IONOSPHERE BEFORE STRONG EARTHQUAKES

*Е.В. Липеровская¹, М. Парро², В.В. Богданов³, К.В. Мейстер⁴,
М.В. Родкин⁵, В.А. Липеровский¹*

¹Институт физики земли РАН,

²L.P.C.E./C.N.R.S., 45071 Орлеан, Франция,

³Институт космofизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,

⁴Астрофизический институт, Потсдам, Германия,

⁵Геофизический Центр РАН

Within the last years in a series of works the deflection of character of ionospheric f_oF2 frequency from its median values during earthquake preparation has been studied in connection to the problem of earthquake prognosis. It has been found out that the modification of f_oF2 does not take place before all earthquakes. Thus it was interesting to carry out statistical investigations and to pick out a part of events which have been accompanied by noticeable anomaly variations in the F -region.

In this work the statistical investigations of ionospheric effects before strong earthquakes are carried out by the use of data from 4 Japanese stations of vertical sounding. The statistical analysis of the variations of the averaged diurnal frequency of the maximum ionospheric electron density f_oF2 is performed in connection to the occurrence of some tens of earthquakes with magnitudes $M > 6.0$, depths $h < 80$ km and distances from the vertical sounding station $R < 1000$ km. It is shown that, on the average, f_oF2 decreases a few days before the earthquakes. The decrease amounts in average to about 5 % a day of the shock.

Введение

В ряде работ проводились исследования поведения характеристик ионосферы в связи с подготовкой землетрясений. Ионосферный слой F самый динамичный из регулярных слоев, он более всего подвержен изменениям, связанным с различными

причинами, а критическая частота слоя $foF2$ является одним из наиболее регулярно измеряемых параметров при вертикальном зондировании (ВЗ). Эта частота соответствует плазменной частоте максимума плотности ионизации ионосферы. В ряде работ разные авторы проводили поиск вариаций среднесуточных характеристик $foF2$, которые могли бы быть предвестниками достаточно сильных землетрясений [1, 7, 9]. Однако вопрос оказался сложнее и среднесуточные характеристики $foF2$, по-видимому, заметно изменяются только при очень сильных землетрясениях. При этом было неясно, начиная с каких магнитуд землетрясений можно ожидать заметных изменений в среднесуточных характеристиках $foF2$ перед землетрясениями. Анализ вариаций усредненных по различным частям суток значений $foF2$ с целью поиска предвестников землетрясений был проведен в ряде работ. В работах [1, 6, 8, 9, 3] было обнаружено уменьшение $foF2$ за сутки-двое до землетрясений с $M > 6$. С другой стороны, в работе [7] отмечено увеличение $foF2$ перед несколькими очень сильными землетрясениями. Далее статистическое исследование уменьшения послеполуденных значений $foF2$ перед тайваньскими землетрясениями с магнитудами $M > 5$ проведено в [5].

В настоящей работе проведен статистический анализ вариаций среднесуточных $foF2$ во временной окрестности $\pm$ две недели до и после японских землетрясений с магнитудами $M > 6.0$. Цель работы – выяснить вопрос, для какой доли событий прослеживаются заметные модификации среднесуточных значений $foF2$ в связи с землетрясениями. Для анализа были использованы часовые данные за 1957-1990 по 4 ионосферным станциям.

Метод анализа

Для анализа $foF2$ до и после землетрясений в настоящей работе рассмотрены японские землетрясения с магнитудами $M > 6.0$, глубиной очага $h < 80$ км и расстояниями от эпицентра до станции вертикального зондирования $R < 1000$ км. Ионосферные данные взяты в ИНТЕРНЕТе <http://www.rl.ac.uk.wdccc1/data.html> (станции «Вакканай» ($\varphi=45.2^\circ\text{N}$, $\lambda=141.4^\circ\text{E}$, 1957-1988 гг., «Акита» ($\varphi=39.4^\circ\text{N}$, $\lambda=140.1^\circ\text{E}$, 1957-1988 гг., «Токио» (Кокубунжи) ($\varphi=35.7^\circ\text{N}$, $\lambda=139.5^\circ\text{E}$, 1957-1990 гг.) и «Ямагава» ($\varphi=31.1^\circ\text{N}$, $\lambda=130.4^\circ\text{E}$, 1957-1988 гг.). За рассмотренные интервалы времени в радиусе $R < 1000$ км от каждой станции произошло несколько десятков землетрясений.

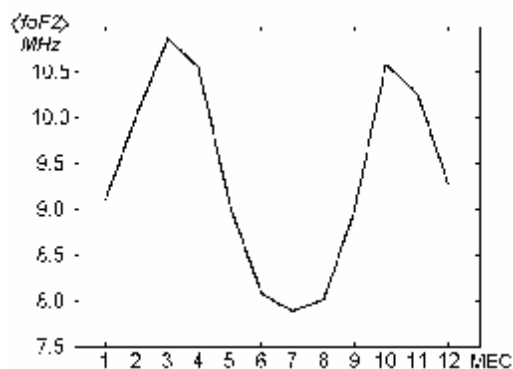


Рис.1. Сезонный ход среднесуточных значений $\langle foF2 \rangle$.

В ходе критической частоты $foF2$ наблюдается сильная суточная и сезонная зависимость, кроме того, эта частота зависит от фазы 27-дневных солнечных суток и фазы 11-летнего солнечного цикла. В настоящей работе анализировались среднесуточные значения $\langle foF2 \rangle$.

Сезонный ход $\langle foF2 \rangle$, полученный по данным станции Токио усреднением по всему анализируемому интервалу, представлен на рис. 1.

На реальный сезонный ход накладываются вариации, вызванные изменением солнечной активности в связи с 27 дневными солнечными сутками. Эти вариации особенно заметны в годы, близкие к годам максимума 11 летнего цикла солнечной активности. Чтобы уменьшить влияние глобальных факторов, в работе рассматриваются сравнительно короткие интервалы времени во временной окрестности землетрясений и при анализе принимаются во внимание только дни, когда солнечная активность не слишком велика. Возмущения геомагнитного поля также влияют на поведение $foF2$,

поэтому при исследовании ионосферных эффектов землетрясений отбирались только те сутки, при которых геомагнитные возмущения также были не слишком большие. Единой точки зрения по этому вопросу нет. В данной работе при наложении эпох были наложены ограничения – принимались в рассмотрение только дни, в которые индекс Вольфа меньше 100 и $\Sigma Kp < 30$, при таких ограничениях более половины всех имеющихся данных может быть использовано для анализа.

Для каждого землетрясения рассматривался интервал (-13, +13) суток до и после события, значения $\langle foF_2 \rangle_i$ за каждые сутки (i) нормировались на среднее за весь интервал

$\langle foF_2 \rangle_{total}$. В результате был получен ряд из 27 безразмерных величин (в %)

$$\Delta F(i) = \frac{\langle foF_2 \rangle_i - \langle foF_2 \rangle_{total}}{\langle foF_2 \rangle_{total}} 100\% \quad \text{для каждого землетрясения.}$$

Землетрясение

принималось во внимание, только если имелись в наличии данные не менее чем за 14 дней из 27. Отметим, что из-за того, что интервалы до и после события достаточно короткие и одинаковые – по 13 дней, влияние сезонного хода foF_2 сравнительно невелико.

Далее была проведена процедура наложения эпох для 27 дневных интервалов в окрестности землетрясений для всех рассмотренных землетрясений, и таким образом получены средние величины $\overline{\Delta F(i)}$ за каждый день. Аналогичные исследования вариаций foF_2 для сильных землетрясений были проведены по материалам других японских станций – Акита, Вакканай и Ямагава. На рисунке 2 представлены результаты анализа. Полученные в результате наложения эпох функции $\overline{\Delta F(i)}$ приведены на соответствующих рисунках для каждой станции. Таким образом, на всех станциях наблюдается уменьшение foF_2 во временной окрестности за несколько суток до и сутки-двое после землетрясений.

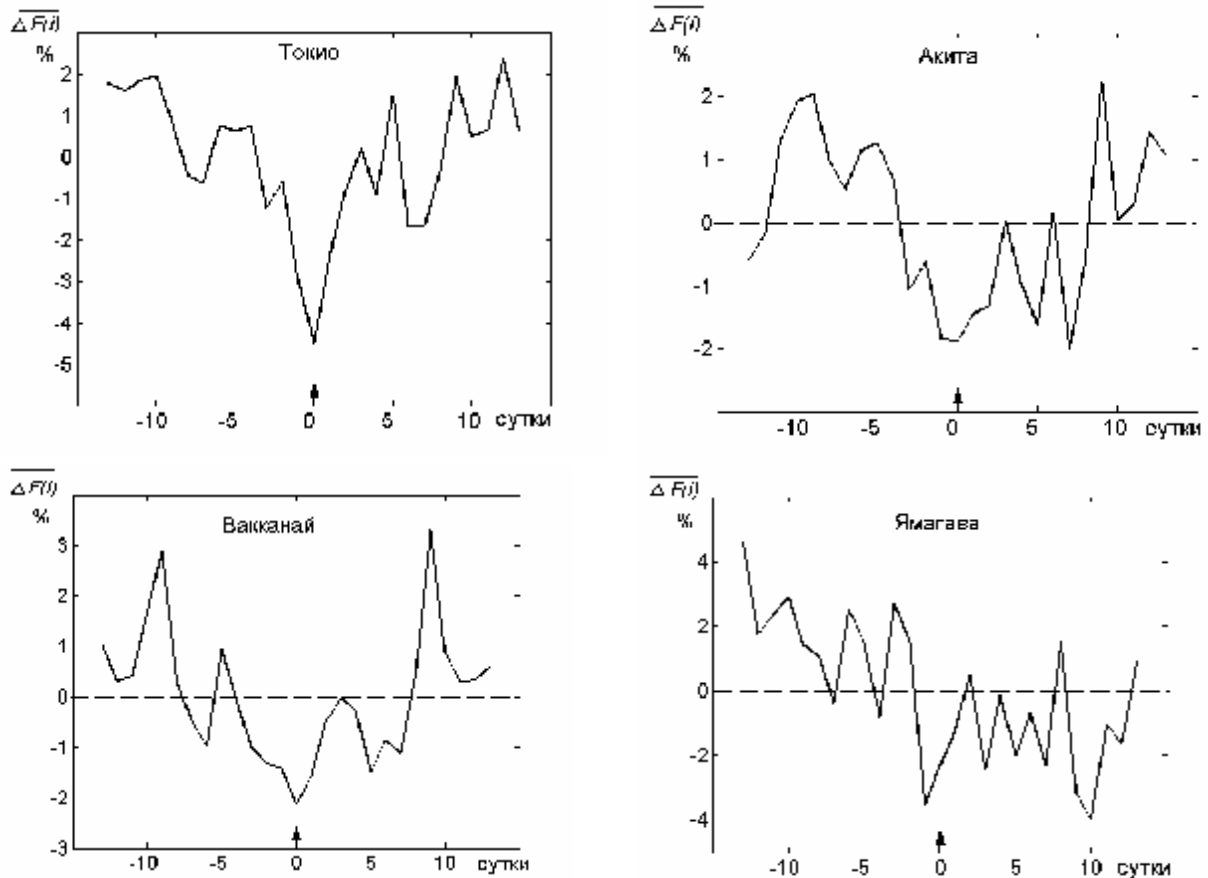


Рис.2. $\overline{\Delta F(i)}$ – Результат наложения эпох для нормированных foF_2 . При анализе принимались во внимание землетрясения с магнитудами $M > 6.0$, расстояниями от эпицентра до станции ВЗ $R < 1000$ км и глубиной очага $h < 80$ км.

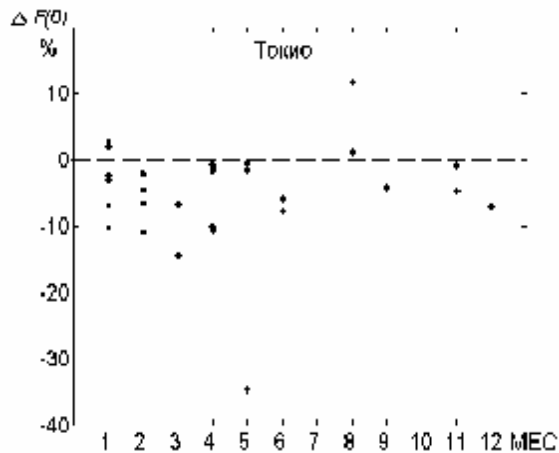


Рис.3. $\overline{\Delta F(0)}$ (в %) в день землетрясения в зависимости от месяца события.

Обсуждение результатов и выводы

В работе исследованы ионосферные эффекты более чем для 150 сильных землетрясений с $M > 6$ в Японии. Эпицентры землетрясений в основном находились в море (см. рис. 4).

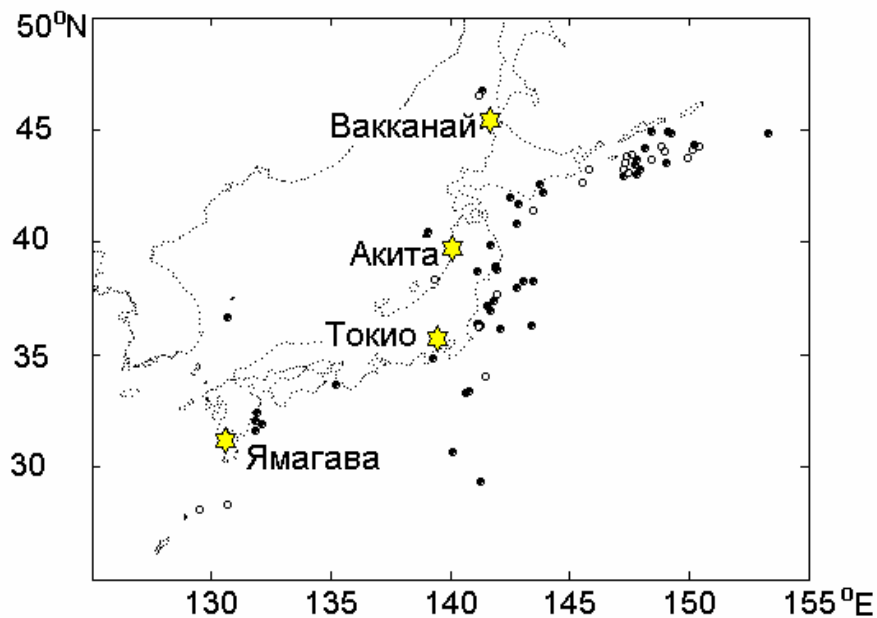


Рис.4. Карта расположения землетрясений. Черные кружки показывают эпицентры событий, для которых в (0) день $\overline{\Delta F(0)} < 0$, светлые – для которых $\overline{\Delta F(0)} > 0$.

Выяснив, что в среднем в день сильных землетрясений $foF2$ уменьшается, было интересно проанализировать вопрос: для какой доли сильных землетрясений из рассмотренной совокупности имеет место уменьшение, а для какой доли – наоборот, увеличение. Случаи отсутствия какого-либо эффекта не рассматривались. Для качественного решения этого вопроса была составлена таблица.

Использованы данные станции ВЗ «Токио» (40 событий), «Акита» (53 события), «Вакканай» (48 событий) и «Ямагава» (12 событий).

Для станции Токио была исследована зависимость уменьшения $foF2$ от сезона. Число землетрясений в окрестности станции, использованных при наложении эпох, в зависимости от месяца события показано на рис.3 (ромбики). Координата ромбика по оси Y соответствует значению нормированного отклонения (в %) $\overline{\Delta F(0)}$ в день землетрясения. Из рисунка видно, что $\overline{\Delta F(0)}$ от сезона не зависит.

Показано, что за неделю до события начинается процесс уменьшения $foF2$, относительный минимум наблюдается в день землетрясения, пониженное значение сохраняется день – два после события. В среднем амплитуда понижения может достигать 5%. При анализе использовались только сутки со спокойными гелиогеомагнитными условиями – $\Sigma Kp < 30$ и индекс Вольфа $W < 100$.

Таблица.
Результаты по станциям

Станция	Уменьшение $foF2$ в(0)день	Увеличение $foF2$ в(0)день
Вакканай	30	18
Акита	37	16
Токио	31	9
Ямагава	10	2

В среднем по всем станциям для всех рассмотренных землетрясений эффект имеет место в 70% случаев. Важно отметить, что эффект уменьшения $foF2$ не наблюдается для 30% очень сильных землетрясений. Чем характеризуются эти 30% землетрясений, не имеющие этого предвестника? Вопрос сложный, его решение – в будущем.

Существуют различные взгляды на физические механизмы, которые могут объяснять наблюдаемые модификации в ходе $foF2$ до и после землетрясений. В монографиях [8, 16] обсуждались две гипотезы связи в системе «литосфера-атмосфера-ионосфера» при подготовке землетрясений. Одна из гипотез – «электромагнитная», согласно которой аномальные процессы в литосфере перед землетрясениями передаются через атмосферу в ионосферу посредством электромагнитных полей. Другая гипотеза – «акустико-гравитационная», в которой предполагается, что генерируемые в атмосфере над областью подготовки землетрясений акустико-гравитационные волны распространяются через атмосферу под очень малым углом к земной поверхности и, доходя до ионосферных высот достаточно далеко по горизонтали от эпицентров будущих землетрясений, приводят к возмущению ионосферы благодаря столкновениям ионов с нейтралями. Однако работы [2, 6, 7, 4, 10] свидетельствуют в пользу «электромагнитного» механизма.

Согласно «электромагнитному» механизму литосферно-ионосферной связи принималась гипотеза, что система «Земля-ионосфера» может быть модельно представлена сферическим конденсатором, разность потенциалов которого поддерживается грозовой активностью. Под действием электрического поля в атмосфере создается направленный к земной поверхности ток проводимости. За несколько суток до землетрясения вероятны выбросы в атмосферу радона, которые приводят к усилению процесса ионизации в атмосфере и к увеличению проводимости приземной атмосферы и вертикального тока [10]. Соответственно, ток в нижней ионосфере также возрастает, усиливается нагрев и повышается температура электронов в E -области. Далее работает механизм трансляции электрических возмущений из E -области в нижнюю часть F -области и далее выше вдоль силовых линий геомагнитного поля. В результате имеет место нагрев и диффузионное расплывание неоднородностей, и уменьшение максимума плотности слоя $F2$ за несколько дней до и после очень сильных землетрясений.

В рамках другой гипотезы, «электрогравитационной», тот же процесс нагрева и расплывания максимума может происходить за счет приходящих от Земли акустико-гравитационных волн. Авторы настоящей работы склоняются в пользу «электрического» механизма для объяснения интенсификации ионосферных эффектов, рассмотренных в этой работе. Весьма вероятно, что реально в природе работают оба механизма, их относительные роли еще мало изучены.

Список литературы

1. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. – М.Наука. 1992. – 304 с.
2. Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // В сб. "Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов". М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 64-87.
3. Hobara Y. and Parrot M.: Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event, J. Atmos. Terr. Phys. 2005. V.67, 677-685.
4. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., Bogdanov V.V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes// Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. V.5. N6 P. 783 – 789.

5. Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., and Chen C.S.: A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. 111, A05304, doi:10.1029/2006.
6. Ondoh T.: Seismo-ionospheric phenomena // Adv. Space Res. 2000. V. 26 (8). P.1267-1272.
7. Pulnits S.A. and Boyarchuk K.A.: Ionospheric precursors of earthquakes, Springer, Berlin, 2004.
8. Rios V.H., Kim V.P., and Hegai V.V.: Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the great San Juan earthquake of 23 November 1977 // Adv. Space Res. 2004. V.33. 323-327.
9. Singh B., Kushwah V., Singh O.P., Lakshmi D.R., and Reddy B.M.: Ionospheric perturbations caused by some major earthquakes in India // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V.29, 537-550.
10. Sorokin V.M., Chmirev V.M. Modification of the ionosphere by seismic related electric field // Atmospheric and ionospheric phenomena associated with earthquakes. Ed. M. Hayakawa / TERRAPUB, Tokyo, 1999. P. 805-818.

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ ОКОЛОПОЛУДЕННОЙ
КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ f_oE ИОНОСФЕРЫ В СВЯЗИ С
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ПО МАТЕРИАЛАМ СТАНЦИЙ «ТАШКЕНТ» И
«ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ»**

**STATISTICAL ANALYSIS OF PERTURBATIONS OF IONOSPHERE MIDDLE-DAY
CRITICAL FREQUENCY f_oE IN CONNECTION WITH EARTHQUAKES ON THE
DATA OF “TASHKENT” AND “PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKIY” STATIONS**

*Е.В. Липеровская¹, В.В. Богданов², В.А. Липеровский¹,
О.А. Похотелов¹, А.С. Силина¹, А.В. Олифиров³*

¹*Институт физики земли РАН,*

²*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,*

³*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Ionospheric precursors of earthquakes have been investigated during the last 25 years. On the first stage the night ionosphere was analyzed, because it seems that it is difficult to separate seismoionospheric effects on the background of direct solar effects. Within the last years serious efforts were made mostly to find day-time ionosphere disturbances caused by earthquake preparation.

The analysis of such disturbances in the day-time regular E -layer, which maximal ionization density is characterized by critical frequency f_oE , is carried out in the work. It is pointed out that f_oE increased a day before an earthquake in the Middle Asia with magnitude $M > 5$. The statistical reliability of the effect is more than 99%. The dependence of the effect on magnitude, distance from the epicenter to the vertical sounding station and depth of the hypocenter is analyzed. Data of more than 300 earthquakes in the vicinity of «Tashkent» vertical sounding station and of more than 30 events in the vicinity of «Petropavlovsk-Kamchatsky» are used in the analysis.

Введение

Критическую частоту f_oE регулярного слоя E редко анализировали с целью поиска сейсмоионосферных эффектов. Однако, в работе [4] отмечалось увеличение f_oE за сутки-двое до нескольких (порядка 20) сильных землетрясений.

Частота f_oE в первую очередь зависит от положения Солнца над горизонтом, и, конечно, от уровня солнечной активности. Эта частота также слабо зависит от возмущений геомагнитного поля, от электрических возмущений, распространяющихся сверху, из F -области, от возмущений электрической и акустической природы, распространяющихся

снизу, из нейтральной атмосферы. Прослеживается влияние метеофакторов на область E и на частоту foE [3]. Поэтому можно ожидать, что электрические и акустические и акустико-гравитационные возмущения, возникающие в нижней атмосфере в процессе подготовки землетрясений, найдут отклик в вариациях частоты foE . Однако, поскольку частота foE весьма устойчива к внешним воздействиям по сравнению с другими частотами, и её вариации от расчетной величины, вызванные возмущениями не солнечной природы, составляют порядка процента, она считалась слабо чувствительной к процессам подготовки землетрясений. Цель настоящей работы – доказать статистически наличие воздействия процессов подготовки землетрясений на вариации foE за несколько суток до землетрясений и определить, при каких условиях эффект наблюдается.

Метод исследования

В работе были исследованы ионосферные эффекты землетрясений с магнитудами $M > 5$, расстояниями от станции ВЗ до эпицентров $R < 1000$ км, и глубиной очага $H < 70$ км в Средней Азии – станция «Ташкент» ($\varphi = 41.3^\circ$ с.ш., $\lambda = 69.6^\circ$ в.д., 1964-1996 гг.), и на Камчатке – станция «Петропавловск-Камчатский» ($\varphi = 53.0^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.7^\circ$ в.д., 1968-1995 гг.) на основе представленных в Интернете <http://www.rl.ac.uk.wdccc1/data.html> часовых данных.

Область E ионосферы расположена на высотах $h = 90 \div 140$ км, плотность ионизации составляет $N \leq 10^5 \text{ см}^{-3}$ днем и на два-три порядка меньше ночью [1]. Основные ионы в E -области — это O_2^+ и NO . Критическая частота foE дневного слоя E в общих чертах подчиняется теории простого слоя, развитой Чепменом ещё в 30х годах 20 века. Таким образом, в ходе foE присутствуют суточная и сезонная зависимости, а также зависимости от 11-летнего и 27-дневного солнечных циклов. Суточный ход foE по данным станции ВЗ «Ташкент» представлен на Рис. 1.

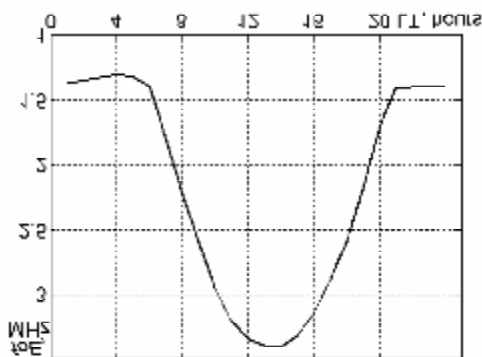


Рис.1. Суточный ход foE .

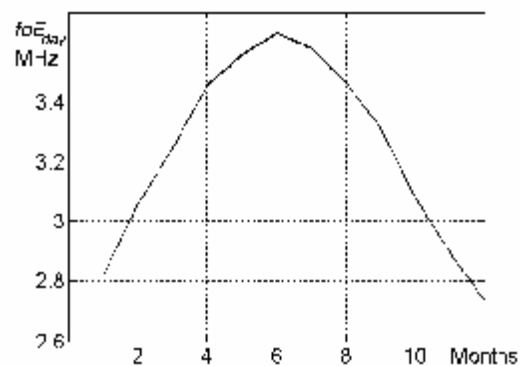


Рис.2. Сезонный ход foE_{day} .

Для исследования сейсмоионосферных эффектов в настоящей работе было выбрано дневное время с 10 до 17 ч LT, когда степень ионизации ионосферы максимальна, и зависимость от времени суток в эти часы не очень сильная по сравнению с другим временем суток. Для анализа было проведено усреднение foE по выбранному интервалу времени. Считалось, что значение foE_{day} за день определено, если из 8 возможных часовых значений имеются в наличии более половины (более 4 значений). На Рис. 2 представлен сезонный ход foE_{day} .

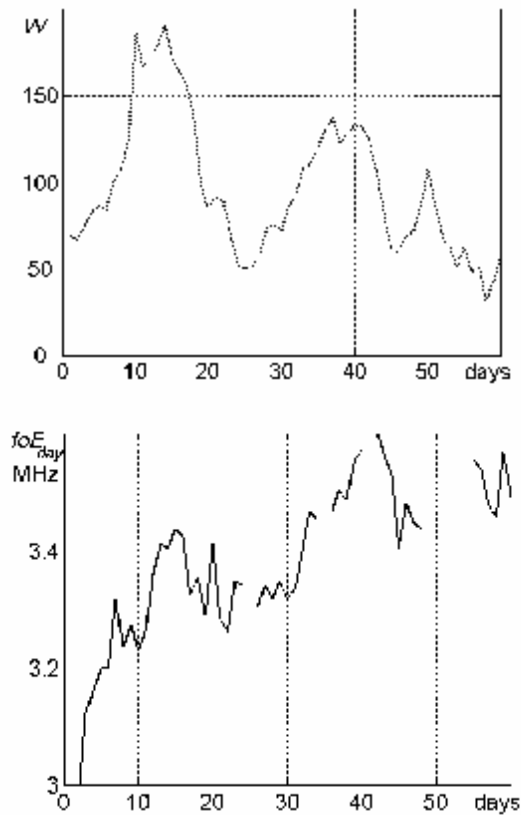


Рис. 3. Ход индекса Вольфа W (верхняя панель) и foE_{day} (нижняя панель) за один и тот же интервал времени.

среднеквадратичное отклонение. В результате получается, что каждый день анализируемого интервала характеризуется значением нормированной функции $E(i) = \Delta E(i) / \sigma(\Delta E(i))$.

Ионосферные эффекты землетрясений приходится искать на фоне солнечных и геомагнитных возмущений, поэтому для анализа использовались только те сутки, при которых солнечные и геомагнитные возмущения были не слишком большие. Единой точки зрения по этому вопросу нет. В данной работе исключались из рассмотрения дни с

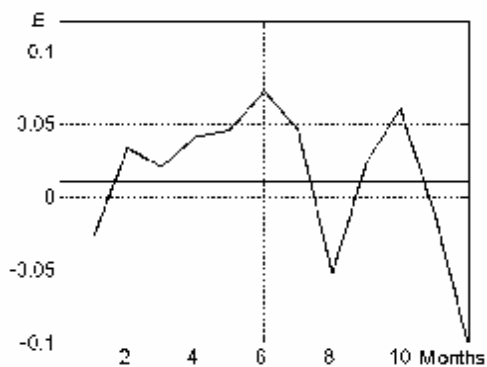


Рис.4. Сезонный ход величины E .

В ходе foE_{day} очень заметны вариации, связанные с 27-дневным солнечным циклом (Рис.3). Таким образом, выделение литосферно-ионосферных эффектов на фоне такого сезонного хода является сложной задачей. Чтобы исключить сезонную зависимость, из текущего значения foE_{day} вычитается значение этой величины, усредненное по 15 дням – (с -7 по $+7$) для каждого дня: $\Delta E(i) = foE_{day}(i) - foE_{15days}(i)$. Короткий интервал усреднения выбран для уменьшения влияния 27-дневного солнечного цикла. После получения разницы текущего и сезонного значения отбрасываем отклонения, по абсолютной величине большие 0.2 МГц. Число таких отклонений составляет порядка 1% всего массива данных (84 дня из 6425 по данным станции «Ташкент»). Большая часть больших отклонений связана с сильными геомагнитными и солнечными возмущениями, есть всплески, вызванные непонятными причинами. Мы избавляемся от них, чтобы для каждого дня точнее определить среднеквадратичное отклонение $\Delta E(i)$ по 15 дням. Далее $\Delta E(i)$ нормируется на её же

числами Вольфа $W > 150$.

Как известно, ионосферные возмущения могут продолжаться сутки после сильных геомагнитных возмущений, поэтому исключались дни, когда $\Sigma Kp > 35$, и следующие сутки – т.е. как положительная, так и отрицательная фазы магнитного возмущения. На рис. 4 приведен сезонный ход $E(i)$ по данным станции «Ташкент» после отбрасывания отклонений свыше 0.2 МГц и солнечно- и магнитно возмущенных дней.

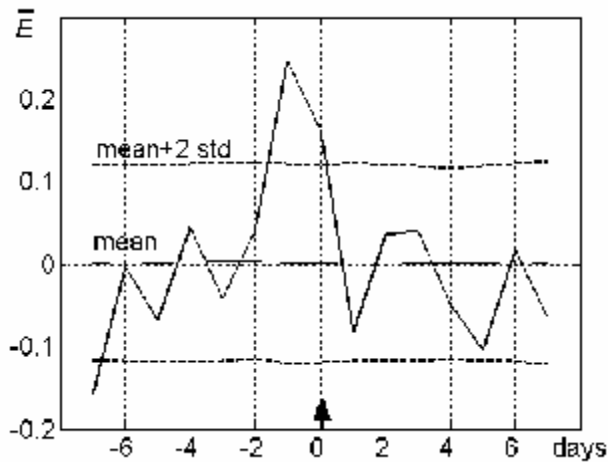


Рис.5. Результат наложения эпох для «зимних» землетрясений, 267 событий.

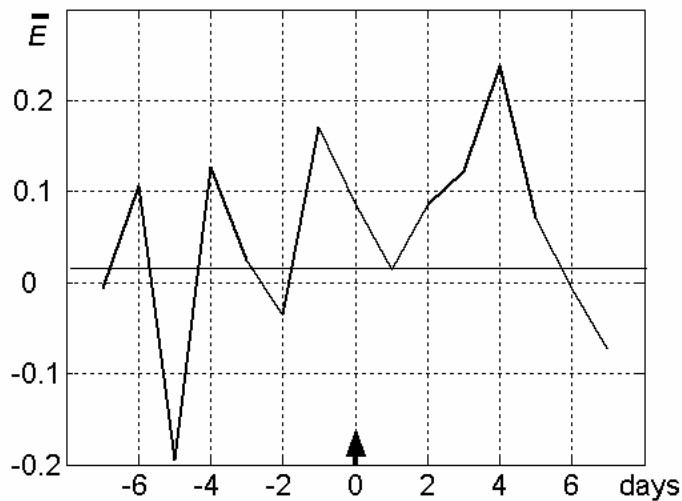
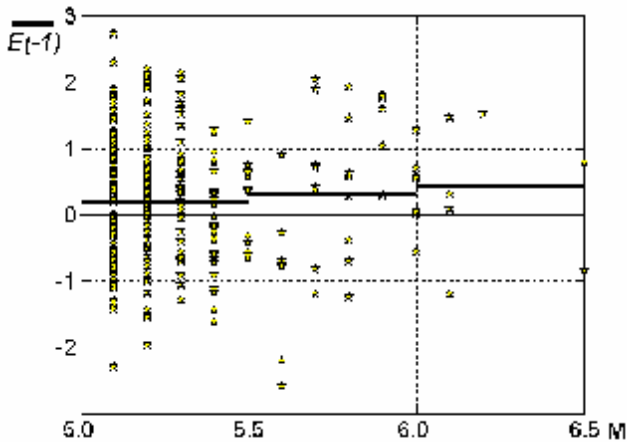
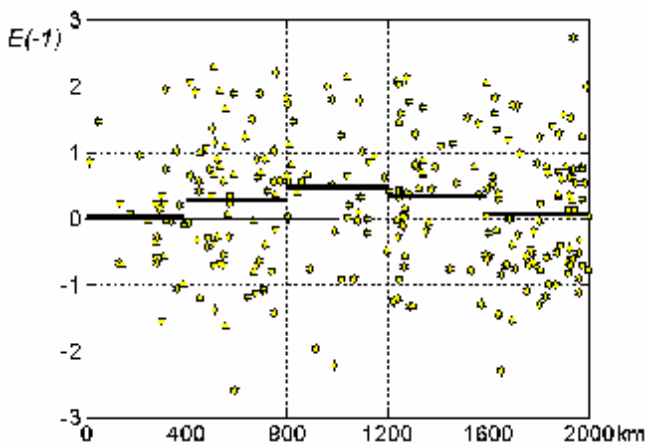
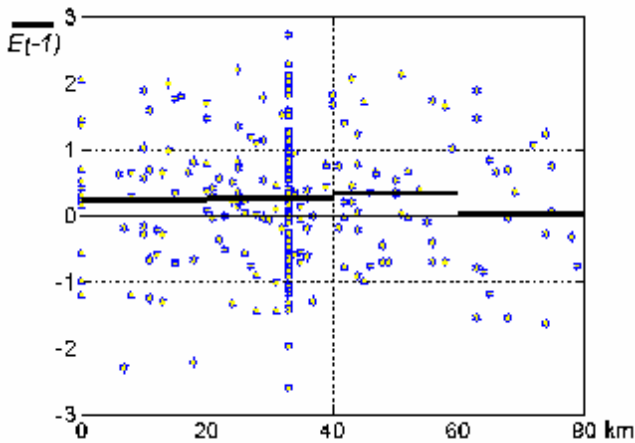


Рис.6. Результат наложения эпох для «летних» землетрясений, 80 событий.

Проведем предварительную процедуру наложения эпох по интервалу времени $(-7, \dots +7)$ суток для землетрясений с $M > 5.0$ $h < 80$ $R < 2000$ км, используя данные станции «Ташкент», получим функцию $\bar{E}(i)$. Для землетрясений, произошедших зимой (с сентября по апрель) наблюдается увеличение $\bar{E}(i)$ в (-1) и (0) дни (рис. 6, жирная линия). Отметим, что при наложении эпох в среднем для каждого дня (для -5) или $(+1)$ имеются данные для 267 событий. Штриховой линией показан доверительный 95% интервал, полученный с помощью метода моделирования случайного процесса. (см. Липеровская и др., настоящий сборник, с...), тонкая сплошная линия – среднее значение. В (-1) день значение $\bar{E}(-1)$ превышает указанный уровень значимости. В этот день для 154 событий наблюдается увеличение E , и для 114 – уменьшение. Для землетрясений, произошедших в летние месяцы (рис. 6), увеличения $\bar{E}(i)$ перед землетрясениями не наблюдается. В (-1) день $E(-1)$ больше среднего значения для 43 землетрясений, и меньше среднего значения для 37 событий.

Рис.7. Зависимость $E(-1)$ от магнитуды M .Рис.8. Зависимость $E(-1)$ от расстояния R .Рис.9. Зависимость $E(-1)$ от глубины очага.

Рассмотрим зависимость $E(i)$ в (-1) день от магнитуды (Рис.7). Жирная линия показывает среднее значение $\bar{E}(-1)$ для землетрясений с магнитудами M , лежащими в соответствующем диапазоне. Видно, что с увеличением магнитуды наблюдается более сильное увеличение $E(-1)$, и, следовательно, и foE за сутки перед толчком.

Рассмотрим зависимость $E(-1)$ от расстояния до эпицентра (Рис.8). Жирная линия показывает среднее значение $\bar{E}(-1)$ для землетрясений с расстояниями R , лежащими в соответствующем диапазоне. Видно, что увеличение $E(-1)$ наблюдается только для землетрясений в диапазоне расстояний $400 < R < 1600$ км.

Рассмотрим зависимость $E(-1)$ от глубины очага (см. рис. 9). Жирная линия показывает среднее значение $\bar{E}(-1)$ для землетрясений с глубинами h , лежащими в соответствующем диапазоне. Видно, что увеличение $E(-1)$ наблюдается только для землетрясений с $h < 60$ км.

Теперь рассмотрим временную окрестность (-7...+7) суток для землетрясений в окрестности станции «Ташкент» с $M > 5.0$, $h < 60$ км, $400 < R < 1600$ км при условиях: $W < 150$, $\Sigma Kp < 35$. При наложении эпох получаем статистически достоверное (на 99% уровне значимости) повышение $\bar{E}(i)$ на (-1) день (рис 10, левая панель). Штриховой линией показан доверительный 99% интервал, полученный с помощью метода моделирования случайного процесса. тонкая сплошная линия – среднее значение.

Используя данные станции «Петропавловск-Камчатский», проведем аналогичное исследование, при тех же условиях и ограничениях: $M > 5.0$, $1600 > R > 400$, $h < 60$, рассматриваются зимние месяцы, те же ограничения на вариации геомагнитного поля и солнечной активности. На рис. 10, правая панель, приведен результат наложения эпох, при наложении эпох данные имелись для 28 землетрясений. Увеличения $\bar{E}(i)$ перед землетрясениями не наблюдается, наоборот, имеется тенденция к уменьшению перед землетрясениями. И хотя это уменьшение в (-3) день статистически достоверно на 95%

уровне значимости, было бы преждевременно делать выводы о надежном сейсмоионосферном эффекте.

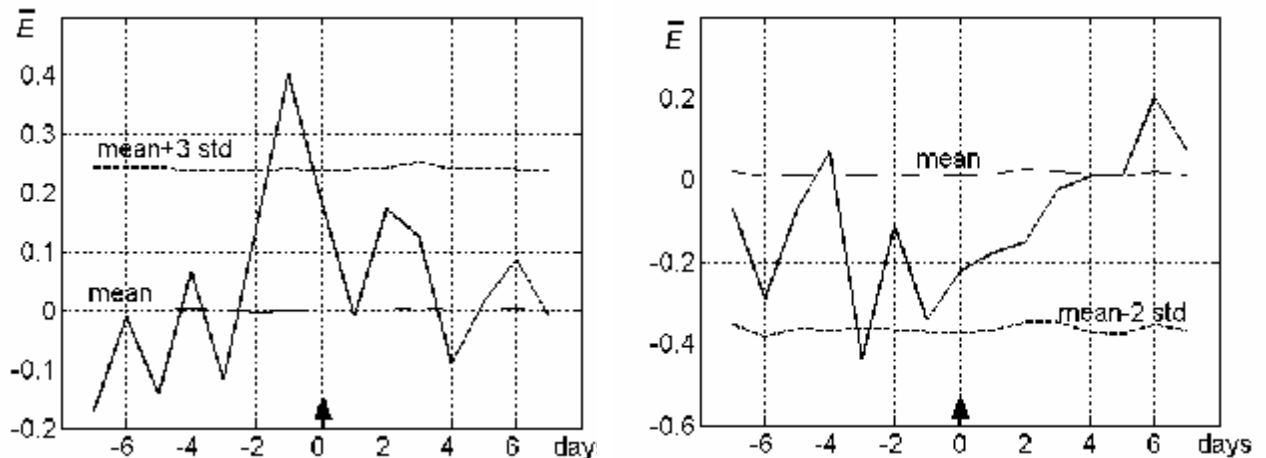


Рис.10. Результат наложения эпох для «зимних» землетрясений, $M>5.0$, $h<60$ км, $400<R<1600$ км, станция «Ташкент», 144 события, (справа), станция «Петропавловск-Камчатский», 28 событий, (слева).

Обсуждение результатов и выводы.

Итак, получено, что по данным станции «Ташкент» «зимние» землетрясения дают увеличение foE за день до события, для «летних» землетрясений увеличения не наблюдается. Эффект имеет место для землетрясений с магнитудами $M>5$ и глубиной очага $h<60$ км, на расстояниях $400<R<1600$ км от эпицентра до станции ВЗ. Статистическая достоверность повышения превышает 99%. Для землетрясений в окрестности станции «Петропавловск-Камчатский» увеличения foE не наблюдается, наоборот, есть тенденция к уменьшению foE за 3-4 суток перед землетрясениями.

Обнаруженные закономерности позволяют сделать вывод, что в ионосфере над станцией «Ташкент» увеличение foE происходит за счет акустико-гравитационных волн (АГВ). Эти волны достигают E -области ионосферы на больших расстояниях от эпицентра (400-1600 км [2]), при диссипации АГВ в E -области происходит нагрев, а при повышении температуры коэффициент рекомбинации, который в E -области зависит от температуры пропорционально T^β , где $\beta<1$ [5], уменьшается, и, следовательно, плотность ионизации увеличивается. АГВ могут пройти через стратосферу только при западных стратосферных ветрах, а именно такие ветры преобладают в зимние месяцы [3]. Землетрясения происходят в окрестности Ташкента – и, по-видимому, над пустыней и горами АГВ могут генерироваться. Области подготовки землетрясений в окрестности «Петропавловска-Камчатского» находятся в море, и механизм сейсмоионосферной связи над Камчаткой, по-видимому, с генерацией АГВ не связан.

Список литературы

1. Антонова Л. А., Иванов-Холодный Г. С., Чертопруд В. Е. Аэрономия слоя Е. – М.: Янус, 1996. – 168 с.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. – 527 с
3. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат. 1987. –271 с.
4. Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Дистанционный отклик слоя Е ионосферы на сильные землетрясения// В сб. "Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно–космических методов". М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 152-155.
5. Николе М. Аэрономия. – М.: Мир, 1964. – 278 с.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ f_oF_2 ИОНОСФЕРЫ ЗА НЕСКОЛЬКО СУТОК ДО И ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ СТАНЦИЙ «ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ» И «ТОКИО»

STATISTICAL ANALYSIS OF IONOSPHERIC CRITICAL FREQUENCY f_oF_2 DISTURBANCES A FEW DAYS BEFORE AND AFTER EARTHQUAKES ON THE DATA OF “PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKIY” AND “TOKYO” STATIONS

*Е.В. Липеровская¹, В.В. Богданов², М.В. Родкин³, К.-В. Мейстер⁴,
А.С. Силина¹, О.В. Мандрикова²*

¹Институт физики земли РАН,

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,

³Геофизический Центр РАН,

⁴Астрофизический институт, Потсдам, Германия

The statistical analysis of critical frequency f_oF_2 averaged over middle-day hours – from 11 till 17 h LT – is carried out. Disturbances of f_oF_2 in connection to earthquakes are distinguished on the background of seasonal, geomagnetic, 11-years and 27-days Solar variations. The normalized values F , obtained by subtracting season run, obtained as mean value on $(-7...+7)$ days interval, from f_oF_2 and dividing the result on its standard deviation are used in analysis. Days with high Solar (Wolf number >100) and geomagnetic ($\Sigma K_p > 30$) disturbances are excluded from the analysis. Events with magnitude $M > 5$, distance from the station $R < 500$ km and depth $h < 70$ km are analyzed. The superimposed method is used to the F time dependence, and it is obtained that F increases 3÷5 days before earthquakes and then decreases a day – two before the shock. The decreased values of F remained two-tree days after earthquakes with $M > 5.5$. The effect depends on magnitude of an earthquake. For the events with $M > 5.5$ the reliability of the effect is more than 95%. Data of more than 80 earthquakes in the vicinity of Petropavlovsk-Kamchatsky and of more than 200 earthquakes in the vicinity of Tokyo are used in the analysis and analogous results are obtained.

Введение

В начале 1980-х годов по результатам анализа наблюдений ионосферы на станциях вертикального зондирования в сейсмоактивных районах Средней Азии было высказано предположение, что критическая частота f_oF_2 , соответствующая плазменной частоте в максимуме слоя F , может оказаться достаточно чувствительной к процессу подготовки землетрясений [5, 2, 3, 4, 11, 9]. Эта идея требовала проверки и практического применения, учитывая наличие большого количества непрерывно действующих станций вертикального зондирования ионосферы, расположенных в различных точках нашей планеты, в том числе и в сейсмоактивных регионах.

Анализ результатов исследования поведения f_oF_2 в ночных условиях по нескольким станциям для ряда землетрясений порядка десятка с $M > 4.5$ [9, 8] привел к выводу о наличии эффекта повышения среднего ночного уровня f_oF_2 перед землетрясениями за несколько дней до события. В большинстве случаев в периоды подготовки землетрясений за 2-3 сут до момента толчка в широкой области ионосферы $\pm 10^\circ$ по широте и $\pm 100^\circ$ по долготе в ночных условиях в магнитоспокойное и умеренно возмущенное время происходит среднее увеличение f_oF_2 . С другой стороны, отмечается относительный минимум f_oF_2 над эпицентральной областью за одни сутки до события. Заметим, что в цитированных работах речь шла о землетрясениях в Средней Азии. Далее, увеличение f_oF_2 перед несколькими очень сильными землетрясениями было отмечено в работах [16, 1, 7]. Однако в ряде случаев предвестниковый эффект не наблюдался.

С другой стороны, в работах [12, 15, 18, 19] отмечалось уменьшение критической частоты f_oF_2 перед несколькими очень сильными землетрясениями ($M > 6$). Статистические исследования уменьшения f_oF_2 в послеполуденные часы перед землетрясениями с $M > 5$ на Тайване были проведены в работе [13]. В этой работе было показано, что уменьшение

происходит в интервале 12.00-18.00 LT за 0-5 дней перед землетрясениями и может иногда достигать 25%.

Цель настоящей работы – провести статистический анализ эффекта увеличения или уменьшения $foF2$ за 3-5 суток до землетрясений, определить, при каких магнитудах и расстояниях до эпицентра эффект имеет место.

Метод исследования

В настоящей работе были исследованы ионосферные эффекты сильных землетрясений с магнитудами $M > 5$, расстояниями от станции ВЗ до эпицентров $R < 500$ км, и глубиной очага $h < 70$ км в Японии – станция «Кокубунжи» (Токио) ($\varphi = 35.7^\circ$ с.ш., $\lambda = 139.5^\circ$ в.д., 1957-1990 гг.), и на Камчатке – станция «Петропавловск-Камчатский» ($\varphi = 53.0^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.7^\circ$ в.д., 1968-1995 гг.) на основе представленных в Интернете <http://www.rl.ac.uk.wdcci/data.html> данных.

Дневная F -область ионосферы формируется при воздействии солнечного излучения на нейтральную атмосферу в интервале длин волн 14–80 нм и связана, в основном, с ионизацией компонент атмосферы O и N_2 . Высота и плотность главного максимума зависят от конкуренции процессов ионизации за счет солнечного излучения и рекомбинации. Для исследования сейсмоионосферных эффектов в настоящей работе было выбрано дневное время с 11 до 16 ч LT, когда степень ионизации ионосферы максимальна, с одной стороны, а с другой стороны, сильно ионизованные области расположены ближе к земной поверхности, чем в другое время суток. Усредненная за указанное выше дневное время частота $foF2_{day}$ сложно зависит от сезона, имеет два максимума – весной и осенью, и два минимума – зимой и летом. Сезонный ход $foF2_{day}$ по данным станции «Токио» за 1957-1990 гг. представлен на рис.1.

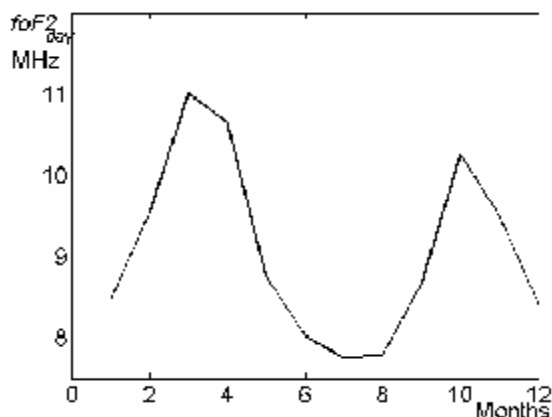


Рис.1. Сезонный ход $foF2_{day}$.

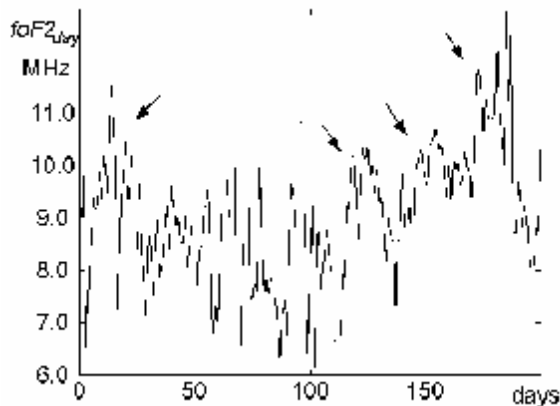


Рис.2. Фрагмент хода $foF2_{day}$, стрелки указывают всплески, вызванные 27-дневными солнечными вариациями.

Кроме того, в ходе $foF2_{day}$ просматриваются вариации, связанные с 27-дневным солнечным циклом (Рис.2). Таким образом, выделение литосферно-ионосферных эффектов на фоне такого сезонного хода является сложной задачей.

Чтобы исключить сезонную зависимость, из текущего значения $foF2_{day}$ вычитается усредненное по 15 дням – (с -7 по $+7$) для каждого дня значение этой величины:

$\Delta f(i) = foF2_{day}(i) - foF2_{15days}(i)$. Отметим, что короткий интервал усреднения выбран для уменьшения влияния 27-дневного солнечного цикла. После получения разницы текущего и сезонного значения отбрасываем отклонения, по абсолютной величине большие 2 МГц. Число таких отклонений составляет порядка 1% всего массива данных. Их большая часть связана с сильными геомагнитными и солнечными возмущениями, есть всплески, вызванные непонятными причинами. Мы избавляемся от них, чтобы для каждого дня точнее определить среднее квадратичное отклонение $\Delta f(i)$ по 15 дням. Далее $\Delta f(i)$ нормируется на её же среднее квадратичное отклонение. В результате получается, что каждый день анализируемого интервала характеризуется

значением нормированной функции $F(i) = \Delta f(i) / \sigma(\Delta f(i))$.

Ионосферные эффекты землетрясений приходится искать на фоне солнечных и геомагнитных возмущений, поэтому при исследовании эффектов землетрясений рассматривались только те сутки, при которых солнечные и геомагнитные возмущения были не слишком большие. Единой точки зрения по этому вопросу нет. В данной работе исключались из рассмотрения дни с числами Вольфа $W > 100$. Как известно, ионосферные возмущения могут продолжаться сутки после сильных геомагнитных возмущений, поэтому исключались дни, когда $\Sigma Kp > 30$, и следующие сутки.

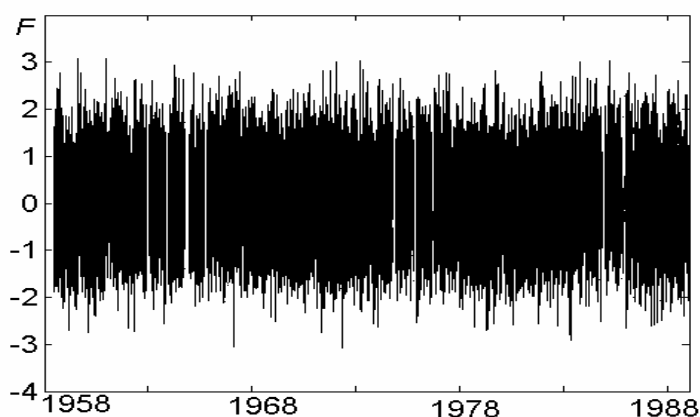


Рис.3. Ход нормированной величины F («Токио»).

На рис 3. приведен ход нормированной величины F , вычисленный по данным станции «Токио» за 32 года.

Перейдя от исследования $foF2$ к исследованию F всё же полностью избавиться от сезонного хода не удалось, однако теперь сезонный ход вносит слабый вклад в ход F .

На рис. 4 и рис.5 приведены сезонный ход функции F для «Токио» и «Петропавловска-Камчатского». Прямая штриховая линия показывает среднегодовые значения

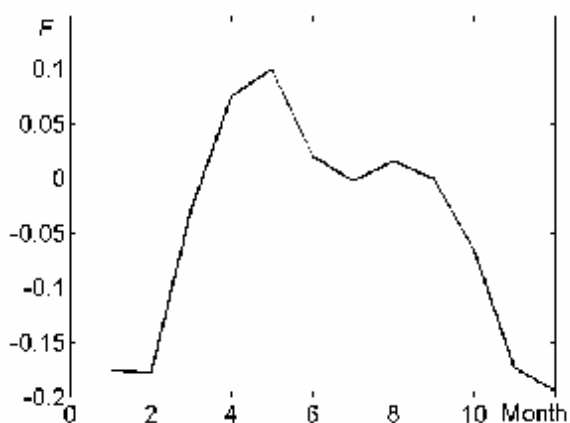


Рис.4. Сезонный ход F по данным станции «Токио».

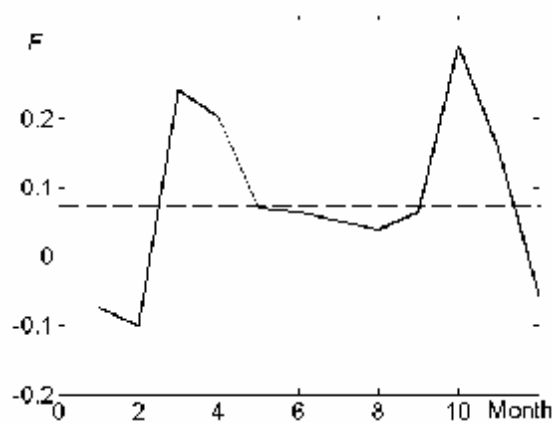


Рис.5. Сезонный ход F по данным станции «Петропавловск-Камчатский».

Максимальное значение величины сезонного хода составляет 0.15 для «Токио», и 0.30 для Петропавловска. Заметим, что для «Петропавловска» очень велика амплитуда сезонного хода F для марта и октября, (см. Рис. 5) В данной работе нас интересуют основные закономерности эффектов, связанных с сейсмической активностью, поэтому исключаем из анализа данные F за март и октябрь по станции «Петропавловск-Камчатский».

При анализе сначала рассматриваем землетрясения с магнитудами $M > 5.5$, расстояниями от эпицентра до станции $R < 500$ км и глубинами очага $h < 70$ км.

Проведем процедуру наложения эпох для F по интервалу времени $(-15, \dots, +15)$ суток по данным каждой станции, и для каждой станции ВЗ получаем функцию $\bar{F}$.

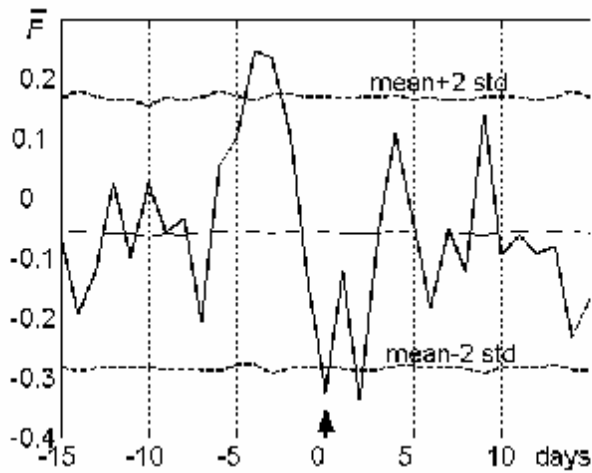


Рис.6. Результат наложения эпох по данным станции «Токио», 67 землетрясений, $M > 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

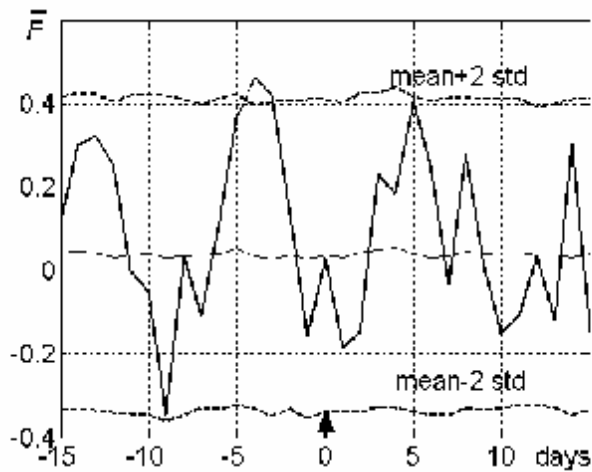


Рис.7. Результат наложения эпох по данным станции «Петропавловск-Камчатский», 24 землетрясения, $M > 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

землетрясений. Проводим процедуру наложения эпох для виртуальных землетрясений точно так же как для реальных землетрясений. Таких серий может быть несколько тысяч. Поскольку данные с пропусками, оставляем для анализа только те результаты процедуры наложения эпох, для которых число дней с имеющимися в наличии данными отличается от реального числа дней не более чем на 20% (например, для «Токио» число дней может составлять 67 ± 13 , для «Петропавловска-Камчатского» – 24 ± 5). Таких оставленных для анализа серий должно быть несколько сотен. Для каждого дня от (-15) до (+15) полученные по нескольким сотням серий результаты наложения эпох распределены в соответствии с нормальным законом. Для таких серий для каждого дня от (-15) до (+15) подсчитываем среднее и среднеквадратичное отклонение. Число серий должно быть так велико, чтобы среднее и среднеквадратичное не менялось при увеличении числа серий. Среднее значение на рисунках представлено тонкой сплошной линией, среднее + 2 среднеквадратичных, что означает 95% уровень значимости, представлено штриховой линией.

Для дальнейшего исследования сильных с $M > 5.5$, но более далеких землетрясений с $500 < R < 1000$ км интервалы (-7,+7) дней во временной окрестности событий с $M > 5.5$ и $R < 500$ км исключены, чтобы исключить влияние процессов подготовки более сильных землетрясений. Для землетрясений $500 < R < 1000$ км в окрестности Токио небольшое

Для землетрясений в окрестности «Токио» (Рис.6) наблюдается увеличение $\bar{F}$ (жирная линия) на (-6) – (-2) дни, причем в дни (-4, -3) величина $\bar{F}$ превышает 95% доверительный интервал (штриховая линия). Сплошная тонкая линия – среднее значение $\bar{F}$. Для событий в окрестности «Токио» уменьшение $\bar{F}$ после землетрясений тоже значимо. При наложении эпох данные для каждого дня имелись в среднем для 67 событий.

Для землетрясений в окрестности «Петропавловска-Камчатского» (Рис.7) наблюдается увеличение $\bar{F}$ для на (-5) – (-3) дней. При этом в дни (-4, -3) $\bar{F}$ превышает 95% доверительный интервал. При наложении эпох данные для каждого дня имелись в среднем для 24 событий.

Доверительный интервал вычисляется методом моделирования фонового распределения с помощью случайного процесса. Предполагаем, что землетрясения распределены равномерно по интервалу наблюдения. С помощью генератора случайных чисел выбираем дни виртуальных событий, их число равно числу реальных

увеличение $\bar{F}$ перед землетрясениями наблюдается, но оно незначимо статистически. В окрестности «Петропавловска-Камчатского» число таких землетрясений порядка 10, что недостаточно для анализа.

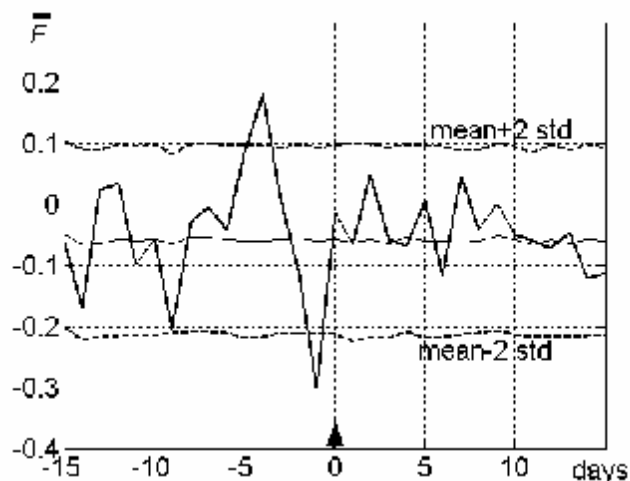


Рис. 8. Результат наложения эпох по данным станции «Токио», 129 землетрясений, $5.0 < M \leq 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

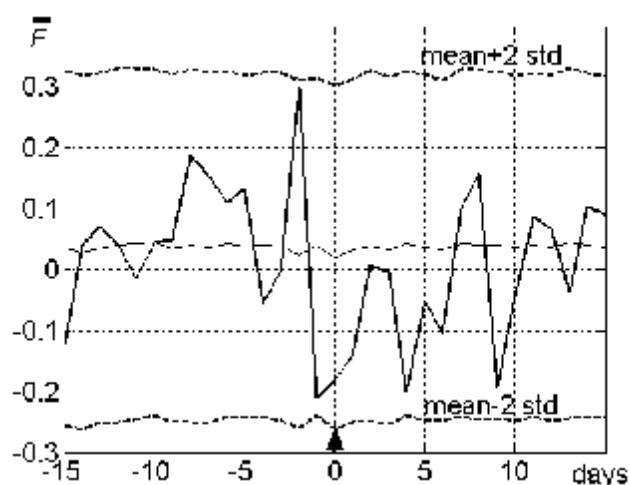


Рис.9. Результат наложения эпох по данным станции «Петропавловск-Камчатский», 44 землетрясения, $5.0 < M \leq 5.5$, $R < 500$ км, $h < 70$ км.

Чтобы выделить чистый эффект для более слабых землетрясений, интервалы $(-7, +7)$ дней во временной окрестности сильных событий с $M > 5.5$ $R < 1000$ км исключены из рассмотрения.

Теперь перейдем к исследованию эффектов более слабых землетрясений: $5.0 < M \leq 5.5$ при $R < 500$ км. Оказалось, что времена наблюдения максимального увеличения $\bar{F}$ различаются для «Токио» и «Петропавловска-Камчатского» (рис. 8, 9).

Для землетрясений $5.0 < M \leq 5.5$ в окрестности «Токио» наблюдается значимый эффект увеличения $\bar{F}$ за 5 дней до землетрясения.

Для таких землетрясений в окрестности «Петропавловска-Камчатского» увеличение $\bar{F}$ наблюдается на (-2) день, но оно незначимое. Однако следует отметить, что число таких землетрясений в окрестности «Петропавловска» невелико.

Уменьшение $\bar{F}$ после события статистически незначимо на 95% уровне значимости.

Таким образом, показано, что наблюдается увеличение $foF2$ за 3-5 сут до землетрясений с $M > 5.0$. Для землетрясений с $M > 5.5$ также просматривается уменьшение за день-два до события.

Обсуждение результатов и выводы

Итак, получено, что за 3-6 суток до землетрясений с $M > 5.5$ в среднем наблюдается заметное увеличение $foF2$, а затем имеется тенденция к уменьшению этого параметра к моменту землетрясения. Для землетрясений с магнитудами $5.0 < M \leq 5.5$ также наблюдается сначала увеличение $foF2$, а затем уменьшение к моменту землетрясения, но характерные времена увеличения $foF2$ меньше. Эти результаты требуют усложненную интерпретацию эффектов.

В настоящее время имеются две основных гипотезы связи в системе «литосфера-атмосфера-ионосфера», изложенные в монографиях [8, 16], на основе которых можно объяснять наблюдаемые модификации в ходе $foF2$ до и после землетрясений.

Одна из гипотез – «акустико-гравитационная», в соответствии с которой в атмосфере над областью подготовки землетрясений генерируются акустико-гравитационные волны, которые далее распространяются через атмосферу вверх под

малым углом к земной поверхности. Эти волны доходят до ионосферных высот достаточно далеко по горизонтали от эпицентров будущих землетрясений и приводят к возмущению ионосферы благодаря столкновениям ионов с нейтралами [14]. В результате происходит процесс нагрева ионосферной плазмы, расплывания неоднородностей и уменьшение максимума плотности слоя $F2$. Интерпретация на основе акустико-гравитационной гипотезы вряд ли может быть использована, так как рассматриваемый эффект наблюдается на расстояниях до 500 км.

Другая гипотеза – «электромагнитная», согласно которой система «Земля-ионосфера» может быть модельно представлена сферическим конденсатором, разность потенциалов которого поддерживается грозовой активностью. За несколько суток до землетрясений вероятны пульсации выбросов радона в атмосферу, приводящие к нестационарным процессам ионизации и к увеличению проводимости и вертикального тока в атмосфере [10, 20, 17]. Соответственно, вертикальный ток в нижней ионосфере также возрастает, и повышается температура электронов в E -области. Повышение температуры далее приводит к уменьшению коэффициента рекомбинации, который в E -области зависит от температуры пропорционально T^β , где $\beta < 1$ и, соответственно, увеличению концентрации заряженных частиц. Таким образом, происходит увеличение плотности заряженных частиц в E -области. При трансляции возмущений плотности из E -области в нижнюю часть F -области и далее вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля происходит нагрев, усиление диффузионного расплывания неоднородностей, и, соответственно, уменьшение максимума плотности слоя $F2$ за сутки-двое до и после сильных землетрясений.

Для интерпретации эффекта увеличения $foF2$ за 3-5 дней перед землетрясениями обратим внимание на другой возможный конкурирующий процесс. Можно предположить, что в F -области за 3-5 дней, по-видимому, преобладает нестационарный процесс подъема вверх нейтральной компоненты а) за счет отдельных акустических импульсов, идущих снизу, б) за счет возмущений электрического поля и проводимости в атмосфере. Это ведет к эпизодам подъема плазмы вверх, к уменьшению рекомбинации и, соответственно, увеличению $foF2$, т.е. плотности плазмы в максимуме слоя. При этом нагрев, диффузия и расплывание максимума слоя $F2$ менее существенны. Далее, за два-три дня до момента землетрясения и после него, наоборот, преобладает процесс нагрева электронов плазмы F -области, усиливаются рекомбинация и диффузия, ведущие к расплыванию максимума и уменьшению $foF2$.

Заметим, что предложенная гипотеза снимает противоречия между работами, утверждавшими, что главный эффект – это увеличение $foF2$ перед землетрясениями, и работами, утверждавшими, что главный эффект – это уменьшение. В различных случаях преобладают разные процессы и разные члены в уравнении для плотности плазмы [6]. В каждой конкретной ситуации результирующий эффект определяется не только передаваемой энергией, ведущей к нагреву, но и ориентацией и величиной среднего электрического поля, скоростью нагрева плазмы и ее конвекции из области повышенного давления, системой ветров и близостью зондируемой области к источнику возмущения.

Список литературы

1. Гайворонская Т.В. Ионосферные вариации в сейсмоактивных районах // Физика Земли. 2005. № 3. С. 56-60.
2. Гохберг М.Б., Гершензон Н.И., Гуфельд И.Л., Кустов А.В., Липеровский В.А., Хусамиддинов С.С. О возможных эффектах воздействия электрических полей сейсмического происхождения на ионосферу // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. Т. 24. № 2. С. 217-222.
3. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Липеровский В.А. Электромагнитные предвестники в системе прогноза землетрясений: поиски, проблемы // Вестник АН СССР. 1987. № 3. С. 43-54.
4. Гохберг М.Б., Кустов А.В., Липеровская Р.Х., Липеровский В.А., Харин Е.П., Шалимов С.Л. О возмущениях в F -области ионосферы перед сильными землетрясениями //

- Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 4. С. 12–20.
5. Гохберг М.Б., Пилипенко В.А., Похотелов О.А. О сейсмических предвестниках в ионосфере // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 10. С. 17–21.
 6. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход). Л.: Гидрометеиздат, 1990. 190 с.
 7. Корсунова Л.П., Хегай В.В. Сейсмо-ионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45, №5. С.665-671.
 8. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
 9. Липеровский В.А., Алимов О.А., Шалимов С.Л., Гохберг М.Б., Липеровская Р.Х., Саидшоев А. Исследование F-области ионосферы перед землетрясениями // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 12. С. 77–86.
 10. Сорокин В. М., Чмырев В. М. Физико - химическое воздействие очага землетрясения на околоземное космическое пространство // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 6. С. 136–144.
 11. Хакимов Ф.Х., Липеровский В.А., Шалимов С.Л., Алимов О.А., Липеровская Р.Х., Рубцов Л.Н. О возмущениях в ионосфере перед рядом землетрясений в Таджикистане 1987 г. // Докл. АН Тадж. ССР. 1989. Т. 32. № 12. С. 824–828.
 12. Hobara Y., Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event // J. Atmos. Terr. Phys. 2005. V. 67. P.677-685.
 13. Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. 111, A05304, doi:10.1029/2006.
 14. Miyaky K., Hayakawa M., Molchanov O.A. The role of gravity waves in the lithosphere-ionosphere coupling as revealed from the subionospheric LF propagation data // Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Ed. M. Hayakawa, O.A. Molchanov. Tokyo: TERRAPUB, 2002. P.229-233.
 15. Ondoh T. Seismo-ionospheric phenomena // Adv. Space Res. 2000. V.26, N8. P.1267-1272.
 16. Pulnits S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 2004. 215 p.
 17. Pulnits S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P., Lomonosov A.M. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling // Adv. Space Res. 2000. V.26, N 8. P.1209-1218.
 18. Rios V.H., Kim V.P., Hegai V.V. Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the great San Juan earthquake of 23 November 1977 // Adv. Space Res. 2004. V.33. P. 323-327.
 19. Singh B., Kushwah V., Singh O.P., Lakshmi D.R., Reddy B.M. Ionospheric perturbations caused by some major earthquakes in India // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V.29. P.537-550.
 20. Sorokin V.M., Yashenko A.K., Hayakawa M. Formation mechanism of lower-ionospheric disturbances by the atmosphere electric current over a seismic region // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2006. V.68. P.1260-1268

ЭФФЕКТ КРАТКОВРЕМЕННОГО УСИЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЛЬСАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ 13 ЯНВАРЯ 2007 ГОДА

EFFECT OF SHORT-TERM INTENSITY AMPLIFICATION OF GEOMAGNETIC FIELD ELEMENT PULSATIONS ON JANUARY 13, 2007

И.Н. Поддельский, А.И. Поддельский

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

In the given report the effect of short-term amplification of intensity of pulsations of geomagnetic field elements on the records of analog and digital magnetic variation stations (MVS) at night on January, 13, 2007 is considered. AMVS and DMVS records of "Magadan", "Paratunka", "Zabaikalskoe" and "Novosibirsk" geomagnetic observatories are used. Possible reasons of the considered phenomenon are analyzed.

В данном сообщении рассматривается «эффект кратковременного усиления интенсивности пульсаций элементов геомагнитного поля» на записях аналоговых (датчики Боброва) магнитовариационных станций ночью 13 января 2007 года. При рассмотрении магнитограммы аналоговой магнитовариационной станции обсерватории «Магадан» за 13 января 2007 года наше внимание привлекло аномальное кратковременное (в течение 15 минут) усиление интенсивности пульсаций всех элементов (компонент) геомагнитного поля на фоне спокойного суточного хода, представленное на рисунке 1.

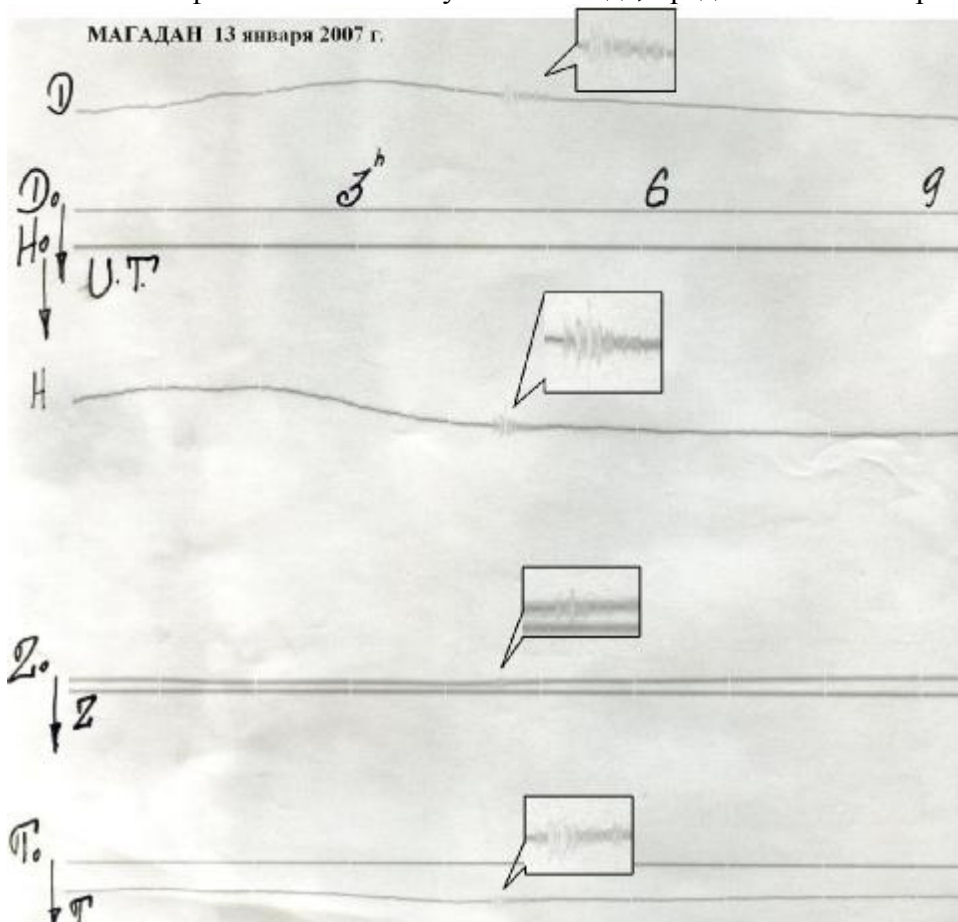


Рис.1. Магнитограмма (выборка) записи вариаций элементов геомагнитного поля.

Был задан вопрос – какова причина этого явления. Рассматривались несколько возможных причин: воздействие больших магнитных масс (проезд авто-мото транспорта), механическое воздействие на фундамент постаментов с датчиками, реальное изменение параметров геомагнитного поля. Первая причина отпала после анализа снегового покрова вблизи вариационного магнитного павильона. Вторая причина показалась более реальной,

т.к. механическое воздействие на фундамент постаментов датчиков возможно, например, в случае сильного местного (100-150км) землетрясения.

Бобровские датчики по своему строению, по сути, являются сейсмографами - система кварцевого подвеса весьма чувствительна к механическим колебаниям. Вероятно, в Магадан пришла сильная поверхностная волна, которая и вызвала колебания чувствительной системы датчиков аналоговой серии. Т.е. возможен не электромагнитный, а чисто сейсмический эффект кратковременного усиления интенсивности пульсаций элементов геомагнитного поля. Обращение к банку данных сейсмических событий дало отрицательный ответ на подобную возможность в указанное время, однако было отмечено сильное далекое землетрясение. 13 января 2007 года в 04 часа 23 мин 21,16 сек по Гринвичу в той же очаговой области к востоку от южной части Курильской гряды, где 15 ноября 2006 г. случилось крупнейшее по магнитуде ($M=8.3$) землетрясение, произошло еще одно землетрясение с магнитудой $M=8.2$. Из-за относительно неглубокого расположения гипоцентра (глубина около 10км) сейсмический эффект в эпицентре превысил 11 баллов. Географические координаты его эпицентра, по данным Геофизической службы РАН, 46.24° северной широты и 154.52° восточной долготы. Глубина гипоцентра 10км. Это землетрясение ощущалось от Камчатки до Японии, по всем Курильским островам: в Северо-Курильске – силой 5-6, в Курильске – 4-5, в Петропавловске – 3-4, в Южно-Курильске и Малокурильске – 3 балла, по 12-балльной шкале МСК-64.

На рис. 2 представлены фрагменты записей с цифровых сейсмостанций Петропавловск-Камчатский, Магадан, Арти (Новосибирск).

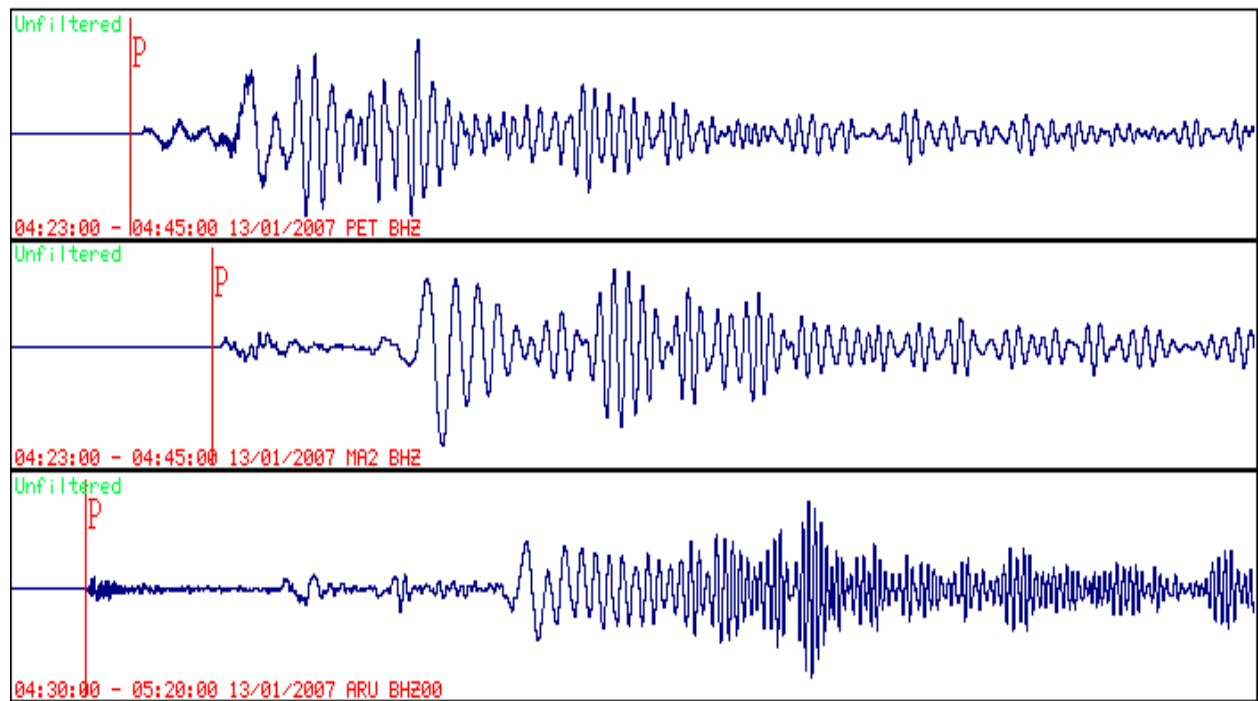


Рис.2. Фрагменты записей с цифровых сейсмостанций Петропавловск-Камчатский, Магадан, Арти (Новосибирск).

Расстояние от эпицентра данного землетрясения до Магадана около 1600км, при скорости поверхностной сейсмической волны 3-4 км/с получаем ожидаемое время прихода волны до Магадана примерно 6,5-8,5 минут. Аналогично для Хабаровска это время составит 6-8 минут (около 1500км), для П.-Камчатского 3,5-4,5 минуты (около 870км), для Новосибирска 19-27 минут (около 4900км). Исходя из представленных на рис.2 фрагментов записей время прихода сейсмической волны для Магадана составляет 7,2 минуты, для П.-Камчатского – 4 минуты, для Новосибирска – 20,6 минуты. Т.е. приблизительный расчет и реальные записи сейсмограмм дают близкие значения.

Для дальнейшего анализа на рис. 3 представлены фрагменты записей Н-компоненты геомагнитного поля для аналоговых магнитовариационных станций «Магадан», «Паратунка» (П.-Камчатский), «Хабаровск» (Забайкальское) и «Ключи» (Новосибирск).

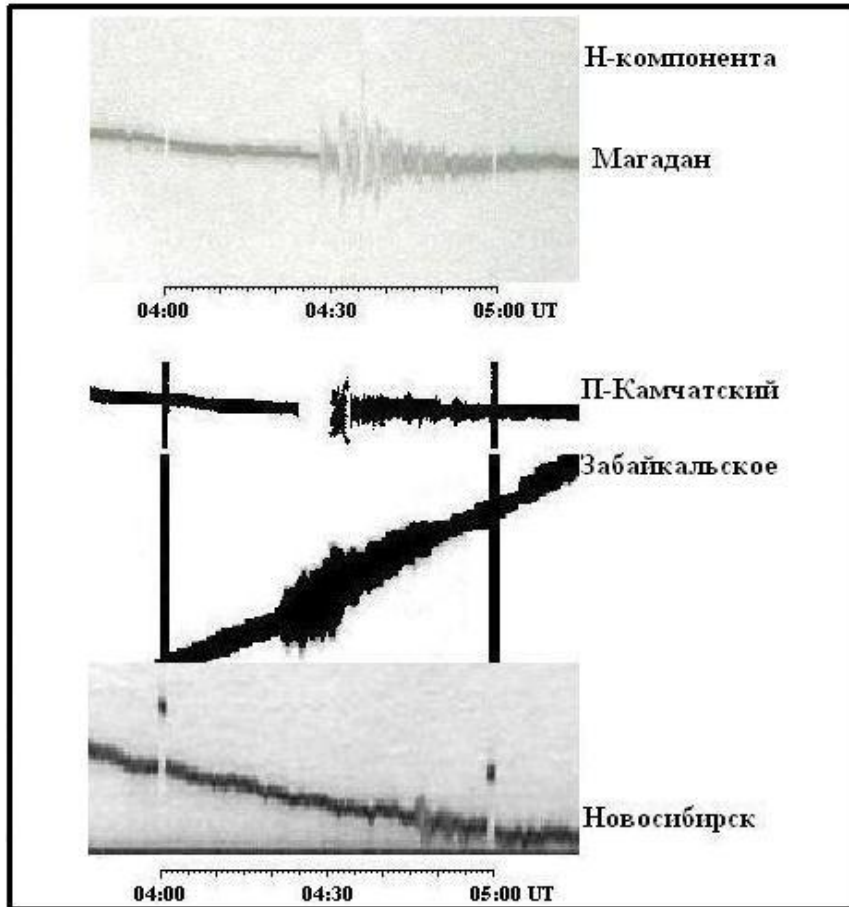


Рис.3. Фрагменты записей аналоговых магнитовариационных станций «Магадан», «Паратунка» (П.-Камчатский), «Хабаровск» (Забайкальское) и «Ключи» (Новосибирск).

Из рассмотрения этих материалов видно, что «эффект кратковременного усиления интенсивности пульсаций элементов магнитного поля» на магнитовариационной станции «Магадан» зарегистрирован в 04:28, на станции «Паратунка» (П.-Камчатский) в 04:24, на станции «Забайкальское» (Хабаровск) в 04:22, на станции «Ключи» (Новосибирск) в 04:46 UT. Полученные результаты представлены в таблице 1 и сильно расходятся по времени с расчетами и результатами записи сейсмограмм (т.е. со временем регистрации землетрясения в пунктах наблюдения).

Таблица 1.

Время регистрации:	Магадан	П.-Камчатский	Хабаровск	Новосибирск
На сейсмограмме	04ч 30,55м	04ч 27,35м	~ 04ч 30м	04ч 44м
На магнитограмме	04ч 28м	04ч 24м	04ч 22м	04ч 46м

Привязка времени на аналоговых магнитовариационных станциях осуществляется с точностью до 1 сек и не объясняет причину такого большого разрыва данных регистрации. Как видно из таблицы 1 и рисунка 3, можно объяснить некоторую разницу данных регистрации сейсмограммы и магнитограммы для Новосибирска, т.к. на полученной магнитограмме трудно (в силу малости) точно отождествить начало эффекта усиления интенсивности пульсаций Н-компоненты магнитного поля. Но не удастся объяснить, почему для всех других магнитовариационных станций эффект усиления пульсаций наступает раньше, чем в пункты наблюдений придет сейсмическая волна.

Причем разница (эффект наблюдается раньше) составляет от 2,55 минут для Магадана до 8 минут для Хабаровска (П.-Камчатский – 3,35м).

Надо отметить, что ретроспективный поиск аналогичных воздействий сейсмических явлений на поведение элементов геомагнитного поля не дал результатов. Некоторые землетрясения (как местные, так и сильные дальние) сопровождаются эффектом изменения параметров записи геомагнитного поля, но гораздо менее интенсивным и в длительностью до 5 минут, тогда как в рассматриваемом случае указанный период составляет 15-22 минуты (Магадан). Обращает на себя внимание и тот факт, что эффект сильнее выражен для Магадана, затем по нисходящей для Хабаровска и совсем мало для П.-Камчатского, хотя последний находится на самом коротком расстоянии от эпицентра землетрясения. Данное землетрясение сопровождалось множественными афтершоками, которые регистрировались каждые 15-30 минут, но ни один из них не дал отклика на магнитограмме, как и землетрясения 13.01.07 в Хабаровске (землетрясение силой в пять баллов произошло в 9.38 местного времени (2.38 мск) в точке с координатами 136,89 восточной долготы и 51,12 северной широты, на глубине 25 километров) и 15.01.07 в Японии (его магнитуда составила 5,7 по шкале Рихтера), 12.01.07 на юге Курильских островов (06:36 LT с магнитудой 5 по шкале Рихтера), 16.01.07 в П.-Камчатском (04:36, в 40км от п.Ганалы Елизовского района с эпицентром на глубине 280 км с координатами 53,6° с.ш., 157,03° в.д. с магнитудой 4,2). Данный перечень близких по дате землетрясений приведен для показа того, что данное землетрясение носило какой-то особый характер и как то повлияло на характеристики аналоговых магнитовариационных датчиков, вызвав на них запись, которую можно расценить как «эффект кратковременного усиления интенсивности пульсаций элементов геомагнитного поля».

Интересно посмотреть и на записи цифровой магнитовариационной станции (ЦМВС-6), датчики которой сделаны на основе датчиков Боброва, т.е. для них тоже справедливо утверждение, что они являются отличными сейсмодатчиками. На рисунке 4 и 5 показаны построенные по цифровым данным записи вариаций элементов геомагнитного поля 13 января 2007 года за период с 04:20:00 по 05:00:00 UT, на которых также хорошо виден «эффект кратковременного усиления интенсивности пульсаций». Причем начало небольшого усиления интенсивности пульсаций на записи ЦМВС начинается примерно в 04:28, совпадает с данными аналоговой магнитовариационной станции и соответствует регистрации «предикта» (Р) на сейсмограмме станции «Магадан». Затем примерно в 04:30:30 наблюдается начало сильного усиления интенсивности этих пульсаций, которое совпадает по времени с данными сейсмограммы о

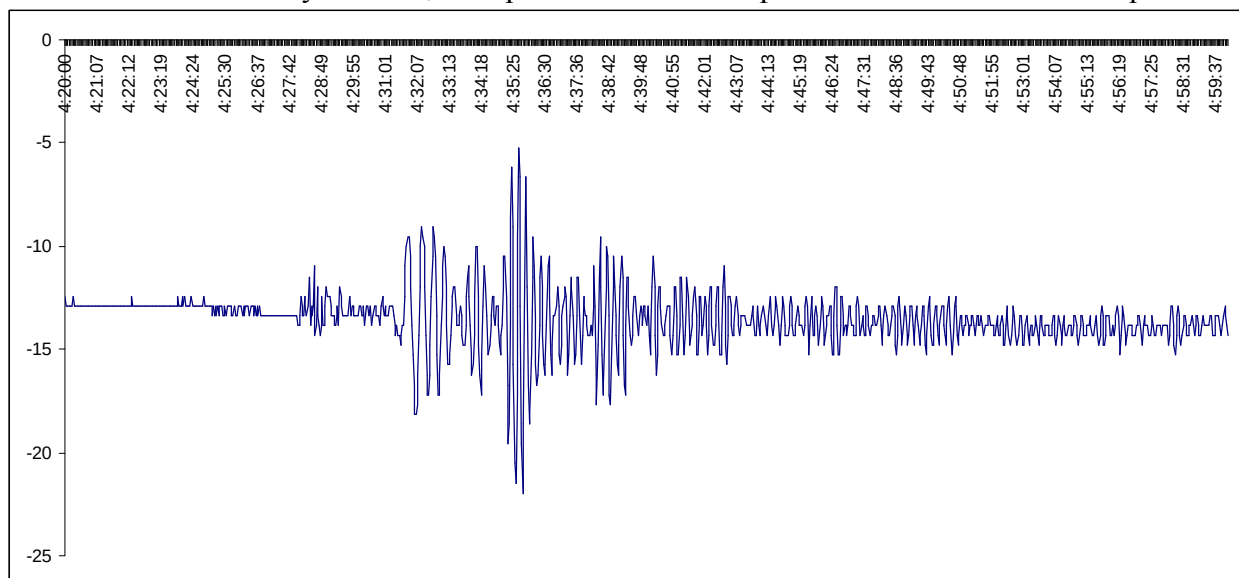


Рис.4. Восстановленная запись вариаций Н-компоненты геомагнитного поля 13.01.07 г., ЦМВС, Магадан.

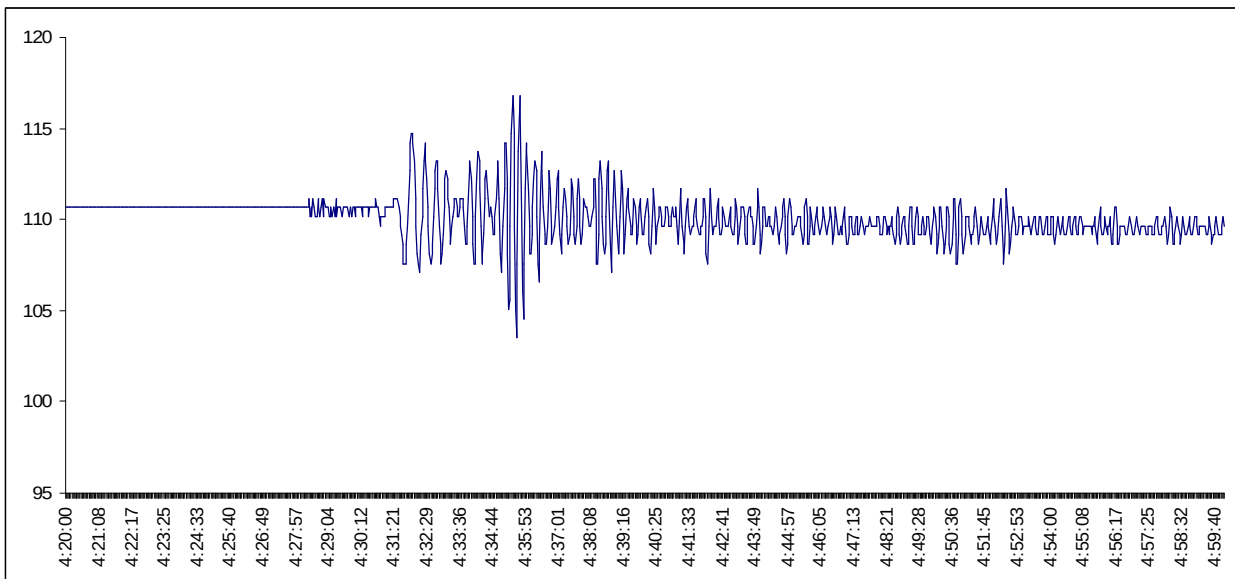


Рис.5. Восстановленная запись вариаций Z-компоненты геомагнитного поля 13.01.07 г., ЦМВС, Магадан.

регистрации землетрясения. На магнитограммах других цифровых магнитовариационных станций, основанных на использовании феррозондовых датчиков (магнитометры DCR-04-01 и FRG-601G), не наблюдался подобный «эффект кратковременного усиления интенсивности пульсаций элементов геомагнитного поля».

Таким образом становится очевидным, что данный эффект вызван сейсмическим воздействием на чувствительные датчики вариометров и не имеет отношения к изменению интенсивности пульсаций элементов геомагнитного поля. Остается вопрос – почему реакция вариационных датчиков при данном землетрясении носит относительно сильный и долговременный характер? Возможно, причина кроется в самом характере и особенностях этого землетрясения. Здесь следует обратиться за помощью к специалистам.

Решения механизма очага землетрясения 13.01.2007 г., рассчитанные по методу тензора момента в Национальном центре информации о землетрясениях США (NEIC) и по методу тензора момента центраида в Гарвардском центре США (HARVARD), свидетельствуют, что в обоих случаях по данным разных центров тип движения в очаге землетрясения одинаков – сброс (с компонентами сдвига). Вместе с тем имеются различия. Согласно NEIC движение в очаге возникло под действием близких по величине напряжений сжатия и растяжения, ориентированных в направлении на север. Согласно HARVARD движение в очаге возникло под действием превалирования напряжений растяжения, ориентированных на юго-восток. Для решения этой задачи, возможно, будет полезным анализ сейсмических и магнитовариационных материалов аналогичного сильного землетрясения, которое произошло в этом же месте 15 ноября 2006 г.

**КОМПЛЕКСНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕЛИО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**COMPLEX DIAGNOSIS OF EARTHQUAKE PRECURSORS ON THE BASIS OF
HELIO-GEOPHYSICAL DATA OF REMOTE SENSING**

А.А. Романов, А.А. Романов, С.В. Трусков

*ФГУП Российский научно-исследовательский институт космического
приборостроения*

In the frameworks of the research the main principle of the earthquake precursors complex diagnose and its revealing in the “atmosphere-lithosphere” system by means of the remote sensing data is given. The cross correlations and dependencies of the major geophysical media parameters are studied and the items of the precursor phenomenon diagnose are illustrated.

Введение

В последние десятилетия с развитием методов дистанционного зондирования Земли был зарегистрирован ряд физических явлений, преимущественно изменения характеристик электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве, приуроченные по времени и месту проявления к крупным землетрясениям, что дает основание предполагать наличие связи между этими явлениями. Среди подобных явлений можно выделить ионосферные эффекты в слоях E и F₂, излучение низких частот, потоки заряженных частиц.

В соответствии с [6, 1] в ионосфере можно зарегистрировать акустико-гравитационные волны (АГВ), источником которых являются солнечная активность, мощные циклоны, грозовые разряды и некоторые другие явления в нижней и средней атмосфере. К тому же, существует мнение, что АГВ могут генерироваться даже перед серьезными землетрясениями, как предвестник данной катастрофы [2].

Поскольку в атмосфере плотность экспоненциально уменьшается с высотой, амплитуда АГВ может серьезно возрасти к верхним слоям атмосферы и вызвать существенные аномалии в распределении нейтральных и заряженных частиц в ионосфере. Аналогичные возмущения могут также возникнуть в вертикальном распределении температуры над поверхностным источником возмущения [3].

Анализ результатов исследований полного электронного содержания ионосферы в сейсмоопасных регионах, проведенных российскими [7] и зарубежными учеными [8, 9], показывает уменьшение максимального значения полного электронного содержания за 2-4 суток до предполагаемого землетрясения.

При взаимодействии с сейсмогенным излучением на частотах 0.1-10 Гц из радиационного пояса Земли происходит выброс заряженных частиц [4]. Регистрируя выбросы частиц в магнитосфере, а также анализируя энергетическое и временное распределение частиц в зарегистрированных всплесках можно оценить параметры грядущего сейсмологического события [4].

Существуют исследования на основе данных, полученных с метеорологических спутников Земли, показывающие наличие аномальных облачных структур, а также геотермальных аномалий (2°-5°) на поверхности Земли [10, 11, 5, 12] предшествующих сильным и разрушительным землетрясениям.

Выделение аномальных характеристик среды не решает проблему поиска предвестниковых явлений. До настоящего времени для сейсмоопасных регионов России и в частности для региона Дальнего Востока не проводилось специализированных исследований, целью которых было бы создание методик или настройка алгоритмов диагностирования предвестников землетрясений в разных средах и их комплексного анализа. Для диагностирования предвестниковых явлений в ионосфере необходимо

провести сбор дополнительных гелиогеофизических параметров (индекс солнечной активности – индекс 10.7, корональная активность солнца, индексы магнитной активности D_{st} и K_p), анализ которых позволит уменьшить вероятность осуществления ошибочного диагноза.

В качестве дополнительного источника информации, а также в целях проведения ретроспективных исследований корреляционных связей между предвестниковыми явлениями различной природы будет осуществляться сбор сейсмометрической информации о произошедших землетрясениях.

Таким образом, необходимо провести эксперимент, основной целью которого станет экспериментальное подтверждение принципов комплексного автоматизированного диагностирования предвестников землетрясений с использованием образцов аппаратуры, работающей по данным отечественных и зарубежных космических навигационных систем. В рамках эксперимента, в дополнение к ионосферным проявлениям геотектонической активности, необходимо рассмотреть аномальные изменения фоновых характеристик нижней атмосферы, геофизических характеристик литосферы, а также аномалий некоторых параметров солнечной активности. Выявление корреляционных связей между зарегистрированными аномалиями (предвестниками землетрясений) и реальными сейсмическими событиями в регионе, а также их классификация, позволит сформировать базу данных признаков предвестников землетрясений, создав впоследствии комплексную модель предвестника землетрясения для региона исследования.

В качестве места проведения эксперимента следует выбрать дальневосточный регион РФ, поскольку это один из самых сейсмоактивных регионов России. По данным каталога землетрясений Центральной Опытно-Методической Экспедиции ГС РАН за последние 12 лет в районе Сахалина произошло более 110 землетрясений, гипоцентр которых находился на глубине менее 40 км и интенсивность превышала 3 балла. Из них 40 имели интенсивность 5 баллов и более (рис.1).

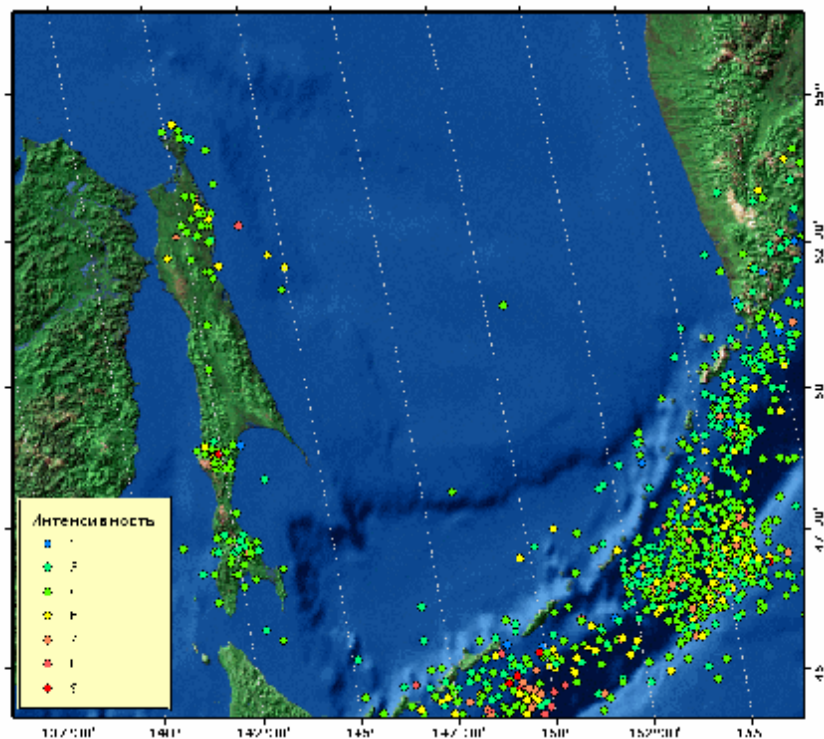


Рис. 1. Распределение землетрясений в Сахалинской области в период 1994-2006 г.г.

Цели и задачи эксперимента

В целом эксперимент направлен на создание и адаптацию методик и алгоритмов автоматизированного диагностирования предвестников землетрясений посредством аппаратуры, работающей по данным российских и зарубежных навигационных систем, а также специализированных искусственных спутников Земли.

Основными целями эксперимента являются:

- экспериментальное подтверждение в сейсмоактивном регионе (о. Сахалин и прилегающие зоны) научных принципов комплексного диагноза предвестников землетрясений, методик и алгоритмов сбора, обработки и распространения мониторинговой информации, основанной на данных существующих российских и зарубежных ИСЗ навигационного, метеорологического и природноресурсного назначения, а также гелиогеофизических данных;
- создание регионального прототипа автоматизированной системы наблюдения ионосферных предвестников землетрясений по данным спутниковых навигационных систем в комплексе с данными деформометрических, сейсмологических и гелиогеофизических измерений.

Для достижения поставленных целей в ходе эксперимента должны быть решены следующие задачи:

- развертывание в сейсмоактивном регионе (о. Сахалин и прилегающие зоны) специализированного оборудования (универсальная томографическая установка в г. Южно-Сахалинск и приемник ГЛОНАСС/GPS в г. Южно-Сахалинск и г. Невельск) и поддержка функционирования уже развернутой томографической цепочки (Ноглики – Поронайск – Южно-Сахалинск);
- сбор комплексных гелиогеофизических характеристик системы «гелиосфера – атмосфера – литосфера» для осуществления диагностирования предвестников землетрясений на территории Сахалинской области Дальневосточного региона России в соответствии с программой исследований;
- осуществление комплексного исследования полученных экспериментальных характеристик системы «гелиосфера-атмосфера-литосфера» и выделение аномалий, соответствующих сейсмической активности;
- адаптация существующих и разработка специализированных методик и алгоритмов обработки данных о состоянии среды;
- проведение анализа, систематизации и классификации полученных результатов;
- создание методики диагностирования предвестников землетрясений на основе комплексного анализа и совместной обработки атмосферно-ионосферно-магнитосферных данных с сейсмометрической информацией, а также базы алгоритмов предвестниковых явлений;
- оценка информативности существующих измерительных средств космического и наземного базирования, формирование требований к перспективным техническим средствам, а также разработка предложений по созданию региональной системы комплексного мониторинга предвестников землетрясений.

Схема комплексного эксперимента

В рамках данного эксперимента предполагается использование исключительно методов и средств дистанционного зондирования среды, основанных, в том числе, на эксплуатации образцов аппаратуры, работающей по данным отечественных и зарубежных космических навигационных систем, специализированных спутников исследования ионосферы, а также с использованием существующих ресурсных и метеорологических космических аппаратов.

Для наблюдения за сейсмо-ионосферными предвестниками землетрясений, в рамках эксперимента будет осуществляться непрерывный томографический мониторинг состояния ионосферы.

Для регистрации динамики изменения параметров ионосферы необходимо обеспечить максимально возможную частоту фиксаций ее состояния. Необходимо иметь уверенность в том, что никакие предвестниковые вариации состояния ионосферы не остались незарегистрированными. Еще одним требованием для обеспечения качественной фиксации состояния ионосферы является время зондирования. Поскольку ионосфера – динамично изменяющаяся среда, то к ней применимы принципы фотографирования динамичных объектов. То есть, чем короче экспозиция, тем выше качество и достовернее отображение. Выполнению этого требования при радиотомографии также способствует использование сигналов со спутников навигационных низкоорбитальных систем, которые имеют достаточно большие угловые скорости $4^\circ/\text{мин}$. Этим условиям наиболее отвечают низкоорбитальные навигационные спутники систем «Цикада/Парус» и «Транзит» которые движутся по орбите высотой около 1000 км, период обращения составляет 104 мин.

Места расположения станций приема системы мониторинга на территории сейсмически активного региона должны быть выбраны с учетом преимущественных направлений пролетов спутников. Наклонения орбит спутников систем «Цикада/Парус» составляют 83° по отношению к экватору, для спутников системы «Транзит» эта величина соответствует 90° .

Поскольку источником акусто-гравитационных волн в ионосфере Земли могут быть не только потенциальные землетрясения, но и другие возмущения (солнечная активность, сильные циклоны и грозы в нижней атмосфере и пр.) необходимо осуществлять сбор дополнительной информации о предвестниках землетрясений. Для учета влияния солнечной активности и выделения сигнатур ее проявления необходимо преимущественно использовать только ночные измерения состояния ионосферы. С другой стороны, данные об индексе солнечной активности и геомагнитном состоянии Земли позволят минимизировать вероятность определения ложной сигнатуры предвестника землетрясения в ионосфере.

Дополнительным источником информации об ионосферных предвестниках землетрясений, в совокупности с данными геофизических наблюдений, может являться информация о полном электронном содержании.

Аномальные облачные структуры, появляющиеся над регионом, в котором происходит подготовка землетрясения, являются актуальной разновидностью предвестниковых явлений в силу природных и климатических особенностей региона Дальнего Востока России.

Повышенная геодинамическая активность, выраженная в интенсификации относительного перемещения и деформации блоков земной коры, также является косвенным признаком подготовки потенциального землетрясения, которую можно регистрировать посредством приемной аппаратуры глобальных навигационных спутниковых систем. Схема проведения экспериментальных работ представлена на рис. 2.

Для осуществления исследований в рамках комплексного эксперимента планируется участие специалистов широкого спектра организаций различных министерств и ведомств: ФГУП «РНИИ КП», ИЗМИРАН, МИФИ, ФГУП «НПО ПМ», ВНИИ ГО ЧС, ИФЗ РАН и др.

Ожидаемые результаты эксперимента

В результате проведения экспериментальных работ ожидается получение следующих основных результатов:

- база данных предвестниковых явлений в регионе исследования по данным комплексного эксперимента;

- методика диагностирования предвестников землетрясений на основе комплексной обработки собираемых данных и базы данных аномальных явлений;
- исходные данные на разработку перспективных бортовых средств измерения характеристик предвестников землетрясений на существующих и перспективных космических аппаратах, в первую очередь на спутниках системы ГЛОНАСС, а также наземных комплексов сбора, обработки и распространения полученных данных;
- продемонстрирована точность определения взаимного расположения точек геодинимического полигона с длинами баз до нескольких десятков километров на уровне 1 мм.

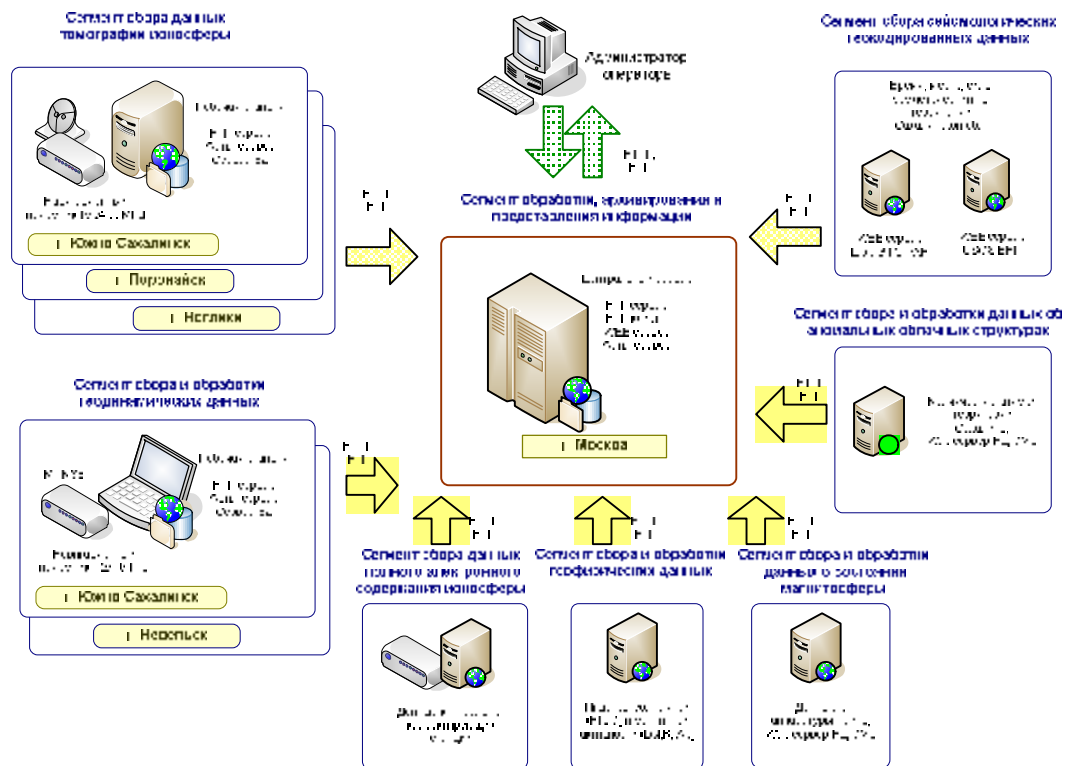


Рис.2 Функциональная схема экспериментальных работ.

Основываясь на комплексном анализе полученных экспериментальных данных, будут разработаны предложения по созданию и развитию системы комплексных наблюдений предвестников землетрясений с использованием космических средств, как составной части системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений Российской Федерации.

Список литературы

1. Андреева Е.С., Гохберг М.Б., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Худукон Б.З., Шалимов С.Л. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов // Космич. исслед. 2001. Т. 39. № 1. С. 13 - 17.
2. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэронавигация. 1996. N36. С. 111 - 118.
3. Ахметов Р.Р., Куницын В.Е. Численный метод решения задачи распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере до ионосферных высот // Вестник Московского Университета. Серия 3, 2003. №3. С.38-42
4. Гальпер А.М. Радиационный пояс Земли // 1999, Соросовский Образовательный Журнал, № 6. серия Физика. С.75-81.
5. Тронин А.А. Возможность применения комической тепловой съемки для исследования землетрясений // Исследование Земли из космоса. 2005. № 4. С.86-96.
6. Kunitsyn V., Tereshchenko E. Ionospheric Tomography. Springer-Verlag. 2003. 272p.

7. Plotkin V.V. GPS detection of ionospheric perturbation before the 13 February 2001, El Salvador earthquake // Nat. Hazards and Earth Syst. Sci.. 2003. V.3, P. 249-253.
8. Liu J.Y., Chuo1 Y.J., Pulinets S.A., Tsai H.F. A study on the TEC perturbations prior to the Rei-Li, Chi-Chi and Chia-Yi earthquakes // in book Seismo Electromagnetics: Litosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling, 2002 Tokyo:TerraPub, P. 297-301.
9. Liu J.Y., Chen Y.I., Jhuang H.K., Lin Y.H. Ionospheric foF2and TEC anomalous days associated with M>5.0 earthquakes in Taiwan during 1997-1999 // Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences. V.15, № 3. P. 371-383.
10. Saraf A. K. Choudhury S. NOAA-AVHRR detects thermal anomaly associated with 26 January, 2001 Bhuj Earthquake, Gujarat, India // International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26, No. 6. P. 1065-1073.
11. Yurur M. T. The positive temperature anomaly as detected by Landsat TM data in the eastern Marmara Sea (Turkey): possible link with the 1999 Izmit earthquake // International Journal of Remote Sensing. 2006. V. 27, № 6. P. 1205-1218.
12. Pulinets S.A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K.A., Pokhmelnikh L.A. The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V.31. P.143-153.

ХАРАКТЕРИСТИКИ F-РАССЕЯНИЯ НА ИОНОГРАММАХ ВНЕШНЕГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИСЗ ИНТЕРКОСМОС-19

CHSRACTERISTICS OF F-SPREAD ON THE TOPSIDE IONOGRAMM OF INTERKOSMOS-19 SATELLITE

В.А. Телегин, А.Т. Карпачев

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

The F-spread phenomenon observing on the topside ionograms of Interkosmos-19 satellite has been investigated. The different types of F-spread associated with the irregularities located at different altitudes of the topside ionosphere are classified. The 3 main types and some additional types associated with the large-scale irregularities of negative and positive sign were detected. Global distribution of occurrence probability (P) of the F-spread in the both hemispheres, for all local times, summer and winter solstices, for the high solar activity in 1979-1981 was built. The longitudinal, latitudinal, diurnal and seasonal variations in the F-spread occurrence probability were investigated. Our analysis shows that the longitudinal variations in P in the first approximation anticorrelate with the NmF2 variations, both in winter and in summer conditions. The latitudinal variations in P have more difference in the 60-90°E and 270-300°E longitudinal sectors. In diurnal variations of the F-spread occurrence probability the daytime, evening and nighttime peaks were revealed. The comparison between topside sounding data and ground based sounding data has been carried out. It is shown that at all the latitudes P in the topside ionosphere is greater than that in the bottom side. The reasons of the revealed F-spread occurrence probability variations are discussed.

Введение

Явление F-рассеяния на ионограммах наземного зондирования изучалось неоднократно, как экспериментальными средствами, так и теоретически (см., например, обзор [2] и ссылки в нем). На ионограммах внешнего зондирования F-рассеяние наблюдается еще чаще, чем на наземных, что, учитывая специфику спутниковых наблюдений, сильно затрудняет их обработку. Поэтому исследование этого явления во внешней ионосфере представляется важным, как с физической, так и с методической точки зрения. Проявления F-рассеяния во внешней ионосфере исследованы слабо, существует всего несколько работ по данным спутников Alouette (см., например, [4]) и Интеркосмос-19 [3], и только, по-видимому, одно исследование по данным ISS-b [5].

Огромный массив данных спутника Интеркосмос-19 (ИК-19) позволяет провести полномасштабное исследование F-рассеяния во внешней ионосфере.

1. Экспериментальные данные

Спутник ИК-19 работал в активном режиме с марта 1979 г. по февраль 1981 г. Иonoграммы внешнего зондирования фиксировались как в аналоговом, так и в цифровом виде. Аналоговые иonoграммы содержат полную информацию о внешней ионосфере, но они принимались в реальном времени только на наземных пунктах в Москве, Апатитах, Норильске и на Кубе. На рис.1 приведен пример аналоговой иonoграммы хорошего качества, полученной при зондировании над Москвой 25 марта 1980 г. По оси абсцисс приведена частота зондирования в МГц, по оси ординат эффективное расстояние от спутника в сотнях километров (максимальное расстояние равнялось 2000 км). На рис.1 отмечены основные характеристики иonoграммы внешнего зондирования: след обыкновенной (O-trace) и необыкновенной (X-trace) волны, критические частоты F2 слоя (f_oF2 и f_xF2), отражения от Земли, резонансы гирочастоты (F_H), и частоты отсечки Z, O и X мод (f_z , f_n и f_x соответственно). Оба следа четко выделяются, критические частоты определяются совершенно точно, помехи и F-рассеяние полностью отсутствуют.

Иonoграммы хорошего качества регистрировались примерно в 40% случаев, на остальных иonoграммах следы были размытыми, диффузными, иногда до такой степени, что становились не обрабатываемыми. На рис.2 приведены примеры иonoграмм, полученных в области главного ионосферного провала. Верхняя иonoграмма получена на

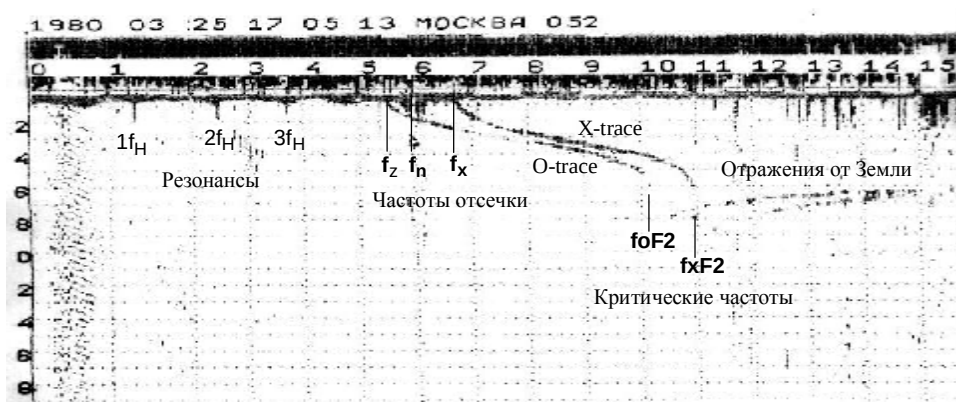


Рис.1. Аналоговая иonoграмма ИК-19, полученная 25.03.1980 г. над Москвой.

экваториальной стенке ГИП. На ней фиксируются дополнительные следы на большей дальности, чем основные, что свидетельствует о наличии крупномасштабной неоднородности слоя F2. Появление дополнительных отражений, как правило, предшествует появлению F-рассеяния. Действительно, при приближении к минимуму ГИП, следы отражений становятся широкими и размытыми вследствие сильного F-рассеяния. Нижняя иonoграмма, полученная в минимуме провала уже полностью диффузная, следы не разделяются, хотя критические частоты слоя F2 еще можно определить.

Цифровые иonoграммы могли фиксироваться вдоль всей орбиты спутника, но, к сожалению, из-за малого объема бортовой памяти они сильно теряли в информативности. Однако основной массив данных ИК-19 составляют цифровые иonoграммы, поэтому характеристики F-рассеяния исследовались, в основном, на основе анализа этих иonoграмм.

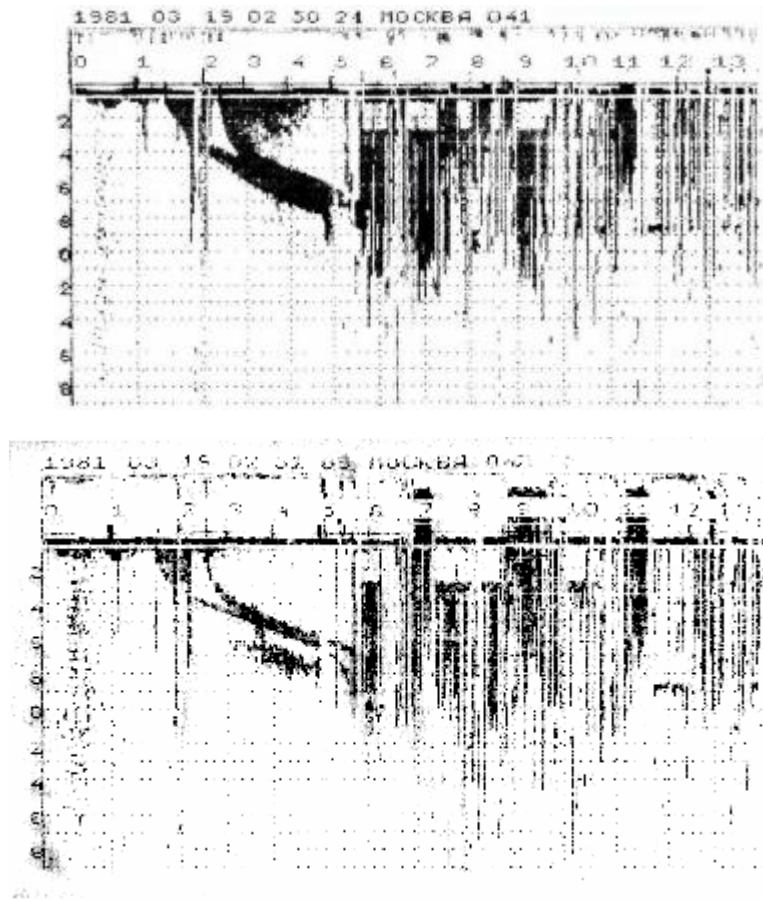


Рис.2. Ионogramмы ИК-19, зарегистрированные в области провала.

2. Классификация типов F-рассеяния

Рассеяние в области главного ионосферного провала связано со сложной структурой субавроральной ионосферы. На рис.3 слева приведен разрез ионосферы в области провала и обозначены возможные пути распространения радиоволны [1]. Следы 3 и 5 формируют «нормальную» ионограмму. Следы 1 и 2 образуют дополнительный, более удаленный след ниже критической частоты, а след 4 выше критической слоя F2. На высоких широтах спутник быстро пересекает силовые трубки с пониженной или повышенной концентрацией плазмы, поэтому весьма вероятен захват и распространение волны в волноводе [4] – рис.4. Сигналы 1 и 2, задержанные в волноводах, будут формировать рассеянный дополнительный след, задержанный относительно основного, что и наблюдается на рис.3. В итоге, ионограмма, полученная в ионосферном провале, может иметь очень сложный, диффузный вид, как на рис.2.

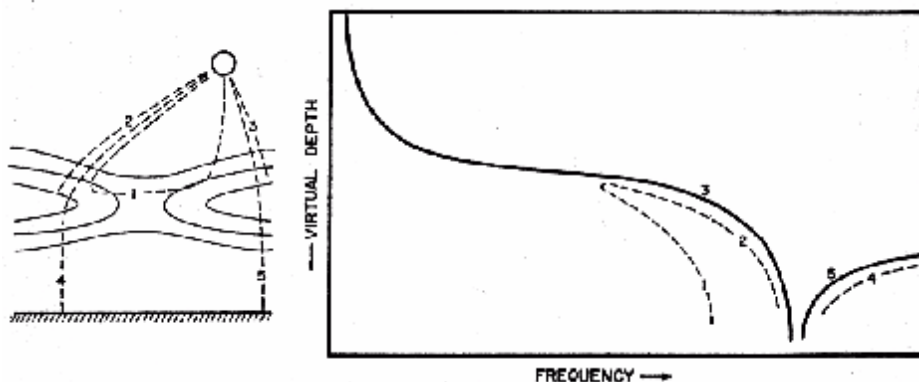


Рис.3. Схема образования F-рассеяния в области провала.

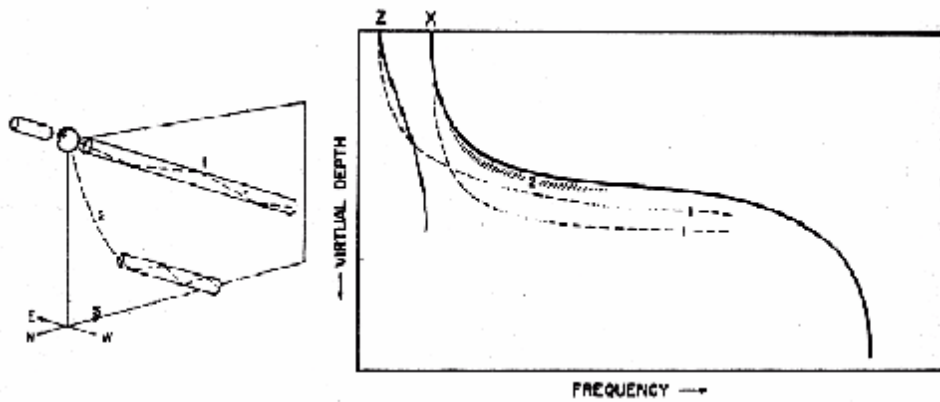
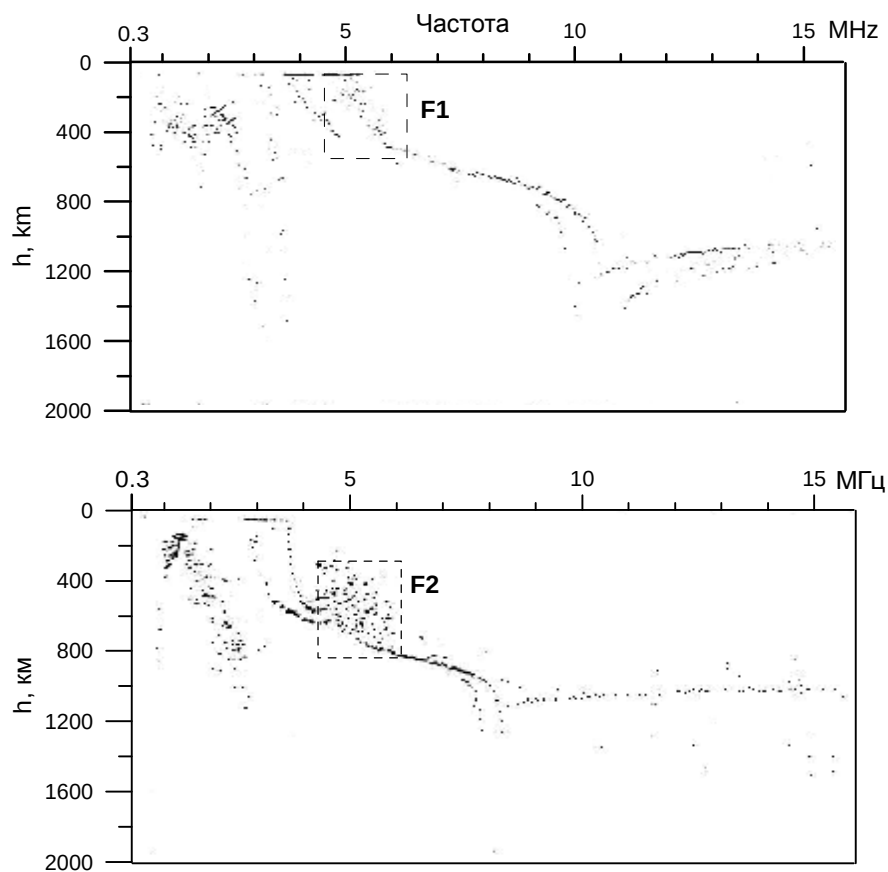


Рис.4. Схема образования F-рассеяния на высоких широтах.

На рис.5 вверху показан тип рассеяния F1, при котором имеет место значительное F-рассеяние на участке следа вблизи высоты спутника. Этот тип рассеяния наблюдается на высоких широтах. В середине рис.5 показан F2 тип рассеяния, когда рассеянное облако точек наблюдается на среднем участке следа. Наиболее часто этот тип проявляется на умеренно средних широтах. Сначала формируется слабое рассеянное облако точек ниже основного следа, а затем интенсивное облако выше основного следа, которое экранирует все, что ниже, поскольку на каждой частоте фиксировалось всего 3 отражения. Этот тип рассеяния также, по-видимому, связан с волноводным распространением [4]. Спутник при этом находится внутри волновода, который расположен по обе стороны от экватора.



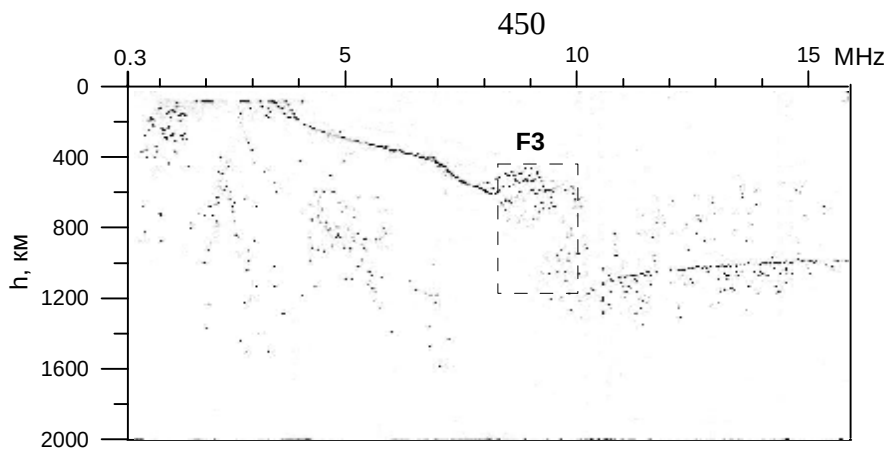


Рис.5. Типы рассеяния: F1 (вверху), F2 (в середине) и F3 (внизу).

Наконец, самый распространенный тип рассеяния F3 представлен на рис.5 внизу. Он характеризуется наличием сильного рассеяния вблизи критической частоты слоя F2. Этот тип встречается на всех широтах, он соответствует частотному рассеянию, которое часто наблюдается на наземных ионограммах. Этот тип рассеяния является основным и на ионограммах внешнего зондирования, поэтому именно он является главной целью статистического исследования, проведенного ниже.

3. Статистический анализ характеристик F-рассеяния

Глобальное распределение вероятности P появления F-рассеяния было построено на основе анализа 30.000 цифровых ионограмм для зимнего солнцестояния. Все данные

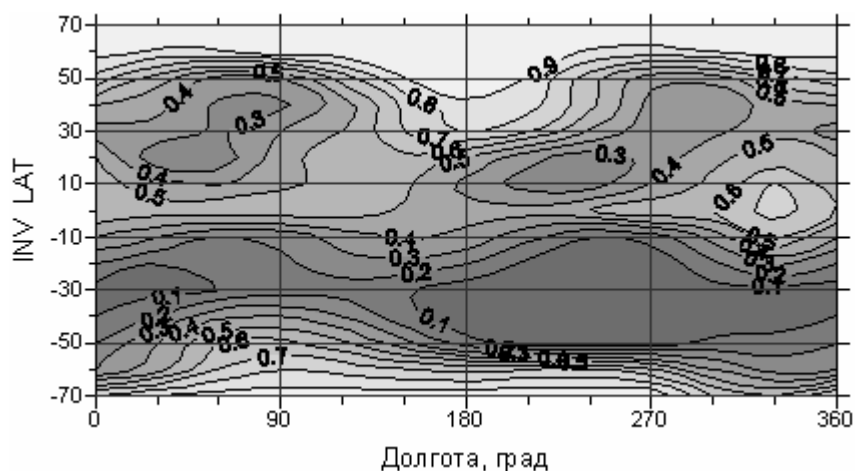


Рис.6. Глобальное распределение F3 типа рассеяния для дополуночных часов местного времени в условиях декабрьского солнцестояния.

относятся к условиям высокой солнечной активности ($F10.7 \sim 200$), зимнему солнцестоянию (1.5 месяца до и после 22 декабря 1979 г. и 1980 г.), спокойным условиям ($K_p \leq 3$). Данные ИК-19 равномерно охватывают все долготы и широты обоих полушарий, что позволяет построить глобальное распределение P для всех часов местного времени.

На рис.6 для примера приведено распределение P для дополуночных условий (21-24 LT). F-рассеяние гораздо сильнее в зимнем полушарии, где электронная концентрация ниже. На карте можно выделить два наиболее характерных долготных сектора: $180-210^\circ\text{E}$ и $270-330^\circ\text{E}$, где электронная концентрация почти на всех широтах обоих полушарий соответственно понижена и повышена, а величина P , наоборот, увеличена и уменьшена. Обычно считается, что даже ночью на средних широтах F-рассеяние слабое, поэтому широтные кривые P , построенные по наземным данным, на этих широтах идут вблизи нуля (см., например, [6]). По данным Интеркосмос-19 величина P на широте 40° составляет около 0.3 даже в долготном секторе $60-90^\circ$ и достигает ~ 0.85 на долготе $\sim 180^\circ$.

4. Суточные и долготные вариации вероятности F-рассеяния

На рис.7 приведены суточные вариации $foF2$ и вероятности появления F-рассеяния для фиксированной инвариантной широты 50° ILAT северного полушария. Штриховой кривой на рис.7 внизу для сравнения приведены вариации величины P , выделенные для того же самого периода 1979-1980 г. по данным наземного зондирования для станции Москва (51° ILAT). Видно, что суточные вариации величины P в нижней и верхней ионосфере имеют подобный характер, но вероятность появления F-рассеяния на высотах выше максимума слоя F2 гораздо выше. Следовательно, неоднородность верхней ионосферы гораздо сильнее, чем нижней ионосферы. Из рис.7 видно также, что суточные вариации $foF2$ и P в первом приближении антикоррелируют, т.е., чем меньше $foF2$, тем сильнее F-рассеянии, и наоборот.

На рис.8 для примера приведены долготные вариации $foF2$ и P для околополуденных часов, выделенные в полосе средних широт ($40-50^\circ$) северного и южного полушарий. Электронная концентрация испытывает сильные вариации с долготой, характер которых зависит как от полушария, так и от сезона (см., например, [7]). Видно, что долготные вариации P и $foF2$, так же как и суточные вариации, в первом приближении антикоррелируют.

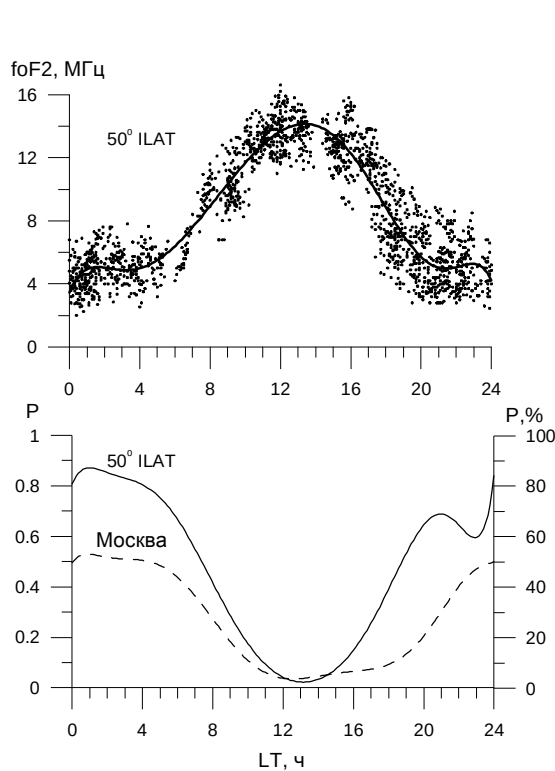


Рис.7. Суточные вариации $foF2$ и P для 50° ILAT северного полушария в сравнении с данными ст. Москва (51° ILAT).

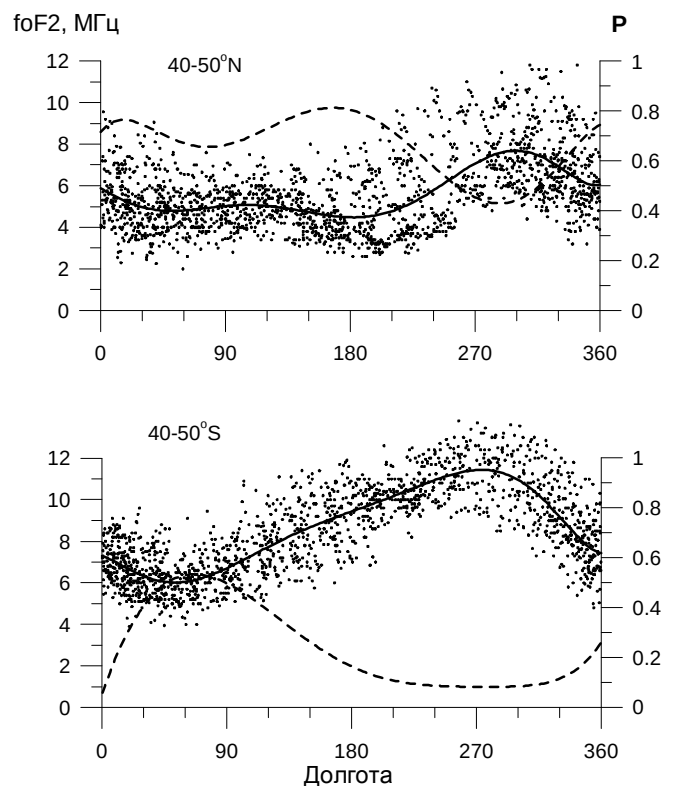


Рис.8. Долготные вариации $foF2$ (точки и аппроксимация) и P (штриховые кривые) для $40-50^\circ$ N и $40-50^\circ$ S в ночных условиях.

Заключение

Результаты анализа большого массива данных спутника Интеркосмос-19 показывают, что эти данные позволяют проводить всестороннее исследование явления F-рассеяния для условий высокой солнечной активности. Основным преимуществом спутника Интеркосмос-19 перед всеми другими аналогичными спутниками является глобальность полученной с его помощью информации. Это дает возможность детально

изучить особенности характеристик этого явления на всех долготах и широтах, т.е. в разных областях ионосферы.

Список литературы

1. Бенькова Н.П., Козлов Е.Ф., Коченова Н.А., Саморокин Н.И., Флигель М.Д. Структура и динамика субавроральной ионосферы. – М.: Наука, 1993. –144 с.
2. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. – М.: Наука. 1984. –142 с.
3. Депуева А.Х. Явление F-рассеяния в низкоширотной ионосфере // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1982. Т.59. С.28-31.
4. Calvert W. and Schmid C. Spread-F observations by the Alouette topside sounder satellite // J. Geophys. Res. 1964. V.69. № 9. P.1839-1852.
5. Maruyama T. and Matuura N. Occurrence probability of topside spread echoes // Solar Terrestrial Enviromental Research in Japan. 1981. V.5. P.38-40.
6. Singleton D.G. The morphology of spread-F occurrence over half a sunspot cycle // J. Geophys. Res. 1969. V.73. № 1. P.295-308.
7. Карпачев А.Т. Глобальный долготный эффект в ночной внешней ионосфере по данным ИСЗ Интеркосмос-19. Препринт № 45(734). 1987. –28 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВАРИАЦИЯМИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ

OBSERVATION RESULTS OF THE EARTH NATURAL ELECTROMAGNETIC FIELD VARIATIONS IN SOUTH YAKUTIA

С.В. Трофименко¹, Н.Н. Гриб¹, В.М. Никитин¹, В.А. Муллаяров²

¹Технический институт (филиал) Якутского государственного университета,

²Институт космофизических исследований и аэронауки СО РАН

We present the basic results of 20 years observations of the natural electromagnetic field of the Earth (EME-NEFE). The variations have been analyzed in connection with the seismicity of South Yakutia.

Место наблюдения. Район исследований охватывает западную часть южной окраины Алданского щита Сибирской платформы и сопряженную с ним северную окраину позднеархейско-раннепротерозойской Становой складчатой системы, разделенных Становым (или Южно-Алданским) швом (разломом) (рисунок 1).

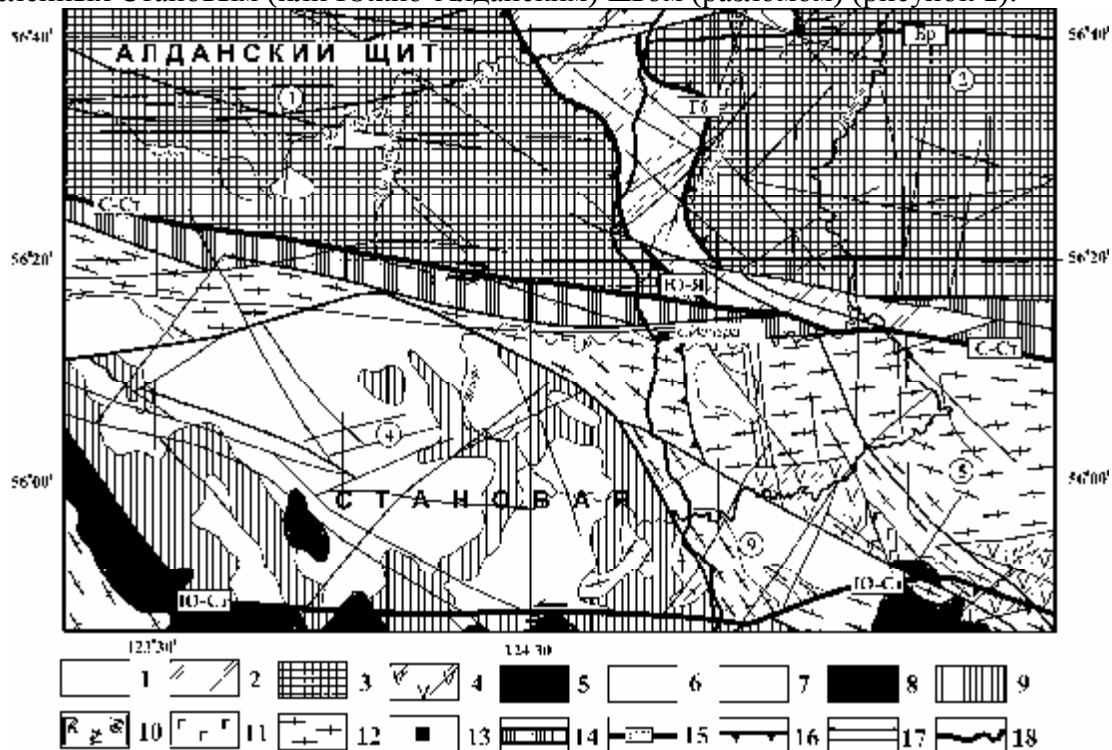


Рис.1. Структурно - тектоническая карта территории Южной Якутии

1–кайнозойские впадины; 2-3 – **Сибирская платформа**: 2-Чульманский предгорный прогиб, 3-кристаллические комплексы Алданского щита. Блоки (цифры в кружках): 1-Зверевский, 2-Сутамский; 4-12 – **Становая складчатая система**: 4-мезозойские терригенно-вулканогенные впадины; 5-мезозойские граниты; 6-9 – Раннепротерозойские образования – 6-гранитоиды, 7-диориты и тоналиты, 8-габброиды, 9-Тукурингский метаморфический комплекс; 10-12 – Позднеархейские образования: 10-расслоенные габброиды и анортозиты, 11-однородные габброиды, 12-Становой метаморфический комплекс. Блоки (цифры в кружках): 3-Нижне-Ларбинский, 4-Верхне-Гилуйский; 5-Верхне-Тимптонский, 13 – Станции наблюдения ЭМИ; 14-краевой шов Сибирской платформы; 15-системы главных разрывных нарушений (буквы в квадратах, черными стрелками показаны направления смещения по плоскостям разломов): ЮЯ-Южно-Якутский, Гр-Горбыляхский, Бр-Беркакитский, С-Ст-Северо-Становой, Ю-Ст-Южно-Становой; 16-надвиги; 17-прочие разломы; 18-Амуро-Якутская автотрасса.

В пределах района широко распространены продукты мезозойской тектоно-магматической активизации, образующие несколько протяженных поясов, параллельных друг другу и Становому шву, которые накладываются на гетерогенный раннедокембрийский фундамент. Они представлены поясом гранодиоритовых батолитов Станового хребта, Южно-Алданской системой впадин, выполненными мощными (до 5 км)

угленосными толщами юры и неокома, субщелочными и щелочными вулканическими и интрузивными образованиями триасово-раннемелового возраста, широко распространенными на южной окраине Алданского щита. Эти зоны в совокупности соответствуют активной континентальной окраине мезозойского возраста [4].

Измерения, анализ. Первые инструментальные наблюдения вариаций электромагнитных эмиссий (ЭМИ) в Южной Якутии были проведены в 1987-1991 г.г. в связи с задачей изучения предвестников землетрясений и поиска наиболее информативных из них.

Произошедшее землетрясение 29.04.89г. с энергией $E=10^{16.5}$ Дж позволило установить взаимосвязь между аномальными суточными вариациями ЭМИ и землетрясениями [2,3] (Рис.2).

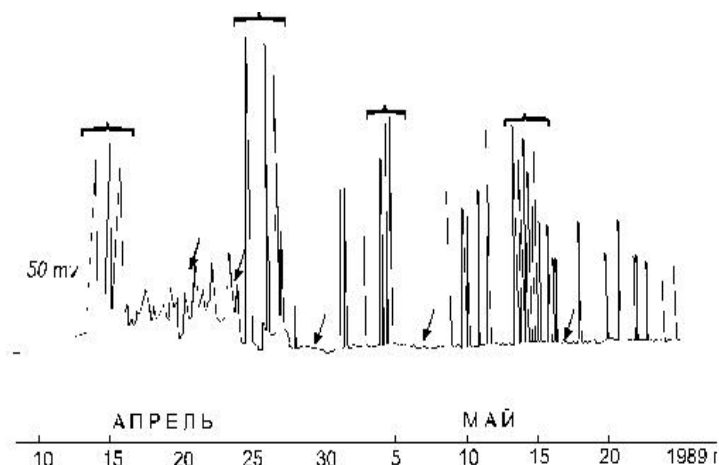


Рис.2. Изменение напряженности ЭМИ в период сильных землетрясений апреле – мае 1989 г. Стрелками отмечены моменты главного события 20 апреля 1989 г. и его сильных афтершоков 25 и 28 апреля, а также 7 и 17 мая. Фигурные скобки указывают на возмущения ЭМИ, зафиксированные перед этими событиями.

На основании данных измерений был сделан предварительный вывод о том, что увеличение амплитуды сигналов электромагнитной природы их группирование в течение нескольких суток выступает в роли краткосрочного предвестника времени землетрясения с погрешностью определения события ± 2 суток без указания на характер самого землетрясения: магнитуды, энергетического класса, интенсивности и места события [2].

Недостатком интерпретации материалов 1989 г. [2,3] было отсутствие детализации аномальных проявлений в суточных вариациях. При рассмотрении рисунка 2 видно, что первая серия аномалий произошла общей группой, затем основное событие. Первый афтершок (вторая стрелка на рис.2) не отмечен аномалиями ЭМИ. Третий афтершок сопровождается аномалиями (вторая серия), однако детальное рассмотрение показывает, что внутри серии имеется период затишья (нормальный фон). После афтершока выделенная третья серия не охватывает двухсуточные аномальные проявления (рис.2). Аналогичная картина проявляется и перед четвертым афтершоком: выделенная серия (четвёртая скобка рис.2) предваряется серией аномалий суточного хода без сейсмического события. Все эти рассуждения были оставлены за рамками интерпретационных схем [2,3], т.к. к основному положению возражений не было: аномалии ЭМИ для Южной Якутии, в условиях современной активной геолого-тектонической структуры, являются необходимым признаком возможного повышения сейсмической активности. Вероятность наступления события оценивалась $\frac{3}{4}$, или 75%.

Возобновление работ по регистрации ЭМИ в 2005 г. позволило подтвердить основные положения и рекомендации, полученные в 1989 г. За двухлетний период наблюдений аппаратурой МГР-1 [7] произошло 2 землетрясения 10.11.05 и 3-13.03.07 с энергией более 10^{15} Дж. В обоих случаях имели место аномальные суточные вариации ЭМИ (рис.3-6).

Иллюстрированные данные на графиках не нормированы и представляют собой первичные данные, сглаженные по пятичасовым интервалам 30-ти суточных серий наблюдений в г. Нерюнгри (рис.3-5) и усредненные с получасовым окном 7-ми дневные

серии (рис. 6). Влияние атмосфериков на уровень ЭМИ в данной работе не анализируется, хотя по графикам абсолютных интенсивностей (рис.3-5) прослеживается практически линейная зависимость их влияния (спад) на общий суточный ход ЭМИ (осень-зима).

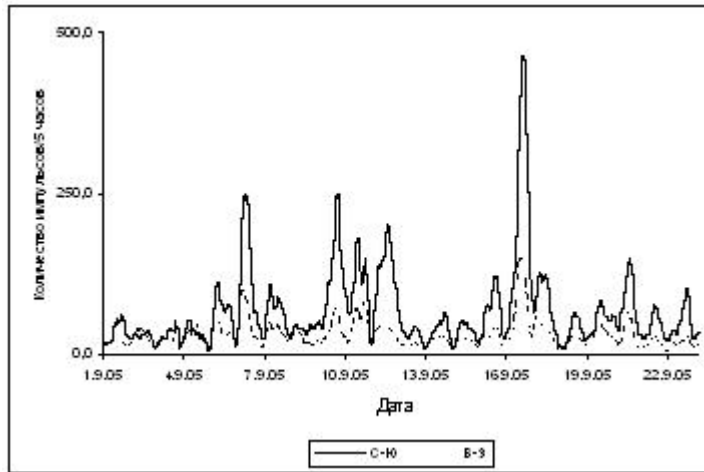


Рис.3. Временная и координатная развертки аномалий ЭМИ в сентябре 2005 г.

Геофизический пункт г. Нерюнгри.
Трехканальная аппаратура МГР-1[4].

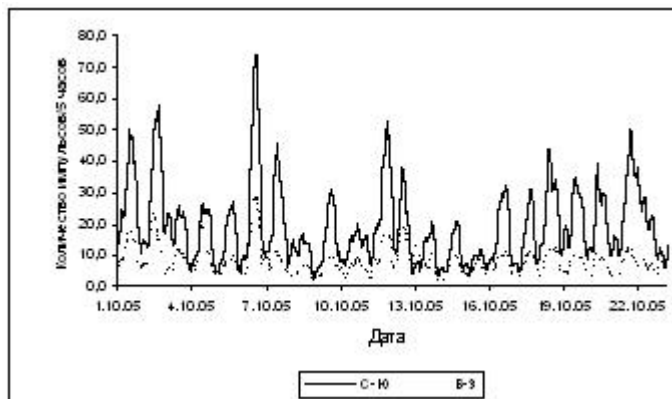


Рис.4. Временная и координатная развертки аномалий ЭМИ в октябре 2005 г.

Геофизический пункт г. Нерюнгри.
Трехканальная аппаратура МГР-1[4].

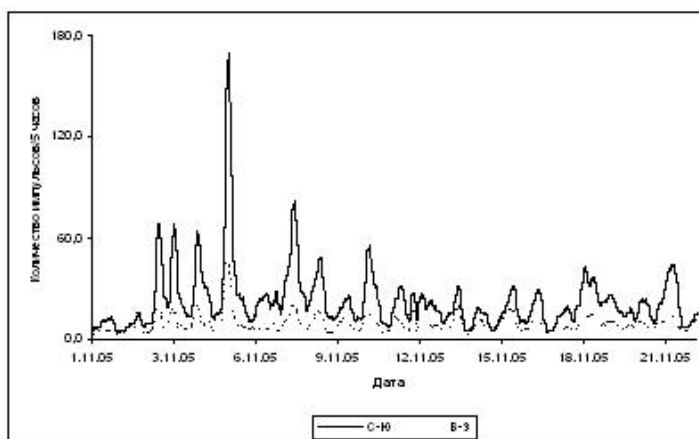


Рис.5. Временная и координатная развертки аномалий ЭМИ в ноябре 2005 г.

Геофизический пункт г. Нерюнгри.
Трехканальная аппаратура МГР-1[4].

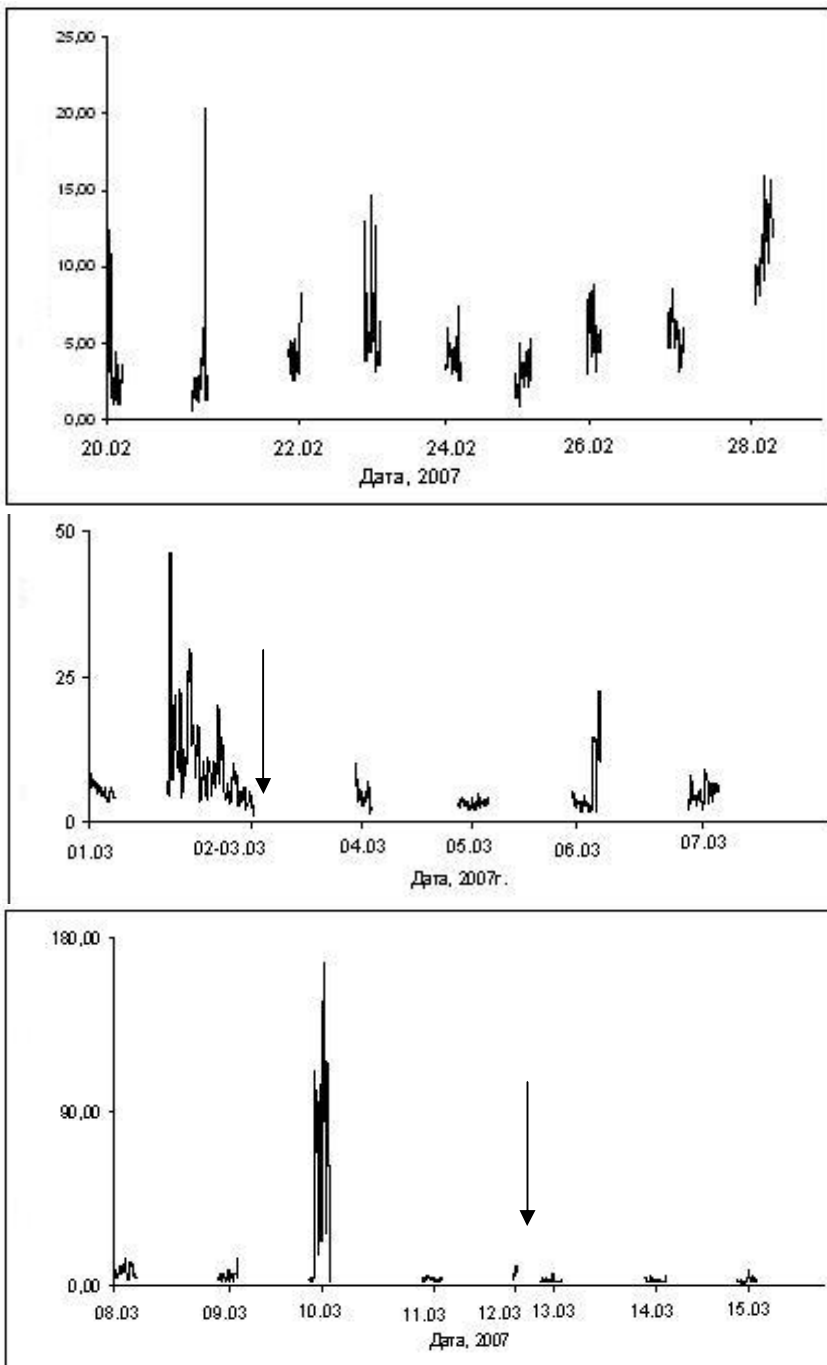


Рис.6. Вариации ЭМИ – ЕИЭПЗ в пункте наблюдений с. Иенгра (см. рис.1) с 20.02.2007 г. по 15.03.2007 г. в период землетрясения с энергией в очаге $E = 10^{14.6}$ Дж.

Представлены аномалии ЭМИ, осредненные по 30-ти минутным интервалам, с 0^h30^m по 06^h LT местного времени, за период минимального уровня промышленных помех.

Здесь и на рисунках 3-5 стрелками отмечены основные сейсмические события.

Вертикальный масштаб – количество импульсов за 30 минут.

Чувствительность каналов и порог срабатывания за время измерений не изменялись.

Правая часть рисунков 3-5 – сопоставление вариаций компонент магнитных составляющих ЭМИ СЮ и ВЗ ориентаций.

Что наблюдается?

- Трехкратное превышение амплитуды сигнала в течение 5-ти суток в сентябре 2007 г. относительно среднеарифметического уровня сигнала с отдельным всплеском 17.09 (рис.3). В заключительной стационарной фазе землетрясение отсутствует.

- Незначительные среднестатистические флуктуации амплитуд в октябре (рис. 4).

- Снижение (сезонное) нормального уровня ЭМИ до 15 импульсов в максимуме вариаций и от 5 до 10 кратного превышения уровня с 03.03 по 10.03. с последующим сейсмическим сопровождением с энергией $E = 10^{15}$ Дж на спаде интенсивности ЭМИ.

- На фоне квазиволнового процесса (рис.6) в феврале 2007 г. выделяются аномальные амплитуды с выходом в нормальное поле к 01.03. без сейсмического события.

- Резкое возрастание амплитуды и, практически, экспоненциальный спад с последующим землетрясением с энергией $E = 10^{15}$ Дж (рис. 6).

Возможная интерпретация. При различных методах физического эксперимента 1989 г. (аналоговая запись уровня напряженности ЭМИ на КСП-4 при помощи селективного вольтметра и круговой антенны) и 2005-2007 г.г. (цифровая регистрация количества импульсов ЭМИ-ЕИЭПЗ) выделяются общие закономерности:

- каждому значимому сейсмическому событию предшествует аномальное изменение суточных вариаций ЭМИ;
- присутствуют аномалии, не сопровождающиеся последующим землетрясением;
- перед землетрясением в течение 1-3-х суток выделяется период стационарного распределения амплитуд сигналов ЭМИ.

Фактически это означает, что групп аномальных сигналов ЭМИ больше, чем землетрясений, и, следовательно, при наличии явных предвестников землетрясений, невозможность детерминированного прогноза событий. Однако, если рассматривать сейсмический процесс в блоковой среде [5], то можно предположить, что аномалии ЭМИ должны проявляться дважды: в период консолидации блоков на начальной стадии формирования очага землетрясения и в период разрушения консолидационной зоны. Учитывая данные о наблюдениях наклонов в период Южно-Якутского землетрясения (рис.7), можно заключить, что процесс накопления энергии упругих деформаций и процесс разгрузки среды не симметричны относительно главного события. Следовательно, первые предвестники будут регистрироваться задолго до землетрясения (время предвестника пропорционально скорости накопления упругих деформаций), а повторные аномалии могут проявиться уже после события, т.к. измерения проводятся не в очаге, а на его периферии. Например, график аномальных наклонов (рис.7) показывает, что в момент Южно-Якутского землетрясения, деформационный процесс в пункте регистрации (около 70 км от очага) продолжался в виде накопления упругих деформаций (положительный наклон) и только после некоторого времени начался нестационарный процесс снятия напряжений.

Для Олекмо-Становой зоны получена оценка периода релаксационных процессов на основе анализа значимых сейсмических событий [6]. Аналитически зависимость может быть представлена в виде:

$T = 10^{\frac{K - K_0}{1.5}},$	(1)
---------------------------------	-----

где величина Т в сутках, $K_0 = 12.63$.

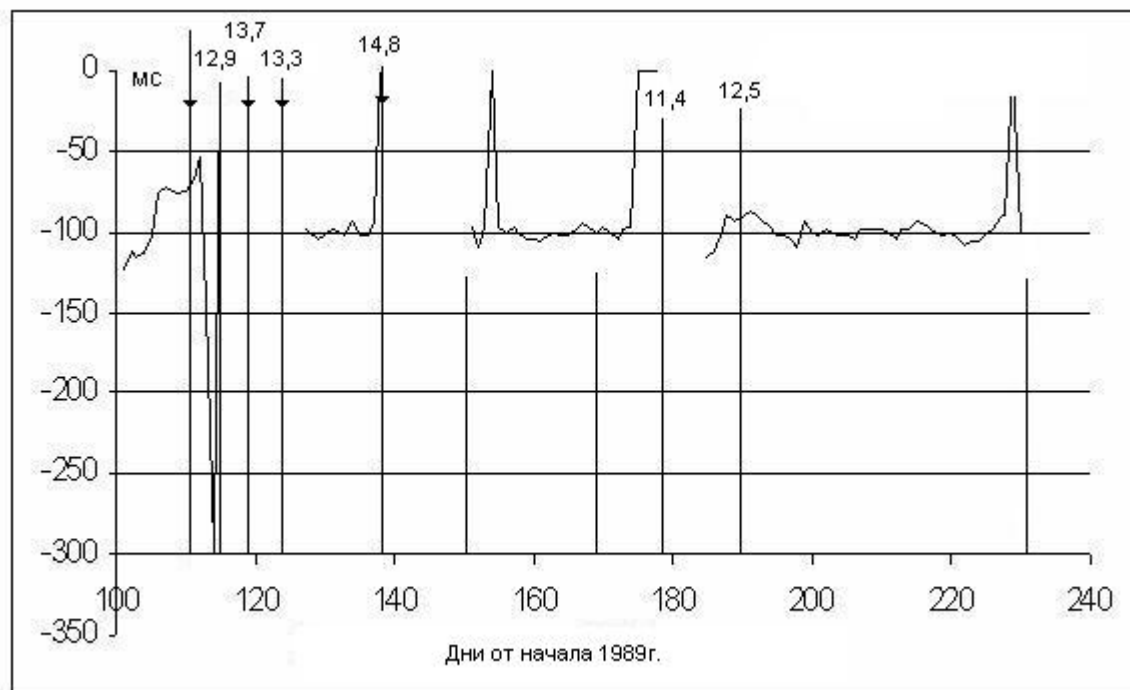
Для землетрясений с энергетическими классами $K=12.9, 13.3, 13.7$ и 14.8 периоды релаксационных процессов, рассчитанные по формуле (1), будут равны соответственно 1.5, 2.8, 5.2, 28 суток, что дает возможность оценить временной интервал (максимально возможный) проявления предвестников. Для землетрясения 10.11.2005 время действия предвестников 21 день.

В работе [1] показано, что даже при трансформации всей энергии землетрясения с $E=10^{24}$ эрг в электромагнитную энергию напряженность ЭМИ будет меньше фоновой составляющей. Следовательно, регистрируемые аномалии являются следствием приповерхностного взаимодействия блоков земной коры при их относительном перемещении вблизи пункта наблюдения и определяются физическими свойствами горных пород, вещественным составом, характером движения по разлому. Размер области, формирующей аномалии ЭМИ, дополнительно зависит от затухания электромагнитной волны, распространяющейся над проводящей средой (разломом).

Таким образом, аномалии ЭМИ, выделенные в 1989 г. (см. рис.2), могут быть разложены по составляющим: афтершоку 28 мая соответствует две группы аномалий с 27 апреля по 3 мая; афтершоку 7 мая – две группы аномалий с 4 по 11 мая; афтершоку 17 мая – с 12 по 25 мая. Последний цикл аномалий с 20 по 25 мая (рис.2) не выделен в отдельную группу, т.к. после этих аномалий не произошло землетрясения, а исторически в 1992-1993 г. г. график представлялся именно в данном виде [2, 3]. Характер изменения суточных аномалий ЭМИ в 2005 и 2007 годах аналогичен вариациям 1989 г. Однако здесь появилась

дополнительная информация: перед землетрясением (рис.5) соотношения фаз максимумов вариаций компонент ВЗ и СЮ направления становится более регулярными. В период, охватывающий релаксационные процессы, коэффициент корреляции возрос на 10% по отношению к предыдущему периоду. Если в сентябре (рис.4) наблюдалось запаздывание фаз максимумов одной компоненты относительно другой (петли на рис. 4), то в марте наблюдается линейная зависимость амплитуд двух компонент. Является ли это дополнительным свидетельством сейсмотектонического происхождения аномалий ЭМИ покажут последующие наблюдения.

Рис.7. Остаточные наклоны в период Южно-Якутского землетрясения в апреле 1989 г. и его



афтершоков

Стрелками отмечены афтершоки, перед которыми наблюдались аномалии ЭМИ. Цифры – энергетический класс землетрясений.

Список литературы

1. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1988. – 174с.
2. Козьмин Б.М., Голенецкий С.И., Трофименко С.В. Южно – Якутское землетрясение 20 апреля 1989 года. Южно – Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1992. – 43с.
3. Козьмин Б.М., Голенецкий С.И., Трофименко С. В. Афтершоки Южно – Якутского землетрясения 20 апреля 1989г.- Южно – Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1993. – 66с.
4. Парфенов Л.М., Натальин Б.А., Попеко Л.И. Тектоника восточной части Монголо-Охотской складчатой системы и природа сопряженных с ней зон мезозойской тектономагматической активизации Алдано-Становой области // Тихоокеанская геол. 1983. № 2. С. 26-33.
5. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. – М.: Наука, 1991. – 96с.
6. Трофименко С. В. Проявление землетрясений на фоне стационарного сейсмического процесса Олекмо-Становой зоны (ОСЗ)// Горный информационно-аналитический бюллетень.-М.: Изд-во МГГУ. Отдельный выпуск 3. Якутия. 2007. 1. С. 208-212.
7. Шталин С.Г., Малышков С.Ю., Малышков Ю.П., Гордеев В.Ф., Масальский О.К. Автоматизированная станция оперативного прогноза землетрясений (опыт четырехлетней эксплуатации в Прибайкалье) //Физические основы прогнозирования разрушения горных пород. С.324-330

ИОНОСФЕРНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФРОНТА АГВ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ

IONOSPHERIC MANIFESTATION OF THE AGW FRONT INFLUENCE FROM EARTHQUAKES IN THE EAST-SIBERIAN REGION

Л.Д. Филиппов, А.Е. Степанов, В.Ф. Смирнов

Институт космических исследований и астрономии СО РАН

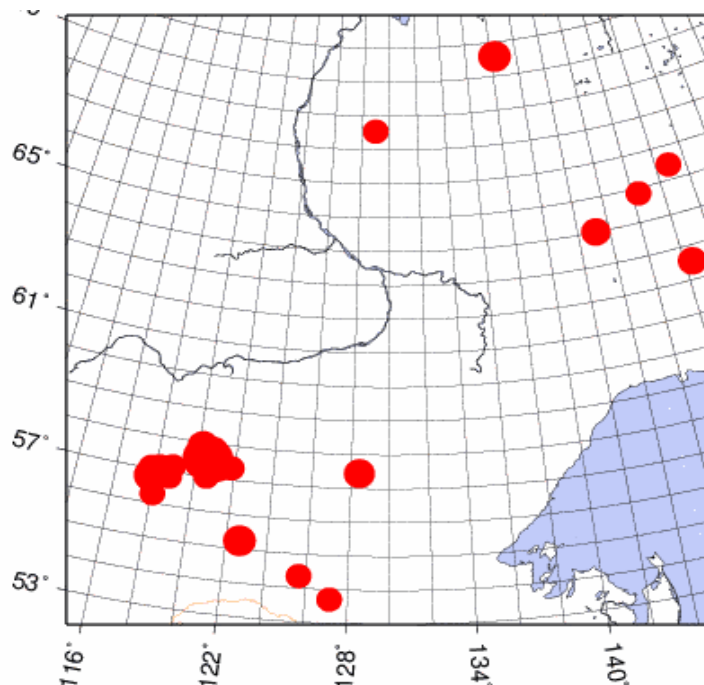
On the measurement data of foF2 by DPS-4 digital ionozond the comparison of beginning moments of earthquakes with the critical frequency time variation was carried out for Yakutsk and Zhigansk ionospheric stations for the years 2003-2005. Color division of vertical and oblique radioreflexion traces on DPS-4 ionograms considerably simplifies their interpretation and processing and makes the performed comparisons correct enough.

Under the influence of the acoustic-gravitational wave (AGW) front from epicenters of earthquake clear foF2 increases appear in the daily course of foF2 values. Triangulation measurements of AGW front propagation time in Yakutsk and Zhigansk give the estimation of AGW front propagation velocity, it is about 350 m/s.

By the method of epoch superposition it is shown that for eastern and southern directions normalized average foF2 values are less before earthquakes than after event.

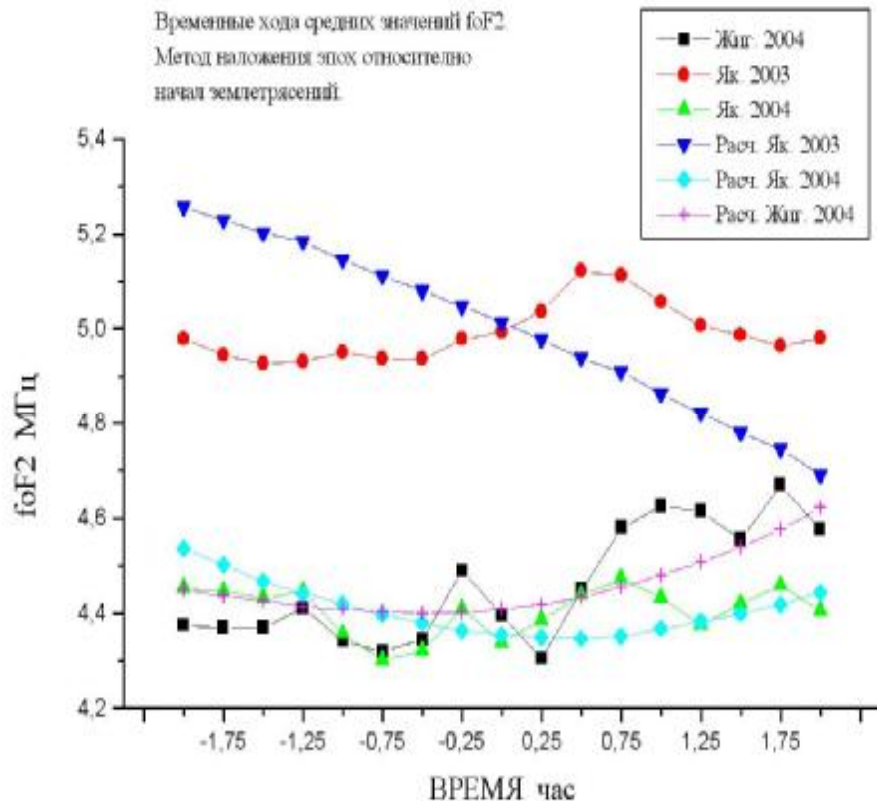
О воздействии землетрясений и взрывов на земную ионосферу известно давно [например 1, 3]. Авторы считают, что фронт акустико-гравитационных волн от очагов землетрясений может быть источником ионосферных возмущений. В последнее время эта тема становится вновь актуальной.

На рис.1 приведена карта рассматриваемого региона с обозначением очагов землетрясений. Выделяются, по отношению станций наблюдения, южные и восточные группы очагов. Нами были рассмотрены более 20 случаев землетрясений на Северо-Востоке России по каталогу ЦОМЭ за 2003-2004 г.г. и 21 случай в 2005 г. Методом наложения эпох проведено сопоставление моментов начал землетрясений на расстоянии до 1200 км. от Якутска с временным ходом foF2 по данным измерений на дигизондах DPS-4 в Якутске (62N, 129.7E) и Жиганске (68N, 123.5E). Прибор DPS-4 имеет высокую чувствительность, хорошее частотное разделение и возможность цветового разделения вертикальных и наклонных отражений. Дискретность частотного шага (ошибка измерений



0,05 МГц. Это позволяет уверенно снимать с ионограмм значения критических частот F-слоя (foF2) и делает достаточно корректными измерения вертикальных ионосферных параметров в условиях диффузности и ионосферных возмущений. По ионограммам строятся высотные профили Ne и рассчитывается параметр foF2p- критическая частота слоя F по модели IRI. На рис.2 приведены временные хода значений foF2 наблюдаемых в Якутске за 2003 и за 2004г. в Якутске и Жиганске с соответствующими им значениями foF2pn (foF2pn=foF2p+A, т.е. нормирован так, что среднее по выборке значение foF2 равно среднему foF2pn), усредненные методом наложения эпох относительно начала землетрясений. 2003 г.: Якутск-10случаев, 2004г: Якутск-15, Жиганск-13.

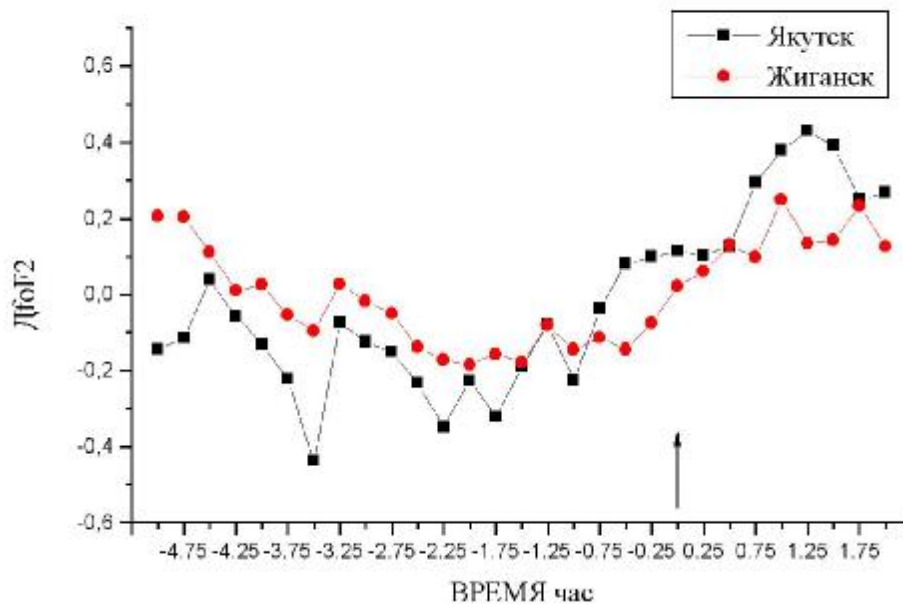
Основная особенность рисунка в том, что значения foF2 до начала землетрясений в



среднем ниже их значений после начала. Тем самым подтверждаются выводы, полученные в [2, 4] об отрицательных возмущениях перед началом землетрясений.

Из рис.2 видно, что временные вариации хода foF2 в Якутске и Жиганске до землетрясения совпадают, а после начала землетрясения корреляционная функция средних временных ходов foF2 Якутска и Жиганска имеет максимум при сдвиге на 15 минут.

2005г. Временной ход дневных значений
дельта foF2 для южных направлений



На рис. 3 приведены временные хода дневных значений $\Delta foF2 = foF2 - foF2_{пр}$ за 2005 г. по Якутску и Жиганску, кроме отмеченного выше факта повышения ионизации после землетрясения, на временном ходе $\Delta foF2$ в Якутске виден существенный положительный всплеск ионизации через 30 минут после начала землетрясений. Для Жиганска на фоне подъема ионизации всплеск $\Delta foF2$ происходит через 45 минут от начала.

Поскольку основная масса очагов землетрясений в 2005 г. расположена на Юге, можно, используя метод триангуляции, по полученному временному сдвигу оценить скорость распространения возмущающего фронта. Разница расстояний от “среднего” очага до Якутска и Жиганска, равная 330 км, дает скорость 360 м/сек.

Можно предположить, что ионосферный отклик на приход возмущающего фронта АГВ от землетрясений будет проявляться в виде положительных возмущений хода $foF2$ с временным сдвигом, зависящим от расположения станций относительно очага.

Детальное рассмотрение суточных ходов $foF2$ показывает, что ионосферный отклик от воздействия фронта АГВ наблюдается в виде небольшого, но всегда заметного всплеска увеличения $foF2$. Например, на рис.4 показаны суточные хода значений $foF2$ в Якутске и Жиганске за 11.10.2004 г.

Землетрясение произошло в 17,23 UT (стрелка на рис. 4) на расстоянии 184 км на восток от Якутска. Если принять, что ударная волна распространяется со скоростью 20 км/минуту, а высоту ионосферы 300 км, то расчетное время движения фронта АГВ до зенита Якутска будет равно 18 минут. Оно укладывается в интервал времени 7-22 минуты, в течение которого произошло наблюдаемое увеличение $foF2$. В Жиганске заметное возмущение хода $foF2$ было в интервале 28-33 минут после землетрясения. Расстояние зенита станции от очага 760 км. Фронт должен пройти это расстояние за 38 минуты. Но нужно учесть, что станции располагаются за плазмопаузой, где ионосфера на высоте 300 км не соприкасается с Землей, и фронт ударной волны движется в среде, под которой вращается Земля. Значит, фронт АГВ очагов на Востоке от станции и станция движутся навстречу, тогда оценочное расчетное время равно 30 минут входит в наблюдаемый временной интервал.

С этих позиций были рассмотрены 24 землетрясения за 2003-2004 г. г. Только в 5 случаях всплески ионизации, принятые в качестве ионосферного отклика на

землетрясения, не соответствуют приведенной методике расчета времени прохождения фронта ударной волны со скоростью 20 км/сек.

Обсуждение

Из выше изложенного следует факт, что относительные значения $foF2$ до землетрясения меньше, чем после него. Физическим объяснением этому может быть генерация в зоне очага землетрясения такого электрического поля, которое уменьшает ионизацию над пунктами наблюдения. Выключение генератора в момент землетрясения должно увеличить ионизацию.

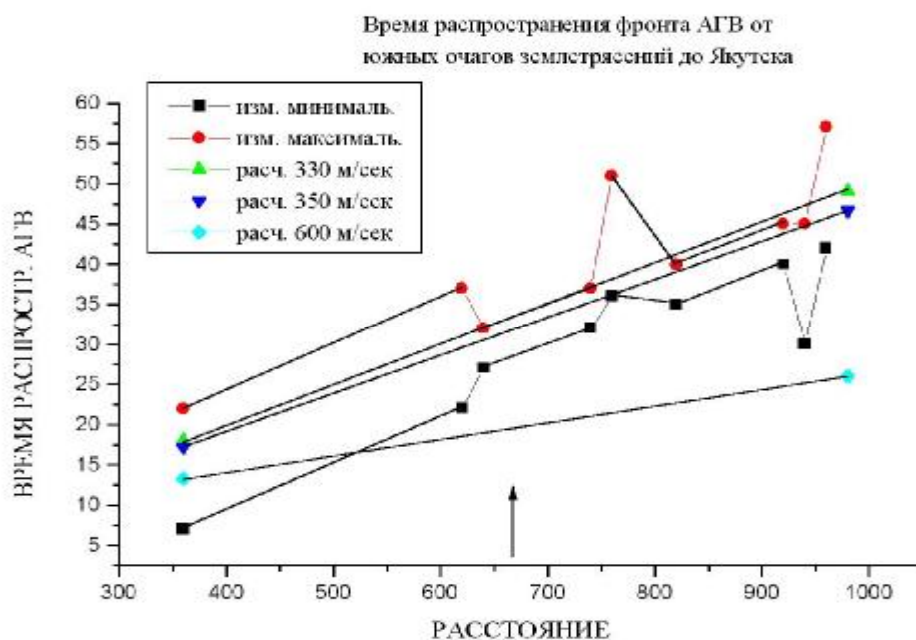
Из рассмотренных в 2003-2004 г.г. 24 случаев большая часть (15) была с восточных направлений, а в 2005 г. взяты южные направления, поэтому в 2005 г. отчетливо проявляется приход АГВ в Якутск и Жиганск.

Возможны три пути распространения АГВ от очагов землетрясения до зенита пункта наблюдения ионосферы на высоте 300 км:

1. Земная сейсмическая волна до пункта наблюдения – АГВ вертикально вверх до ионосферы.
2. АГВ вертикально вверх до ионосферы – вдоль ионосферы до зенита станции.
3. Прямой луч АГВ от очага землетрясения до зенита ионосферы над точкой измерения.

В случаях распространения на значительные расстояния первый путь можно исключить, поскольку земная волна очень быстро затухает. Для второго и третьего пути проведено сравнение расчетных и измеренных значений времени распространения фронта АГВ от южных очагов до Якутска. Результаты даны на рис. 4.

Видно, что измеренные значения очень близки к значениям времен, рассчитанным при скорости движения фронта АГВ равной 330 м/сек.



Линия времени для второго пути, рассчитанная при скорости фронта 600 м/сек [4], располагается существенно ниже измеренного диапазона времен. По-видимому, можно принять скорость фронта АГВ, равной 330-360 м/сек.

В таблице приведены 5 случаев, когда измеренное время распространения на 5-7 минут больше расчетных при восточном расположении очагов, а это не согласуется с выбранной методикой. Возможно, что выбранные всплески $foF2$ вызваны причинами не связанными с землетрясениями. С другой стороны нужен учет ионосферных ветров, поскольку в субавроральной ионосфере скорость ветра может достигать 1000 м/сек.

Из вышеизложенного следует:

1. Ионосферный отклик на воздействие АГВ от землетрясений проявляется в слое F в виде всплесков ионизации со значениями от 0.1 МГц до 1 МГц всегда уверенно выделяющихся на временном ходе ионизации.
2. Для случая распространения по прямой скорость ударного фронта АГВ равна 330-360 км/сек.
3. При расчетах времени распространения АГВ в ионосфере высоких широт на большие расстояния необходим учет совращения ионосферы с землей.

Список литературы

1. Дробжев В.И., Краснов В.М., Салихов Н.М. Об ионосферных возмущениях, сопровождающих землетрясения и взрывы // Изв. Вузов. Радиофизика. 1979. Т.22, N12. С. 1862-1863.
2. Климов Н.Н., Шашункина В.М., Юдович Л.А. Перемещающиеся ионосферные возмущения в период магнитосферных бурь // Сов. Радио. 1980. N30. С.69-73.
3. Тарашук Ю.Е., Нагорский П.М., Борисов Б.Б. и др. Нестационарные процессы в ионосфере земли и их влияние на распространение коротких радиоволн. – Томск : Томский университет. 1986.
4. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V. e.a. On spread-Es effects in the ionosphere before earthquakes // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. Vol.5. P. 69-72.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭМАНАЦИЙ ПОДПОЧВЕННОГО РАДОНА В ПЕРИОД АКТИВИЗАЦИИ СЕЙСМИЧНОСТИ КАМЧАТКИ В АВГУСТЕ 2006 г.

INVESTIGATION OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF UNDERGROUND RADON EMANATIONS DURING SEISMIC ACTIVATION IN KAMCHATKA IN AUGUST 2006

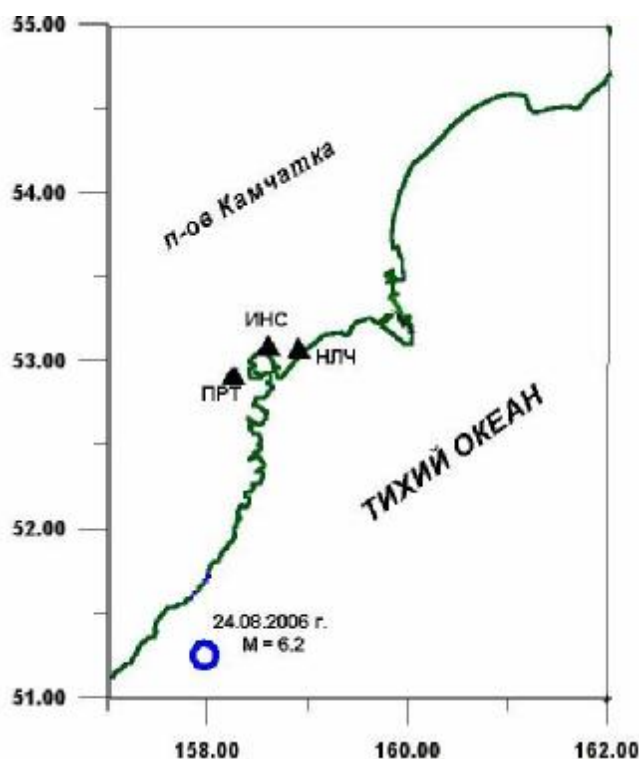
П.П. Фирстов^{1,2}, Е.А. Пономарев^{1,3}, Н.В. Чернева¹, Р.И. Паровик¹

¹Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,

²Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

³Институт солнечно-земной физики СО РАН

We considered the reaction of underground radon field on weak seismicity activation in Kamchatka in August 2006, when three earthquakes with the energy class $K > 13$ ($M > 5.8$) took place in the North-Eastern part of Kurilo-Kamchatskaya arc within the period August 17-24 after two-month calm. Seismicity activation was preceded by the increase of underground gas mass transfer in friable deposits at all observation sites of underground radon monitoring station network. Radon flow density at "Institute" site increased by 30 % with simultaneous decrease of permeability index of friable deposit part by 4 times ($6 \times 10^{-14} - 2.7 \times 10^{-13} \text{ м}^2$) in the area of registration site, which testifies reconstruction of the local stress field and compressive deformation prevalence.



Исследования подпочвенного радона и радона, растворенного в подземных водах, с целью поисков предвестников сильных землетрясений ведутся, начиная с 60^х годов прошлого столетия. Перспективность этого метода показана в обзорных работах [1, 4, 10].

В районе Петропавловск - Камчатского геодинамического полигона в 1997 - 2001 г.г. была создана сеть пунктов мониторинга подпочвенного радона, расположение которых в 2006 г. показано на рис.1 [6, 7]. Опорный пункт находится в районе Паратунской геотермальной системы (ПРТ) в долине ручья Коркино, а остальные пункты располагаются в различных геоструктурных элементах полигона.

Рис.1. Схема расположения пунктов мониторинга подпочвенного радона на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне. ПРТ – Паратунка, ИНС – Институт, НЛЧ – Налычево.

Особенностью применяемой методики является регистрация подпочвенного R_n в двух разноглубоких точках (один и два метра) зоны аэрации. В опорном пункте ПРТ регистрация осуществляется как в зоне аэрации (один метр от поверхности Земли - т. 1), так и вблизи зоны полного влагонасыщения (3 метра – т. 2). Пункты оснащены современными автономными (до двух месяцев) радиометрами "РЕВАР", в которых в качестве датчиков используются газоразрядные счетчики β -излучения продуктов распада радона типа СТС6, с накоплением данных на твердотельную память и последующим их выводом на компьютер. Кроме того, на двух станциях Паратунка (ПРТ) и Институт (ИНС) регистрируется концентрация радона с поверхности грунта, а также атмосферное

давление и температура. Частота дискретизации всех наблюдаемых параметров в пункте ПРТ, Налычево (НЛЧ) составляет 2.0 час^{-1} .

Пункт ИНС на базе скважины НИС-1 (глубина 350 м) располагается рядом со зданием Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Скважина расположена в пределах Петропавловского горста в районе погребенной депрессии, перекрытой толщей позднеплейстоценовых вулканогенных осадочных отложений. Скважина обсажена на всю глубину стальными трубами, а в интервале 265-295 м установлен щелевой фильтр. Вода гидрокарбонатная, натриево-кальциевая.

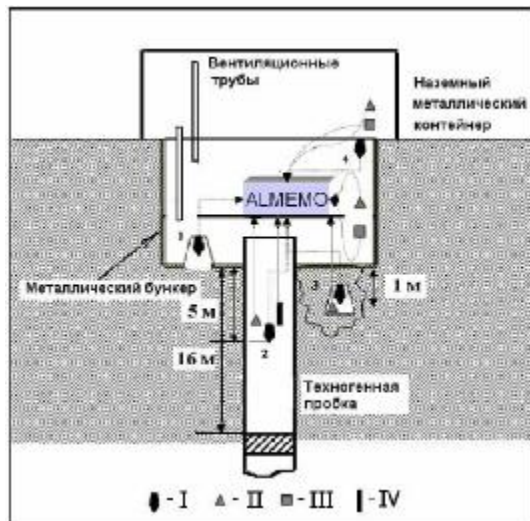


Рис. 2. Схема размещения датчиков в скважине НИС-1: I – газоразрядные счетчики β -излучения; II – датчики температуры; III – датчики давления; IV – датчик углекислого газа.

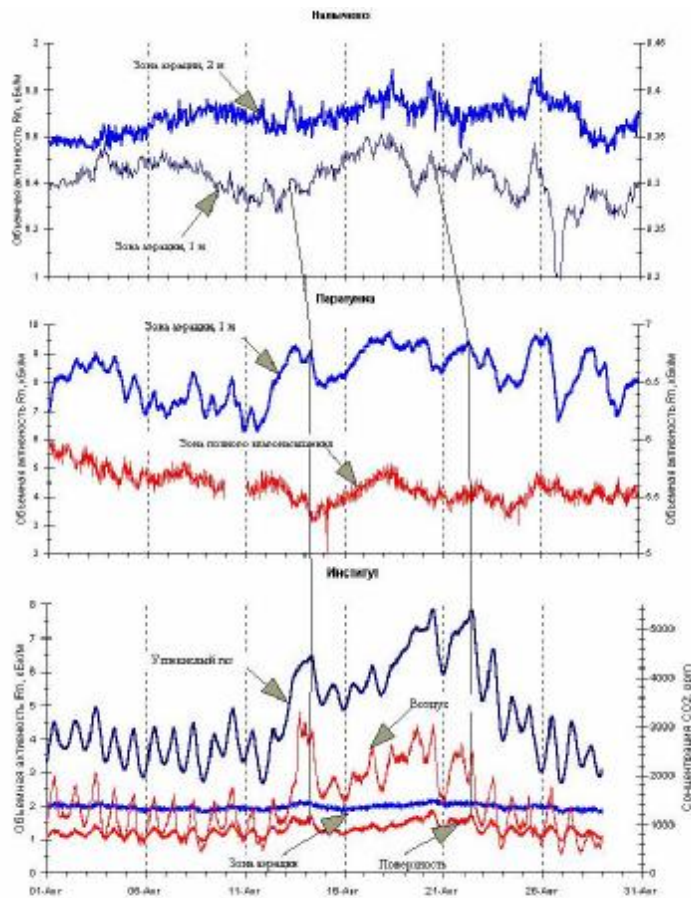
В настоящее время на глубине 16 м в стволе скважины находится техногенная «пробка». Над оголовком скважины сооружен подземный бункер размером $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$, над которым на поверхности земли установлен металлический контейнер. Подземный бункер через контейнер и систему труб вентилируется за счет естественной конвекции воздуха (рис. 2).

С целью изучения особенностей массопереноса радона в подземном бункере установлено четыре газоразрядных счетчика. Датчики в подземном бункере НИС-1 размещены следующим образом (рис. 2): 1) в стволе скважины на глубине 2.5 м от края оголовка; 2) в зоне аэрации на глубине одного метра от пола; 3) в накопительной емкости, установленной на полу; 4) в воздухе подземного бункера.

Кроме того, в ствол скважины на глубину один метр опущен датчик для регистрации концентрации углекислого газа. В наземном контейнере установлены датчик температуры и датчик атмосферного давления, а в подземном бункере три датчика температуры и датчик давления. Регистрация всех параметров осуществляется с помощью двух измерительных приборов ALMEMO 2390-8 и ALMEMO 2590-9 с частотой дискретизации 6.0 час^{-1} .

По оперативным данным Камчатского филиала Геофизической службы РАН после двухмесячного сейсмического затишья 17 и 20 июля 2006 года у берегов Камчатки произошло два землетрясения с локальной магнитудой $M = 5.9$ и $M = 5.8$. Очаги этих землетрясений располагались на севере (55.54° с.ш.) и на юге (49.6° с.ш.) полуострова Камчатка, на удалении около 390 км от пункта регистрации. В районе южной Камчатки (51.19° с.ш.) 24 августа на удалении 190 км от пункта ПРТ произошло самое сильное землетрясение с $M_L = 6.2$, а 1-2 сентября прошла серия землетрясений на юге Кроноцкого и в Авачинском заливах. Эпицентр самого сильного толчка с магнитудой $M = 5.6$ располагался в 110 км от пункта регистрации. Оживление сейсмичности на всей протяженности северного фланга Курило-Камчатской островной дуги дает основание предполагать увеличение скорости движения Тихоокеанской плиты, что могло привести к перестройке регионального поля напряжений.

Рассмотрим соотношения кинематических и динамических параметров концентрации Rn в подпочвенном воздухе на пунктах сети радонового мониторинга за этот период. На рис. 3 показана динамика объемной активности Rn (ОА Rn) на станциях НЛЧ, ПРТ, ИНС, расположение которых показано на рис. 1. Как видно на рис. 3 с 12 по 24 августа наблюдается хорошо выраженная аномалия в концентрациях CO_2 и Rn в пункте ИНС, которая слабо прослеживается и в пунктах НЛЧ и ПРТ.



С целью выделения аномалии в пунктах нлч и прт был построен агрегированный сигнал по методике [2], на рис. 4 в агрегированном сигнале данная аномалия хорошо выделяется.

Рис. 3. Динамика ОА Rn на пунктах регистрации подпочвенного Rn в августе 2006 г.

Длительность аномалии составляет около 12 суток, причем появление ее на станциях прт и инс происходит позже почти на сутки позже относительно станции нлч, расположенной на 30 км ближе к выходу сейсмофокального слоя на дневную поверхность, что косвенно указывает на направление процесса, ответственного за аномалии в поле Rn.

Как видно на рис. 5а в подземном бункере регистрируются четко выраженные суточные колебания атмосферного давления с амплитудой около 10 гПа. Причем максимум в суточных колебаниях составляющих геогаза приходится на окрестности максимума скорости изменения атмосферного давления (рис. 5б). Эти суточные колебания обусловлены особенностями конструкции наблюдательного пункта. Нагрев металлического контейнера над бункером днем и его охлаждение ночью с перепадом температуры до 15°C создает суточные колебания давления за счет конвекционных потоков. Суточные колебания давления для данного пункта можно рассматривать как зондирующий сигнал, а эволюция отклика концентрации Rn на эти колебания может служить характеристикой состояния геосреды в данной точке.

Если рассматривать рыхлые отложения как пористую одномерную среду, заполненную подпочвенным воздухом (геогазом), то скорость потока подпочвенного воздуха подчиняется закону Дарси [4]:

$$V = -K / \mu \times \partial P / \partial z, \quad (1)$$

где: K – коэффициент проницаемости рыхлых отложений, μ – динамическая вязкость воздуха, $\partial P / \partial z$ – градиент давления в подпочвенном воздухе, при условии $\partial P \ll P_0$, где P_0 – атмосферное давление на дневной поверхности.

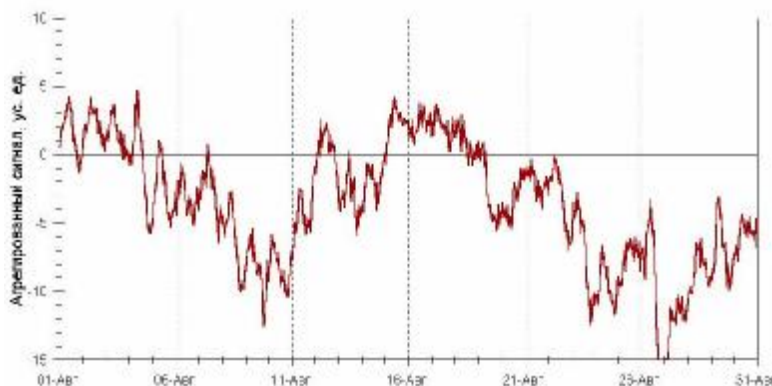


Рис. 4. Агрегированный сигнал, построенный по данным пунктов ПРТ и НЛЧ (4 канала).

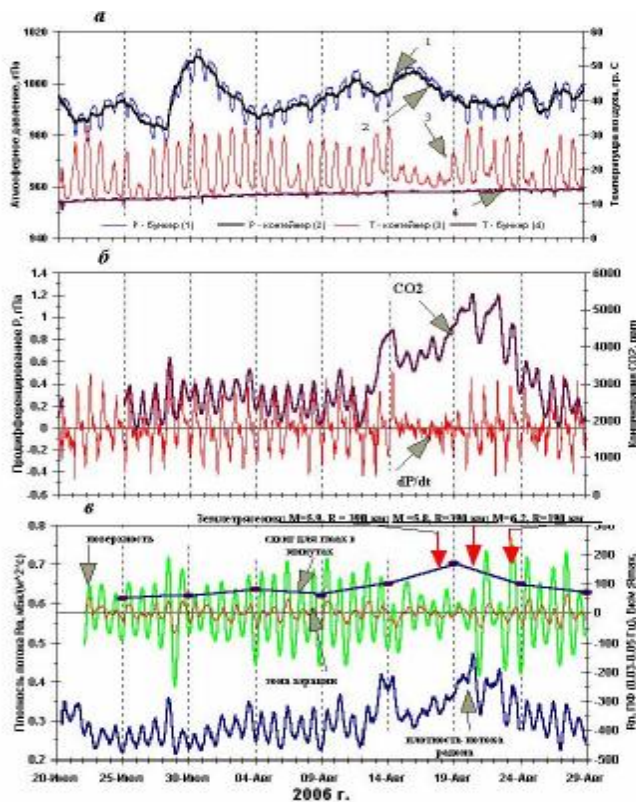


Рис.5. а – температура и атмосферное давление в наземном контейнере и подземном бункере; б – скорость изменения атмосферного давления и концентрация CO_2 ; в – отфильтрованные кривые концентрации радона (ПФ 0.03 – 0.05 цикл/час) в пункте ИНС (зона аэрации и поверхность), сдвиг для максимума корреляции между этими кривыми в пятисуточных интервалах и плотность потока радона.

Причем вариации плотности радона вызваны не разбавлением радона атмосферным воздухом, а запаздывающим по фазе возмущением давления геогаза, вызванным изменением давления на входе в пористую среду. Очевидно, сдвиг фазы зависит, при прочих равных условиях, от глубины установки датчика. По сдвигу фаз между сигналами разнесенных по глубине датчиков можно оценить величину коэффициента Дарси для данного грунта.

Покажем, что этот сдвиг по времени контролируется величиной коэффициента K , полагая, что кривые концентраций R_n на разных глубинах находятся в одинаковой фазе:

$$wt_1 - k_0 z_1 = wt_2 - k_0 z_2$$

получим $k_0 = w(t_2 - t_1)/(z_2 - z_1)$. Поскольку $k_0 = (w/2D)^{1/2} = (wv/KC^2)^{1/2}$ то:

$$K = (v/wC^2)[(z_2 - z_1)/(t_2 - t_1)]^2. \quad (2)$$

Здесь z_1 и z_2 - глубина заложения датчиков, $t_2 - t_1 = Dt$ - фазовый сдвиг в суточном ходе кривых концентрации радона.

С целью исследования корреляционных зависимостей концентрации R_n в зоне аэрации и на поверхности была осуществлена фильтрация полосовым фильтром с граничными частотами $f_{1p}=0.03$ и $f_{2p}=0.05$ цикл/час, что позволило выделить суточную гармонику (рис.5в, верхние кривые). Поиск максимума коэффициента корреляции проводился для пятисуточных интервалов и относился к концу интервала. Как видно на рис. 5, значение сдвига максимума корреляции заключено в пределах 80-180 мин. По формуле (1) вычислялся коэффициент Дарси, который заключен в пределах $6 \times 10^{-14} - 2.7 \times 10^{-13} \text{ м}^2$, причем как видно на рис. 4 наименьшее значение коэффициента Дарси приходится на период активизации сейсмичности.

В работе [8], на основании численных расчетов с использованием диффузионно-конвективного уравнения переноса радона показано, что величина плотности потока радона (ППР) с поверхности земли более чувствительна к изменению напряженно-деформированного состояния геосреды чем величина объемной активности радона (ОА Rn) в подпочвенном воздухе, что проиллюстрировано на основании данных, полученных на Петропавловск - Камчатском геодинамическом полигоне [7].

Классическая теория рассматривает массоперенос радона в рыхлых отложениях как некий установившийся диффузионно-конвективный процесс, который описывается следующим уравнением [3]:

$$h \frac{dRn}{dt} = D \frac{d^2 Rn}{dx^2} + v h \frac{dRn}{dx} - h Rn l + Q ; \quad (3)$$

где Rn – концентрация радона в единице объема порового пространства, Ку/см³; h – пористость горной породы; D – коэффициент диффузии, см²/с; l – постоянная распада эманаций, с⁻¹; v – скорость конвективного переноса, см/с; $Q = \frac{a \cdot Ra \cdot r \cdot l}{h}$ скорость

выделения эманаций в поровое пространство в единице объема среды, Ку·с/см³; Ra – количество радия в породе, г; r – плотность породы, г/см³; a – коэффициент эманирования.

Краевыми условиями уравнения (3) будут:

1. $z = 0, N(0, t) = 0$
2. $t = 0, N(z, 0) = N_{\infty}$
3. $z \rightarrow -\infty, N(z, t) = N_{\infty}$

Здесь $N_{\infty} = \frac{Q}{lh}$ – фоновая концентрация радона в точке регистрации. Точное

решение уравнения (3) с краевыми условиями (4) может быть получено операционным методом (интегральным преобразованием Лапласа).

Для вычисления плотности потока на поверхности методом приближенного соответствия между точными и измеренными концентрациями радона применен алгоритм, который основывается на теореме Дюамеля и использует принцип суперпозиции решения. Концентрация в точке z в момент времени t_M определяется вкладом отдельных компонент, на каждую из которых воздействует соответствующая постоянная единичная плотность потока вида:

$$q(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases}$$

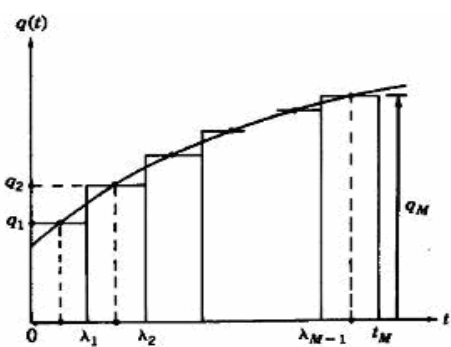


Рис.6. Аппроксимация плотности $q(t)$ потока радона постоянными элементами.

Плотность потока на поверхности аппроксимируется ступенчатой единичной плотностью (рис. 6). На интервалах времени

$l_1, l_3, \dots, l_{M-1}$, используются значения плотности потока в моменты времени: от 0 до l_1 , от l_1 до l_2 , от l_{M-1} до t_M , которые обозначим $q_1, q_2, \dots, q_M$, тогда решение реализуется в виде суперпозиции элементарных блоков модельной задачи (1) для соответствующих интервалов времени.

Используя выше описанный подход, была рассчитана плотность потока Rn с поверхности на основании измерений ОА Rn на поверхности и в зоне аэрации (рис. 4в, нижняя кривая). В период сейсмической активизации ППР возросла в 1.6 раза с 0.25 до 0.4 мБк/м³.

В целом анализ динамических и кинематических параметров концентрации радона на сети пунктов в августе 2006 г. позволяет говорить, что в период с 12 по 24 августа перед землетрясением с $M = 6.2$ наблюдается сжатие горных пород, что приводит к увеличению плотности потока с поверхности и уменьшению коэффициента проницаемости в рыхлых отложениях. Изложенная методика обработки данных регистрации концентрации радона на двух уровнях позволяет осуществлять мониторинг за изменением напряженно-деформированного состояния геосреды на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне.

Список литературы

1. Войтов Г.И. Мониторинг атмосферного радона в подпочвах сейсмически активных регионов Центральной Азии // Физика Земли. 1998. № 1. С. 27-38.
2. Любушин А.А.(Мл) Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103-108.
3. Новиков Г. Ф., Капков Ю.Н. Радиоактивные методы разведки. Недра: М. 1965. 750 с.
4. Рудаков В.П. Геодинамические процессы и их предвестники в вариациях полей радиоактивных эманаций// Геохимия. 2002. № 1. С. 56-62.
5. Теркот Д., Шуберт Д. Геодинамика. Геологическое приложение физики сплошных сред. Т.2. М.: Мир, 1985. 730 с.
6. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской геотермальной системе в 1997-1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1999. № 6. С. 33-43.
7. Фирстов П.П., Рудаков В.П. Результаты регистрации подпочвенного радона в 1997-2000 гг. на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне // Вулканология и сейсмология. 2003. № 1. С.26-41.
8. Фирстов П.П., Широков В.А., Руленко О.П., Яковлева В.С., Исаев А.В., Малышева О.П. О связи динамики подпочвенного радона (^{222}Rn) и водорода с сейсмической активностью Камчатки в июле - августе 2004 г. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 49-59.
9. Яковлева В.С., Каратаев В.Д. Плотность потока радона с поверхности земли как возможный индикатор изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды // Вулканология и сейсмология. 2007. №1. С. 74-77.
10. King C.-Y. Gas-geochemical approaches to earthquake prediction // Isotopic geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruption. Vienna. 1991. P.22-36.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ ПО МОНИТОРИНГУ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

MONITORING OF SEISMIC ACTIVITY AND EARTHQUAKES PREDICTION IN KAMCHATKA

В.Н. Чебров

Камчатский филиал Геофизической службы РАН

In the given report we present monitoring system for seismic activity and earthquakes prediction in Kamchatka. Monitoring is based on seismic and geophysical observational networks. Methods and techniques for earthquakes prediction, used by Kamchatkan Branch of Russian Expert Council of Earthquake Prediction are presented. On the basis of these methods complex assessment of seismic hazard for Kamchatka is developed.

В России мониторинг опасных эндогенных процессов осуществляется в рамках Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Под системой мониторинга понимается информационная система, включающая ведение наблюдений, обработку и анализ данных, прогноз исследуемых явлений.

Камчатка и Командорские острова относятся к регионам мира, где сейсмичность, опасность цунами и вулканическая активность достигают наивысшей интенсивности на нашей планете. В среднем землетрясения с магнитудой 7.0 и выше происходят на Камчатке каждые три года. На Камчатке 29 действующих вулканов, среди которых вулкан Ключевской (4750 м) – самый высокий действующий вулкан Евразии. Ежегодно происходит несколько извержений, пепловые выбросы которых угрожают безопасности полетов в северной части Тихого океана, в том числе на авиатрассах между США, Россией и Японией. По уровню угрозы природных катастроф Камчатка, наряду с Курильскими островами, является одной из наиболее опасных территорий России. Нет никаких сомнений в том, что природные катастрофы на Камчатке будут возникать и впредь. В ближайшие 3–5 лет на Камчатке сильное землетрясение с интенсивностью сотрясений 7 баллов и более ожидается с вероятностью более 50%.

Основной задачей Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) является обеспечение в режиме реального времени сейсмического мониторинга Камчатского региона, в том числе действующих вулканов, участие в сейсмическом мониторинге России и мира. Основная цель мониторинга - информирование органов государственной власти и МЧС о сейсмической опасности и вулканической активности региона.

На рисунке 1 приведена функциональная схема организации работ по мониторингу сейсмической и вулканической активности Камчатки.

Система мониторинга сейсмической и вулканической активности Камчатки включает в себя: (1) сети сейсмических станций; (2) технические и программные средства сбора, обработки и хранения данных, каналы связи; (3) методические и программные средства обработки сейсмических сигналов в автоматическом и автоматизированном режимах; (4) оценку сейсмической обстановки по ряду параметров на базе оперативного каталога землетрясений; (5) визуальные и видео наблюдения за действующими вулканами; (6) оценку состояния действующих вулканов по комплексу дистанционных методов, (7) экспертную оценку текущего состояния сейсмической и вулканической опасности.

Система оперативного контроля сейсмичности Камчатки основывается на радиотелеметрических сейсмических станциях (РТСС) [7]. Информация о сейсмических сигналах по радиоканалу поступает на приемные центры в г. Петропавловске-Камчатском, г. Ключи и п. Козыревск в реальном масштабе времени. Оценка параметров наиболее сильных землетрясений Камчатки ($M > 4.0$) производится в автоматическом и автоматизированном режимах. Система обработки сейсмологической информации в

зависимости от времени выходных данных имеет три уровня: (1) служба срочных донесений (задержка 20-30 мин.); (2) оперативная обработка (задержка до 24 часов); (3) окончательная (сводная) обработка (задержка 1 год). На заключительном этапе формируется банк сейсмологической информации, который доступен всем заинтересованным исследователям через сеть Internet.

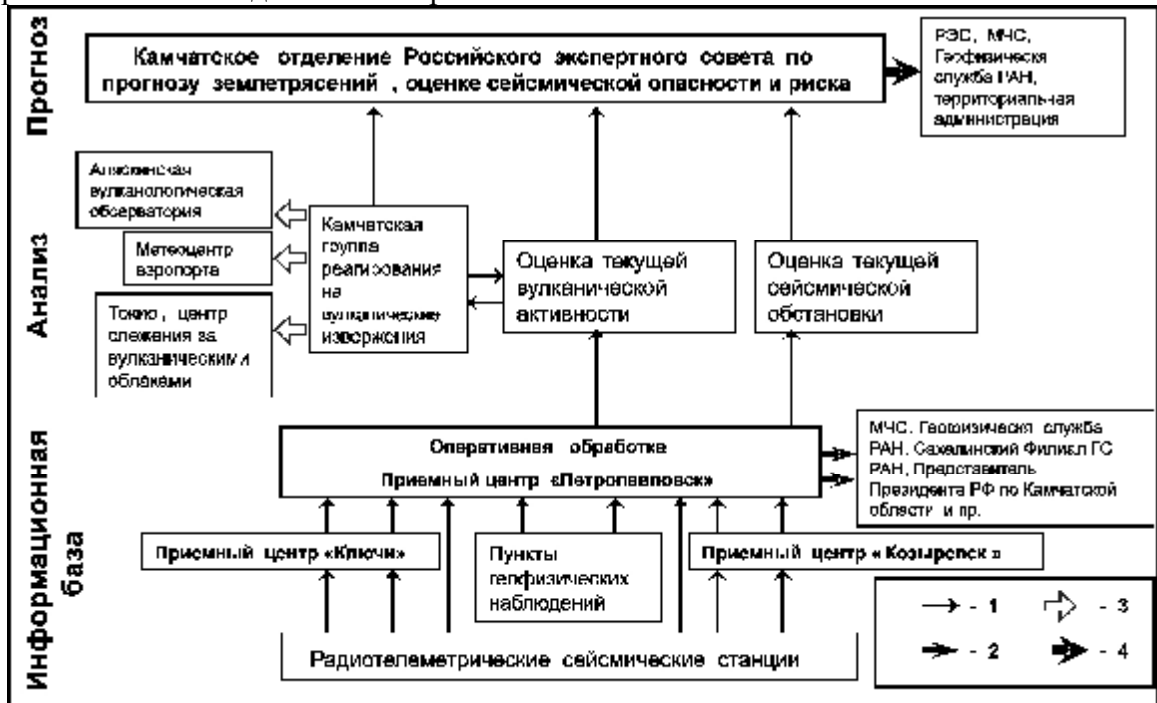


Рис.1. Блок-схема организации работ по мониторингу сейсмической и вулканической активности Камчатки. 1 – потоки информации; 2 – оперативные сообщения о сейсмической активности Камчатки; 3 – сообщения об активности камчатских вулканов в целях обеспечения безопасности авиа-полетов в Северо-Западном секторе Тихого океана; 4 – экспертные заключения о сейсмической и вулканической опасности на основе комплексной оценки сейсмической и вулканической активности Камчатского региона.

В основе всех работ по сбору, обработке и хранению сейсмологической и геофизической информации лежит корпоративная компьютерная сеть КФ ГС РАН [7]. По компьютерной сети организована непрерывная передача информации о землетрясениях с удаленных сейсмических станций радиотелеметрической сети. Кроме сейсмологической информации, сеть обеспечивает передачу низкоскоростных видео потоков с систем видеонаблюдения за вулканами, расположенных в г. Ключи и п. Козыревск. Разработка и внедрение оригинальных методических и программных средств обработки сейсмических сигналов позволили создать систему контроля сейсмичности в регионе в режиме реального времени. Включение корпоративной компьютерной сети в Internet дало возможность обмена информацией на всех уровнях без ограничения количества пользователей.

Оценка сейсмической обстановки в районе Камчатки производится по параметрам, характеризующим состояние сейсмичности: сейсмическая активность A_{10} ; наклон графика повторяемости γ ; параметры, определяемые по прогностическим методикам RTL и Z-тест; вариации площади сейсмогенных разрывов ΔS ; форшоковая кластеризация [13].

Мониторинг состояния вулканов ведется дистанционными методами на основе сейсмических, визуальных, видео- наблюдений и анализа спутниковых снимков [16]. Установленные и включенные в корпоративную компьютерную сеть видеокамеры позволяют наблюдать в реальном времени за состоянием вулканов Шивелуч, Ключевской и Безымянный. Информация о текущем состоянии контролируемых вулканов, полученная на основе результатов оперативной обработки сейсмических данных, распознавания физических явлений на контролируемых вулканах с использованием базы знаний

извержений, ежедневно размещается на странице КФ ГС РАН в Internet. Через Камчатскую группу реагирования на вулканические извержения (KVERT, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index.html>, [8]) информация о состоянии вулканов Камчатки передается во все крупнейшие авиакомпании мира и распространяется в России через Федеральную Авиационную Службу. В рамках научно-технического сотрудничества с Вулканологической Обсерваторией Университета штата Аляска (США), Центрами Слежения за Пепловыми Облаками в Токио (Япония) и Анкоридже (США) ведется обмен информацией о состоянии вулканов Камчатки, Северных Курил и Аляски для обеспечения безопасности полетов в северной части Тихого океана.

Камчатские сети сейсмических и геофизических наблюдений КФ ГС РАН обладают достаточной оснащенностью для осуществления непрерывного комплексного мониторинга геодинамических процессов, протекающих в регионе. Исследования ведутся на основе применения современных передовых технологий:

- цифровой регистрации сейсмических сигналов и параметров геофизических полей;
- широкополосных цифровых сейсмических станций;
- телекоммуникационных систем на базе спутниковых и кабельных каналов связи;
- системы спутниковой навигации GPS;
- компьютерной обработки информации в режиме, близком к реальному времени;
- снимков со спутников, используемых для дистанционного зондирования Земли.

Применение новых технологий обеспечивает исследователей новыми уникальными данными, что позволяет получить новые теоретические результаты, соответствующие динамике развития науки.

По состоянию на конец 2006 г. Камчатские сети сейсмических и геофизических наблюдений включают в себя:

- Камчатскую региональную сеть сейсмических станций, объединяющую 11 стационарных цифровых сейсмостанций, 32 радиотелеметрических сейсмостанций (из них 20 станций на активных вулканах), сейсмостанцию «Петропавловск» - опорную станцию Геофизической службы РАН на Дальнем Востоке, входящую в мировую сеть наблюдений, центры сбора сейсмометрической информации (Петропавловский, Козыревский и Ключеской приемные центры РТСС);

- сеть приборов регистрации сильных движений (16 станций);
- сеть гидрогеохимических наблюдений (12 водопунктов);
- пункты гидродинамических наблюдений (2 скважины);
- сеть GPS наблюдений KamNet (17 постоянных пунктов);
- пункты измерения электротеллурических потенциалов (4 системы профилей);
- пункты регистрации сейсмических шумов (2 станции);
- пункты геомагнитных наблюдений (3 трехкомпонентных индукционных магнитометра);
- комплексную геофизическую обсерваторию «Карымшина»;
- пункт экспериментальных газодинамических наблюдений и нейтронного мониторинга;

- пункты видео наблюдений за активными вулканами Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Авачинский (в экспериментальном режиме).

В соответствии с Положением о Российском экспертном совете по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска, утвержденного совместным решением Российской Академии наук и МЧС России 15 марта 2003 г., Камчатское отделение Федерального центра прогнозирования землетрясений в феврале 2006 года было реорганизовано и продолжает свою работу в качестве Камчатского филиала Российского экспертного совета (КФ РЭС).

Основная функция КФ РЭС – оперативная оценка сейсмической опасности, прогноз землетрясений и извержений вулканов, возможных последствий их воздействий. На этом этапе мониторинга производится комплексирование более 20 методов прогноза

[6]. В настоящее время в работе КФ РЭС принимают участие шесть научно-исследовательских организаций:

- Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН);
- Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН);
- Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН);
- ФГУП "Камчатгеология";
- Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН, Москва);
- Физико-технический институт РАН (ФТИ РАН, Санкт-Петербург).

Кроме того, рассматриваются прогностические оценки, сделанные частными лицами.

С 2006 г. в работе РЭС регулярно участвует представитель Центра мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций ГУ МЧС по Камчатской области. При оценке сейсмической опасности рассматриваются следующие основные методы наблюдений за предвестниками сильных землетрясений (в скобках указаны авторы заключений о сейсмической опасности):

сейсмологические

- вариации крутизны спада огибающей коды слабых местных землетрясений (А.А. Гусев, И.Р. Абубакиров, КФ РАН, ИВиС ДВО РАН) [1, 22];
- алгоритм М6 - комплексное использование большой совокупности различных сейсмологических параметров (В.А. Широков, ИВиС ДВО РАН) [21];
- обнаружение сейсмических затиший методами RTL и Z-тест (Г.А. Соболев, ИФЗ РАН; Н.М.Кравченко, В.А. Салтыков, КФ ГС РАН) [14, 18, 23];
- параметр TAU (вариации отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s), данные поля напряжений, (Л.Б. Славина, ОИФЗ РАН) [17].;
- мониторинг сдвиговых напряжений по азимутальным вариациям отношения скоростей сейсмических волн (И.А. Гарагаш, ОИФЗ РАН) [5]
- прогноз магнитуды и времени землетрясения методом «Критическое ускорение сейсмичности (КУС)» (Г.А. Соболев, ИФЗ РАН);
- временные изменения средних значений временных интервалов между сейсмическими событиями и их коэффициент вариации (Н.Г.Томилин, ФТИ РАН) [19];

геофизические

- скважинные гидрогеодинамические предвестники – вариации уровня воды в скважин (Г.Н. Копылова, КФ ГС РАН) [9];
- Гидрогеодеформационный (ГГД) мониторинг – гидрогеологический эффект Варгана-Куликова (Н.Н. Смолина, ФГУП "Камчатгеология") [3];
- анализ атмосферно-ионосферных процессов (сводное заключение, ИКИР ДВО РАН) [2];
- вариации параметров высокочастотного сейсмического шума, связанные с изменением приливной чувствительности среды перед сильными землетрясениями (В.А. Салтыков, Ю.А.Кугаенко, КФ ГС РАН) [12, 15];
- вариации электротеллурического поля (Ю.Ф. Мороз, ИВиС ДВО РАН) [11];
- скважинные геоакустические измерения; измерения электрической составляющей электромагнитного поля Земли в СНЧ-диапазоне частот с помощью подземной антенны; мониторинг изменений плотности воды в скважине (В.А. Гаврилов, Ю.В. Морозова, ИВиС ДВО РАН) [4];

геохимический

- вариации химического состава воды в скважинах и источниках (Ю.М. Хаткевич, Г.В. Рябинин, КФ ГС РАН) [20];

геодезический

- изменения положения GPS пунктов (В.Е. Левин, КФ ГС РАН) [10];

астрономический

- расчет силового воздействия на конкретную территорию по данным движения объектов Солнечной системы (А.Я. Лездиньш, частное лицо).

Заседания КФ РЭС проводятся еженедельно. Заключение о сейсмической и вулканической опасности передаются в РЭС, Областную и Городскую администрацию, Главное Управление МЧС России по Камчатской области, Геофизическую службу РАН; центр "Антистихия" МЧС РФ; управление ФСБ по Камчатской области. Передача заключений в средства массовой информации осуществляется через пресс-центр ГУ МЧС по Камчатской области.

Ежедневно информация о происшедших в регионе землетрясениях и о состоянии вулканов размещается на сервере КФ ГС РАН (<http://emsd.iks.ru>) в Интернете:

<http://data.emsd.iks.ru/regquake/> - карта эпицентров землетрясений Камчатки, Северных Курильских и Командорских островов;

<http://data.emsd.iks.ru/klyquake/index.htm> - карта эпицентров землетрясений Северной группы вулканов;

<http://data.emsd.iks.ru/avhquake/index.htm> - карта эпицентров землетрясений Авачинско-Корякской группы вулканов;

<http://emsd.iks.ru/~ssl/monitoring/main.htm> - информация о состоянии активных вулканов Камчатки.

Камчатка является ценнейшим исследовательским полигоном с высоким уровнем современной тектонической активности, определяющим ее сейсмичность и вулканическую активность. В связи с этим в регионе существует постоянная угроза возникновения чрезвычайных ситуаций природного и природно-техногенного, что требует выработки мер по снижению риска катастроф на основе современных научных разработок, в том числе совершенствование получения комплексной оценки сейсмической и вулканической опасности для Камчатского региона.

Список литературы

1. Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Гусева Е.М. Отражение процесса подготовки Кроноцкого землетрясения 05.12.97 во временных вариациях скорости спада огибающих кода-волн слабых землетрясений // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. 1998. Петропавловск-Камчатский. КГАРФ. С. 112-120.
2. Богданов В.В., Бузевич А.В., Винницкий А.В., Дружин Г.И., Купцов А.В., Поддельский И.Н., Смирнов С.Э., Чернева Н.В., Шевцов Б.М. О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 2004. «Камчатский печатный двор». С. 259-278.
3. Вартанян Г.С., Куликов Г.В. Гидрогеодеформационное поле Земли // ДАН. 1982. Вып. 2. С. 310-314.
4. Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко В.П., Морозова Ю.В., Яковлева Ю.Ю. Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. №2. Вып.8. С. 43-53.
5. Гарагаш И.А. Анализ изменений напряженного состояния земной коры при подготовке Кроноцкого землетрясения // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года: предвестники, особенности, последствия. 1998. Петропавловск-Камчатский. С. 106-111.
6. Гордеев Е.И., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Предвестники камчатских землетрясений (по материалам Камчатского отделения Федерального центра прогнозирования землетрясений, 1998-2004 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2006. №4. С. 3-13.
7. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 6-27

8. Кирьянов В.Ю., Чубарова О.С., Сеньюков С.Л., Евдокимова О.А., Гарбузова В.Т. Группа по обеспечению безопасности полетов от вулканических пеплов (КВЕРТ): 8 лет деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 408-423.
9. Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 1. Вып. № 7. С. 50-66.
10. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтиаров В.Ф., Павлов В.М., Титков В.Н. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С.54-67.
11. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Назарец В.П., Нечаев С.А., Смирнов С.Э. Электромагнитное поле земли в изучении геодинамических процессов // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 2004. «Камчатский печатный двор». С. 152-170.
12. Рыкунов Л.Н., Салтыков В.А., Сеницын В.И., Чебров В.Н. Характерные параметры высокочастотного сейсмического шума перед сильными камчатскими землетрясениями 1996 г. // Доклады РАН. 1998. Т.361. №3. С. 402-404.
13. Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Параметры сейсмичности Камчатки в 2003 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2004. №3. С. 36-45.
14. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. №1. С. 57-65.
15. Салтыков В.А., Сеницын В.И., Кугаенко Ю.А. Мониторинг сейсмических шумов и его использование для прогноза сильных землетрясений на камчатке // Девятые геофизические чтения им. В.В. Федынского. Тезисы докладов. Москва, 1-3 марта 2007 г. М.: ЦГЭ, 2007. С. 84.
16. Сеньюков С.Л. Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000-2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. №3. С. 68-78.
17. Славина Л.Б., Мячкин В.В., Левина В.И. Опыт применения кинематических предвестников сейсмического поля для прогноза землетрясений на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 2004. «Камчатский печатный двор». С. 216-227.
18. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. №4, С.64-74
19. Томилин Н.Г., Дамастинская Е.Е., Павлов П.И. Статистическая кинетика разрушения и прогноз сейсмических явлений // Физика твердого тела. 2005. Т.47. Вып.5. С. 955-959.
20. Хаткевич Ю. М., Рябинин Г. В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 34-42.
21. Широков В.А. Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996-2000 гг. с магнитудой $M=6-7.8$ по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 95-116.
22. Gusev A. Temporal variations of the coda decay rate on Kamchatka: are they real and precursory? // JGR. 1997. Vol.102. No. B4. P. 8381-8396.
23. Wyss M., Habermann R.E. Precursory seismic quiescence // Pageoph. 1988. V.126. P. 319-332.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ И ПРОЦЕССЫ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

SEISMIC ACTIVITY OF THE EARTH AND PROCESSES IN THE INTERPLANETARY ENVIRONMENT

И.П. Шестопалов, Е.П. Харин

Геофизический Центр РАН

Data about seismic energy of the Earth in comparison to the parameters of the interplanetary environment are analyzed.

Dependence of the number of earthquakes with $M > 5,5$ from their longitudes and dependence of the number of vectors of an interplanetary magnetic field B from azimuth direction φ in solar ecliptic (SE) coordinate system with step 10° (change of a corner from 0 до 360°) was investigated. It is shown, that between the curves reflecting these dependences, there is a big similarity. Each of them has two maxima. The first, the greatest, is observed near to the longitude 135° , the second – 285° .

Correlation between dependence of the number of earthquakes on their latitudes and dependence of the number of vectors of an interplanetary magnetic field B from latitude directions of a corner θ (change of a corner from -90° up to 90°) is also observed.

Dependence of the number of earthquakes with $M > 5,5$ from their latitudes and dependence of the sizes of vectors of an interplanetary magnetic field from latitude directions θ (perpendicular planes ecliptic), with step 1° was also studied.

Вековые циклы сейсмической активности Земли

Настоящая работа является продолжением работ [5, 6], в которых исследовалась связь между сейсмичностью Земли и солнечной активностью.

В них проанализированы данные о сейсмической энергии, выделившейся из очагов землетрясений на всем земном шаре за период с 1680 по 2004г, в сопоставлении с циклами солнечной активности и геомагнитными возмущениями. В основе этих исследований лежит представление о сейсмичности как о части единого физического процесса в системе “Солнце-Земля”. Показано, что сейсмические явления определяются процессами как земного, так и солнечного происхождения.

Анализируя данные за представленный временной интервал можно отметить, что существует примерно 100-летний цикл солнечной активности и сейсмичности Земли, который не совсем совпадает с календарным столетием. Период с 1890-е по 1990-е годы оказался вековым циклом сейсмической активности. По мере развития векового цикла, в котором постепенно увеличивается солнечная активность, проявляется отрицательная корреляция между солнечной и сейсмической активностью.

Отметим, что столетний цикл солнечной и сейсмической активности разбивается на 3 периода примерно по 33 года, длительность каждого из которых в свою очередь составляет три 11-летних цикла солнечной активности. Минимальные значения первого периода наблюдались в двадцатых годах, второго – в конце пятидесятых годах, третьего – во второй половине восьмидесятых годов. Наиболее сильные землетрясения происходят в начале векового цикла.

В девяностых годах прошлого века наступил новый вековой цикл, в начале которого, на протяжении нескольких десятков лет, будет отмечаться сильная сейсмическая активность.

Дискретность структуры геофизической среды

На рис.1 показана зависимость значений широт эпицентров землетрясений с различными магнитудами от глубины эпицентров землетрясений за период 1900-2004г. [7]. Из рис. видно, что для $M > 5,5$ выделяются отдельные интервалы глубин, на которых наиболее часто происходят землетрясения. Отметим, что эти интервалы глубин сохраняются и при увеличении магнитуд землетрясений.

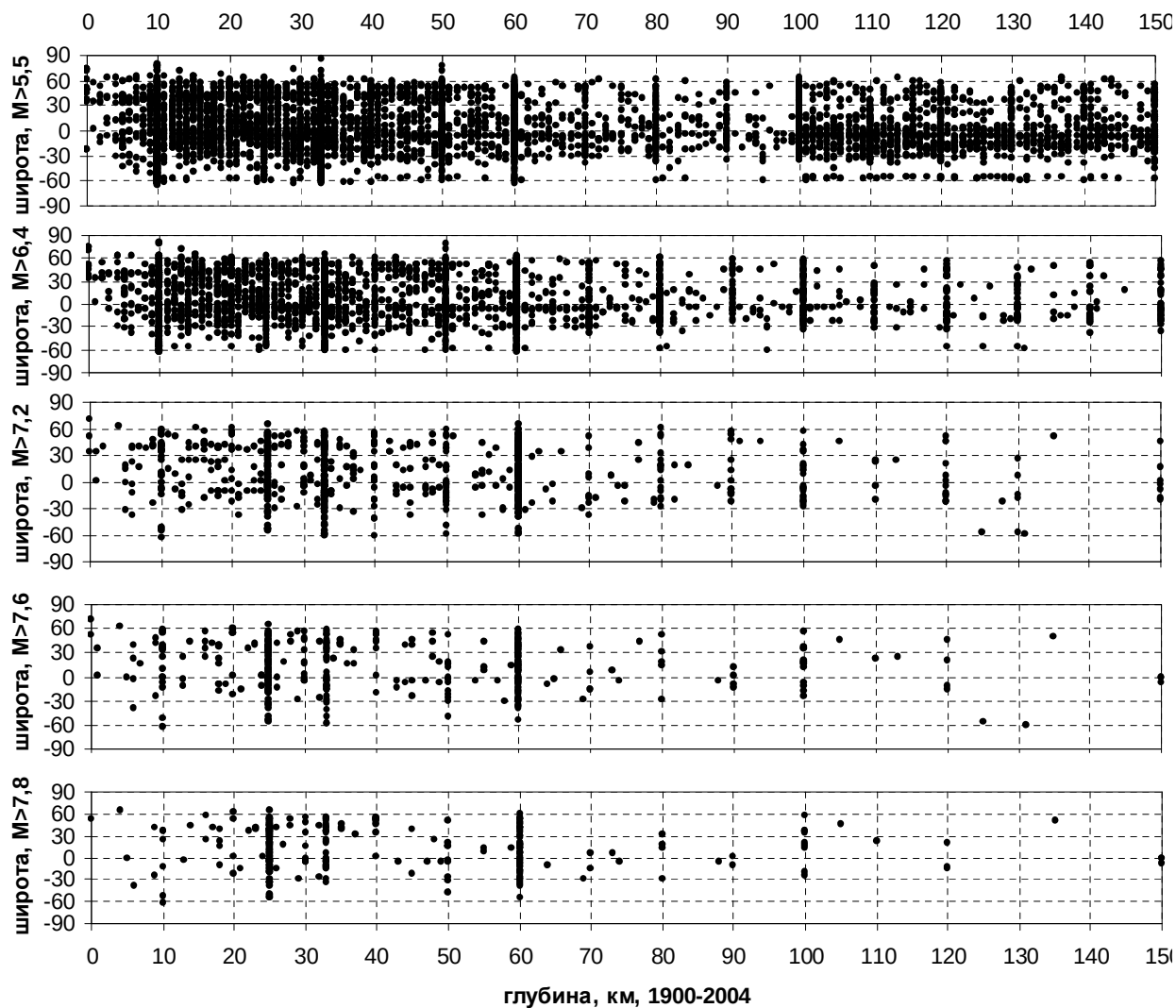


Рис.1

Из рис.1 также видно, что на этих же интервалах глубин шире диапазон географических координат землетрясений. При этом, например, для землетрясений с $M > 7,6$ выделяются глубины 10, 25, 33, 60 км., т.е. на этих глубинах наблюдается наибольшее количество землетрясений; на этих же глубинах аналогичные особенности наблюдаются и для землетрясений с меньшими магнитудами, но число их в этом случае гораздо больше.

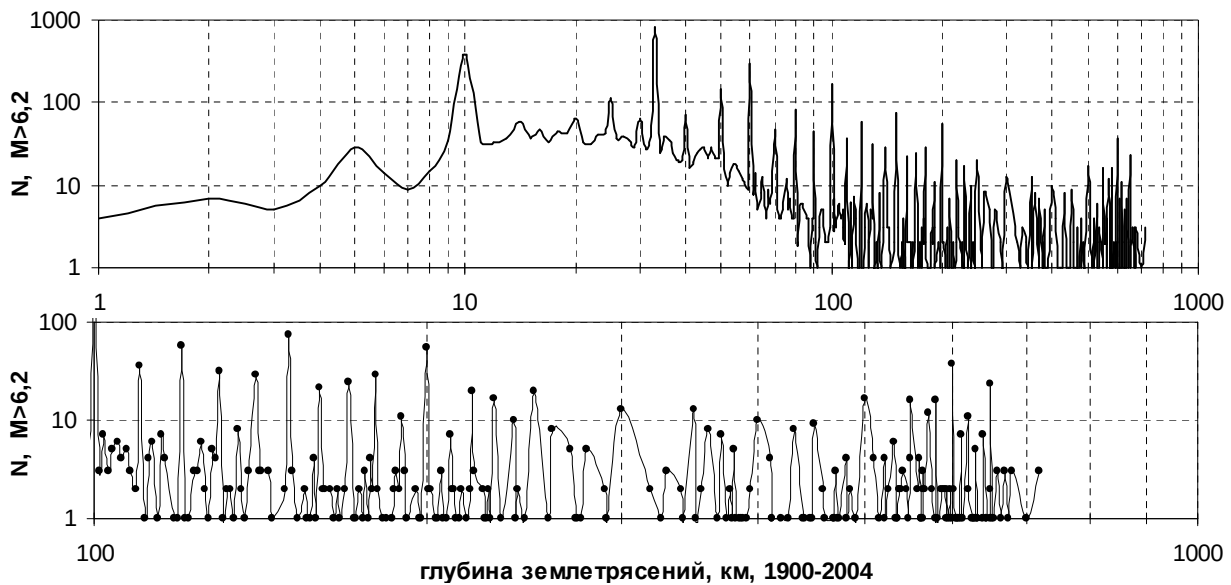


Рис.2

На рис.2 показана зависимость числа землетрясений с магнитудами $M > 6,2$ от глубины эпицентров землетрясений.

Кривая построена для глубин с шагом 1 км. Из рис. видно, что наибольшее количество землетрясений происходит на глубинах в несколько десятков км. Видно также, что на фоне непрерывного изменения числа землетрясений в зависимости от глубины число землетрясений резко возрастает на определенных глубинах, т.е. наблюдаются дискретные уровни значений землетрясений. Чаще всего землетрясения происходят на глубинах 10, 33, 40 и далее через 10 км вплоть до глубин 250 км. Из вышесказанного можно сделать вывод, что существует дискретность уровней земного вещества, которая сказывается на распределении числа, широт и долгот землетрясений в зависимости от глубины их эпицентров.

Рассмотрим динамику распределения землетрясений во времени в зависимости от глубины их эпицентров. Как уже отмечалось, период с 1890 по 1990 г. оказался вековым циклом сейсмической активности, который разбивается на 3 периода примерно по 33 года, в каждом из которых в свою очередь можно выделить три 11-летних цикла солнечной активности.

На рис.3А показаны временные вариации глубин эпицентров землетрясений за период 1900-2004 г. Данные усреднялись за 1 год. Видно, что в период 1900-1959 г. землетрясения происходили чаще всего на глубине от 100 км и выше. Затем, начиная примерно с 1960 г., глубина эпицентров уменьшалась и с начала 90-х годов XX столетия вновь стала увеличиваться. Увеличение глубины эпицентров землетрясений с начала 90-х годов XX столетия связано с наступлением нового векового цикла.

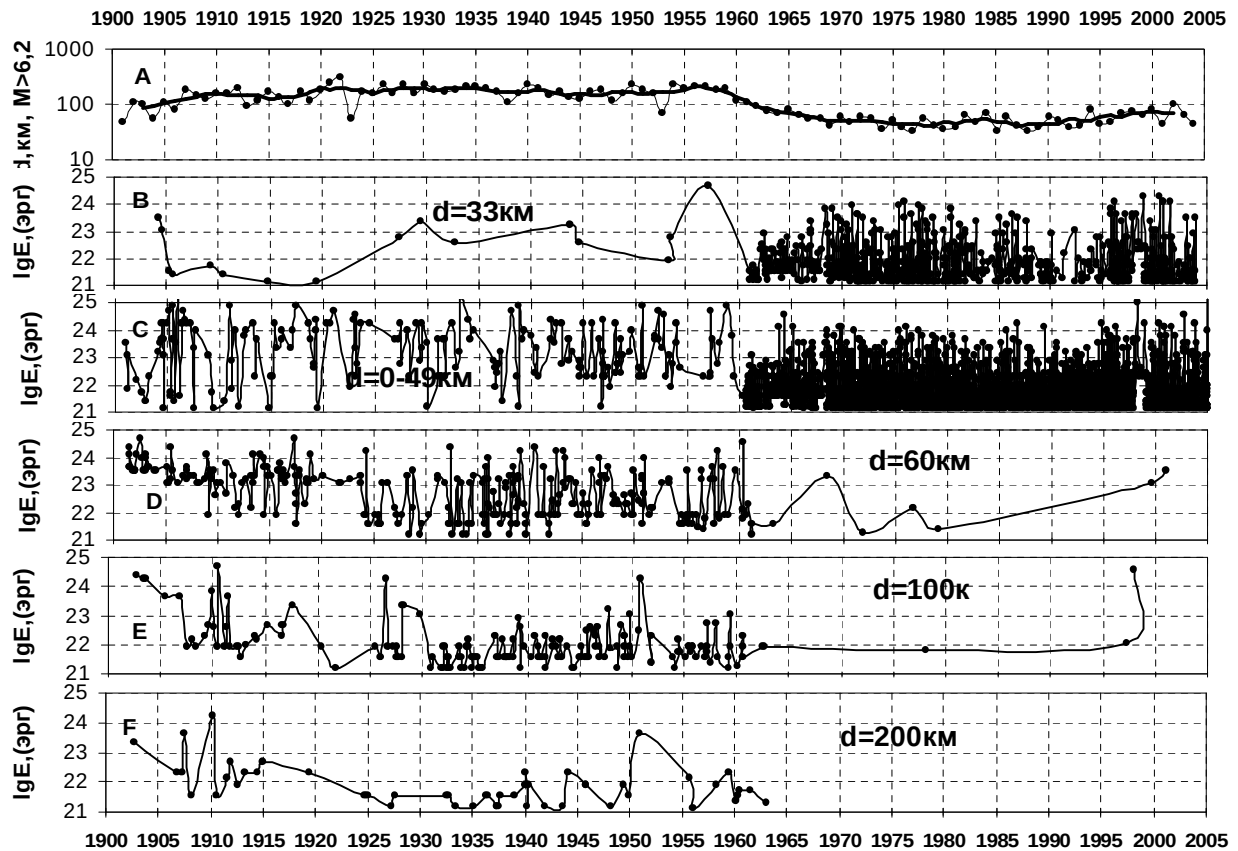


Рис.3

На рис. 3 показаны также временные вариации энергии всех землетрясений, которые наблюдались на отдельных глубинах, как на дискретных уровнях, так и между ними. Видно, что на меньших глубинах, до 50 км, землетрясения происходили в основном начиная с 1960г., т. е в 3-м периоде векового цикла, когда глубина эпицентров землетрясений уменьшалась.

До 1960г. землетрясения происходили в основном в выделенных слоях, т. е. на дискретных уровнях, на глубинах от 60 км и выше. На рис. 3 показаны некоторые примеры такого распределения землетрясений.

Все описанное выше можно объяснить следующим образом.

Структура геофизической среды [1-4] по сейсмологическим данным состоит из отдельных блоков, элементов, размеры которых составляют от нескольких до сотен километров. Такая структура непостоянна, она динамична. Сейсмическая активность на границах блоков и внутри их неодинакова. Наиболее активны границы этих блоков. Можно отметить динамику активности этих блоков на протяжении векового цикла. В начале векового цикла наиболее активны границы блоков на глубине от 60 км и выше. Постепенно происходит перераспределение энергии как внутри блоков, так и передача энергии в верхние слои земного вещества, которые активизируются в 3-й 33-летний период векового цикла. Таким образом, существуют выделенные слои земного вещества, которые имеют повышенную сейсмическую активность.

Связь сейсмической активности Земли с процессами в межпланетной среде

Рассмотрим взаимосвязь процессов в межпланетном пространстве с сейсмичностью Земли.

На рис.4 А показана зависимость числа землетрясений с магнитудами $M > 5,5$ от их долгот. Здесь же показана зависимость числа значений вектора межпланетного

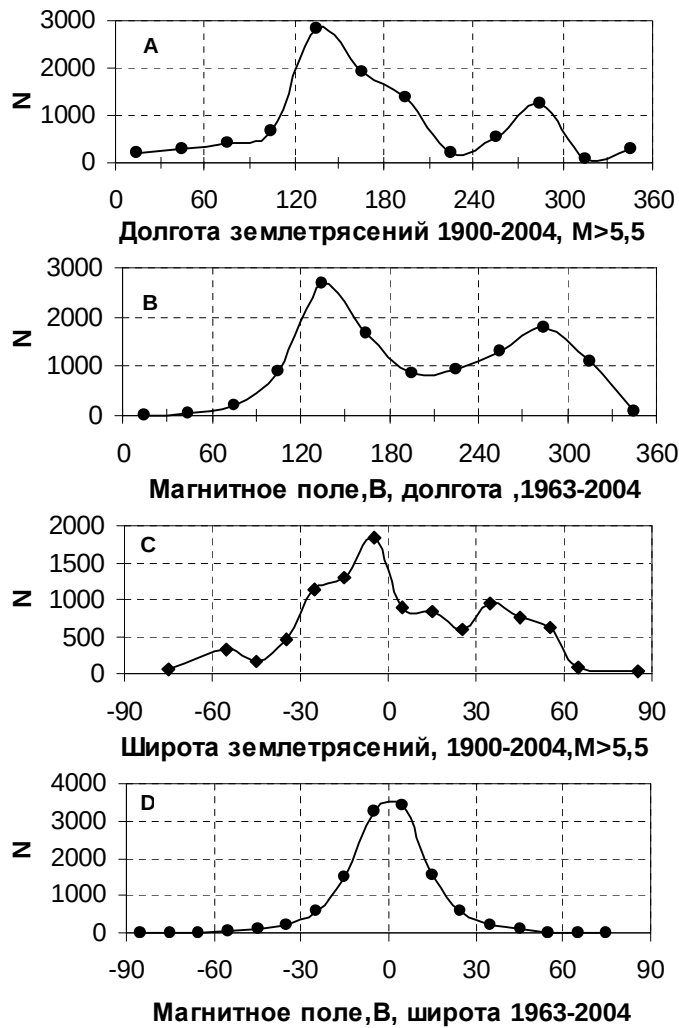


Рис.4

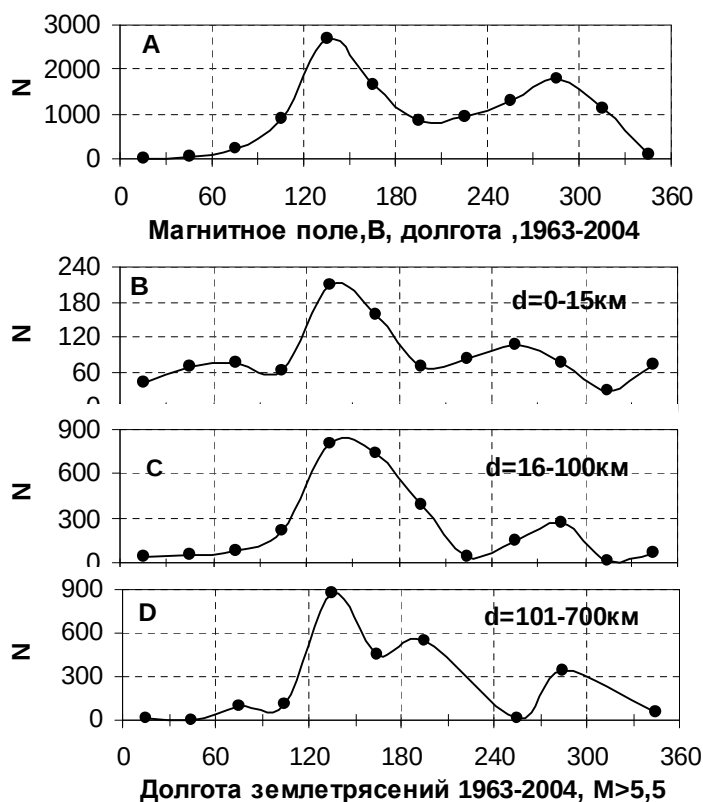


Рис.5

магнитного поля в солнечно – эклиптической системе координат от азимутального направления угла $B\varphi$ (изменение угла от 0 до 360° в плоскости эклиптике) (рис.4В) с шагом 30° [8].

Видно, что между этими кривыми имеется большое сходство, они подобны. Каждая из них имеет два максимума. Первый, наибольший, наблюдается при долготе 135° , второй – при долготе 285° . На рис. 4С показана зависимость числа землетрясений с магнитудами $M > 5,5$ от их широт. Здесь же показана зависимость числа значений широтного направления вектора межпланетного магнитного поля в солнечно – эклиптической системе координат от угла $B\theta$ (изменение угла от -90 до 90° в плоскости эклиптике) (рис. 4Д) с шагом 10° . Видно, что обе кривые имеют максимум при широте примерно 0° . Кривая зависимости числа землетрясений от широты имеет второй максимум при широте 35° . Аналогичный максимум на кривой числа значений широтного направления вектора межпланетного магнитного поля не наблюдается.

Рассмотрим взаимосвязь процессов в межпланетном пространстве с сейсмичностью Земли более подробно. На рис.5. показана зависимость числа значений вектора межпланетного магнитного поля B от угла $B\varphi$ (долгота поля), рис5А, и зависимость числа землетрясений от их долгот для различных глубин (0-15, 16-100, 101-700км), рис5В-рис5Д.

Видно, что характер распределения числа землетрясений от долготы для указанных глубин совпадает с аналогичным распределением для межпланетного поля.

На рис. 6 показана зависимость числа значений вектора межпланетного магнитного поля B

от угла $B\theta$ (широтного направления межпланетного магнитного поля) и числа землетрясений от их широт, происходящих на глубинах (0-15, 16-100, 101-700км), рис.6B-рис.6 D. Из рис. видно, что сходство между кривыми, отражающими эти зависимости,

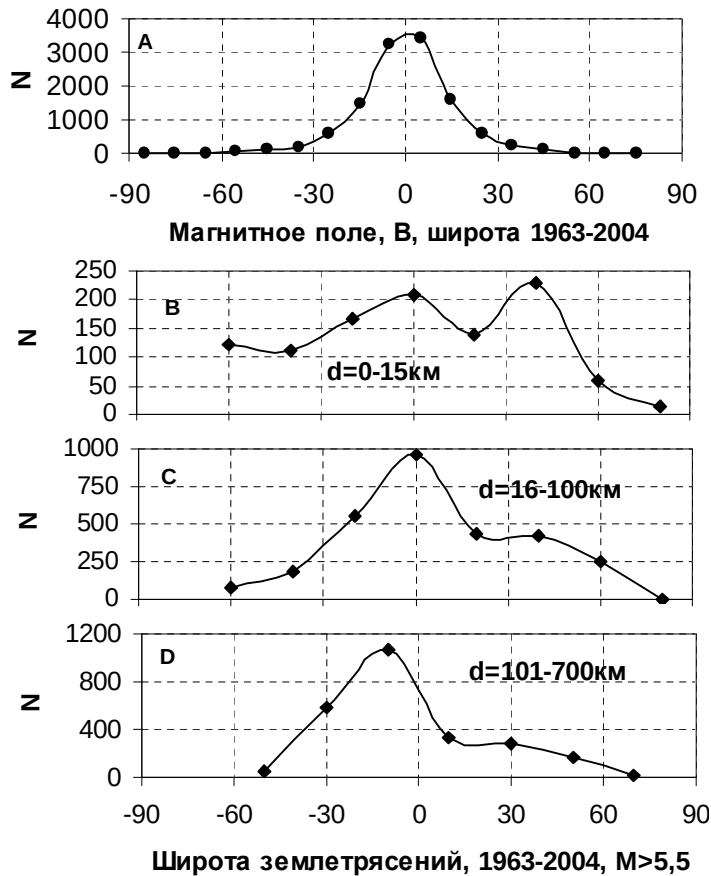


Рис.6

Выводы

1. Существует дискретность уровней геофизической среды, которая сказывается на распределении числа, широт и долгот землетрясений в зависимости от глубины их эпицентров. Наиболее характерные размеры блоков 10км вплоть до глубины 250 км. Глубже их размеры увеличиваются.

2. В пределах векового цикла происходит постепенная передача накопленной энергии из более глубоких слоев земного вещества в верхние слои, которые активизируются в 3-й 33-летний период векового цикла. Наиболее характерные размеры блоков 10 км вплоть до глубины 250 км. Глубже их размеры увеличиваются.

3. Существует высокая корреляция сейсмической активности с процессами в межпланетной среде, которые определяются солнечной активностью. Наиболее заметна она для землетрясений, происходящих на глубинах более 10-15 км. Механизмы генерации землетрясений, происходящие на глубинах менее 10-15 км, определяются другими процессами.

Список литературы

1. Дискретные свойства геофизической среды. – М.: Наука. 1989. –173 с.
2. Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмологии. // Проблемы нелинейной сейсмологии. – М.: Наука, 1987. С. 5-19.
3. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. О свойствах дискретности горных пород. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1982, №12. С.3.
4. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 100 с.

выполняются для землетрясений, происходящих на глубинах 16-100км, для землетрясений, происходящих на глубинах более 100км это сходство частичное. Между кривыми, отражающими зависимость числа значений вектора межпланетного магнитного поля B от угла $B\theta$, и зависимость числа землетрясений от их широт, происходящих на глубинах 0-15 км, подобие отсутствует. Отсюда можно сделать вывод: высокая корреляция сейсмической активности с процессами в межпланетной среде, которые определяются солнечной активностью, имеет место для землетрясений, происходящих на глубинах более 10-15 км. Механизмы генерации землетрясений, происходящие на глубинах менее 10-15 км, определяются другими процессами.

5. Шестопалов И.П., Харин Е. П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений, III Междунар. конф. с. Паратунка Камч. обл. 16-21 августа 2004, сб. докл. - Петропавловск – Камч.: ИКИР ДВО РАН, 2004. С. 130-141.
6. Шестопалов И.П., Харин Е. П. Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности различной длительности // Геофизический журнал. 2006. Т. 28, №4. С.59-70
7. <http://neic/usgs.usgs.uk>
8. <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С МАГНИТУДОЙ $M \geq 7.6$ И ОЦЕНКА ЕЁ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ ЗЕМЛИ

APPROACH TO FORECASTING $M \geq 7.6$ STRONG EARTHQUAKES AND ITS EFFECTIVENESS IN DIFFERENT REGIONS OF THE EARTH

В.А. Широков¹, Ю.К. Серафимова²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,*

²*Камчатский филиал Геофизической службы РАН*

Studying phase distribution (F_1) of lunar tide with a period of $T_1=18.6$ yr. and that for the Hale solar cycle (F_2) at $T_2 = 22$ yr. for 1737 – 2007 earthquakes we suggest a new approach to a long-period forecasting for the strongest earthquakes occurring in different regions of the Earth. Two-dimensional phase plane (F_1, F_2) revealed statistically significant seismically unsafe windows and a short critical phase interval of about one and a half year in the Hale cycle epoch of minimum.

Based on this approach we present the long-term forecast to the $M \geq M_0$ earthquakes in the next 20 years for various regions of the Earth. Retrospective data showed that 89% of the analyzed number of earthquakes agrees with the forecast. As an example, we show seismically unsafe intervals for the earthquakes at focal depth up to 100 km: Japan ($M_0=7.9$): X.2007 – III.2010; VII.2024 – X.2028; the Kurile Islands ($M_0=7.6$): V.2012 – V.2015; Kamchatka ($M_0=7.6$): XI.2014 – VII.2017 yrs.

In the given unsafe interval (2006) for the Pacific seismic belt, the Hale cycle from X.2006 through I.2008 yrs. suggested up to six $M \geq 7.6$ strong earthquakes. In complete agreement with the forecast, there were three $M = 8.1 - 8.3$ earthquakes that occurred in Kuriles in November 2006, and in Kuriles and Solomon Islands in January and April 2007.

Effectiveness I of the long-term forecasts made on retrospective data exceeds from 2 to 5.9 times (Aleutian Islands and Kamchatka, respectively) the effectiveness of the random earthquake forecasting ($I_0=1$).

Исследования последних десятилетий показывают, что изучение геодинамических процессов и выяснение их причинной обусловленности невозможно без учета роли космических факторов, главными из которых для характерного времени, менее нескольких десятилетий, являются гравитационные поля в системе Солнце–Земля–Луна, а также солнечная активность. Предположение о том, что тектонические процессы вызваны, в конечном счете, космическими причинами, неоднократно высказывали геологи и геофизики. Наиболее хорошо изучено влияние на сейсмичность приливного воздействия гравитационных полей Луны и Солнца и 11-летней солнечной ритмики. Однако связь землетрясений с 22-летним солнечным циклом исследовалась лишь в одной работе [1]. В обзорной работе [8], посвященной выяснению роли космических факторов в геотектонике, делается вывод, что тектонические процессы представляют собой результат действия двух более или менее равноценных факторов – внутренней эволюции Земли и космических воздействий. В работе [14] на основе литературного обзора сделана попытка в схематическом виде синтезировать представления многочисленных исследователей о механизме связи между различными космическими факторами, сейсмическими и вулканическими процессами с учетом промежуточных звеньев этой взаимосвязи.

Известно, что спектры космических факторов представлены широким набором строго периодических и квазипериодических компонент. С точки зрения долгосрочного прогноза времени возникновения сильных землетрясений и извержений вулканов представляет интерес изучение участков спектра в интервале периодов от года до нескольких десятков лет. Этому интервалу соответствуют 11-летняя, 22-летняя и 80-90-летняя периодичности солнечной активности [4]. Не менее известен и лунный прилив с периодом $T=18.613$ г., связанный с долгопериодическим вращением узлов лунной орбиты. Выявление статистически значимых фазовых интервалов для наиболее сильных землетрясений при наличии достаточно длительных рядов наблюдений дает возможность осуществлять их долгосрочный прогноз [3, 6, 9-13, 15, 16 и др.]. Новизна настоящей работы связана, во-первых, с тем, что впервые для временных рядов длительностью более ста лет исследуется связь сильных землетрясений с 22-летним солнечным циклом, во-вторых, на основе разработанной методики проведен совместный анализ связи землетрясений различных регионов Земли с 19-летним лунным и 22-летним Хэйловским циклом смены полярности ведущих групп солнечных пятен. Основная цель исследования состоит в составлении долгосрочного прогноза наиболее сильных землетрясений и оценке его эффективности для различных регионов Тихоокеанского сейсмического пояса.

Исходные данные и используемые параметры

В работе исследуется зависимость распределения моментов возникновения наиболее сильных землетрясений в семи регионах Тихоокеанского сейсмического пояса от фазы двух долгопериодических циклов: приливного лунного с периодом $T_1=18.613$ года и солнечного Хэйловского со средним за последние три века значением периода $T_2=21.8$ года. Длительность лунного цикла T_1 в современную эпоху практически не меняется. При расчете фазы лунного цикла условно принято, что ее нулевые значения

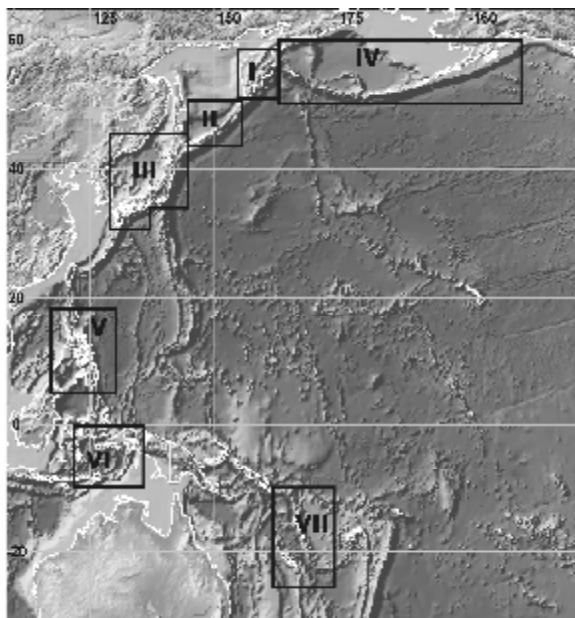


Рис.1. Схема расположения исследуемых регионов Тихоокеанского сейсмического пояса: I – Камчатка, II – Курильские острова, III – Япония, IV – Алеутские острова, V – Филиппинские острова, VI – о. Новая Гвинея, VII – о-ва Новые Гебриды.

соответствуют эпохам максимального склонения Луны [14]. В отличие от лунного цикла, длительность так называемого 22-летнего солнечного Хэйловского цикла нерегулярно меняется в довольно широких пределах. Первые предположения о существовании 22-летнего цикла солнечных пятен были сделаны в конце 19-го века Вольфом, но лишь после открытия в 1913 г. Хэйлом закона изменения полярности магнитных характеристик Солнца, реальность выделения этого цикла получила надежное физическое обоснование [4].

Длительность Хэйловских циклов характеризуется большей устойчивостью, если за их начало брать фазы минимумов четных 11-летних циклов [4], что нами и сделано при дальнейших расчетах. Эпохи минимумов циклов Хэйла взяты по данным (http://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/). Для удобства дальнейшей работы Хэйловским циклам нами присвоены порядковые номера №№ 1, 2, 3, 4, ..., 14, начиная с цикла, начавшегося в эпоху 1723.5 г. Очередная эпоха минимума

14-го цикла Хэйла должна предположительно наступить во втором полугодии 2007 г. (http://sidc.oma.be/html/sidc_graphics.html).

Приведем данные об использовавшихся каталогах землетрясений для семи регионов Тихоокеанского сейсмического пояса: Камчатка, Курильские острова, Япония, Алеутские острова, Филиппинские острова, о. Новая Гвинея и о-ва Новые Гебриды. Для всех регионов, кроме Камчатки, выборка землетрясений проводилась из каталога Significant Worldwide Earthquakes (NOAA), который содержит события с 2150 г. до н.э. по 1994 г. Выборки дополнялись событиями из каталога USGS/NEIC (PDE), включающего события с 1973 г. по настоящее время (http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html). Предполагается, что за последние 130 лет каталог является достаточно представительным для всех регионов для событий с магнитудой $M \geq 7.5$. Регионы представлены на рис.1.

Для камчатского региона за основу взят каталог сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд с 1737 года по данным [5, 7]. Каталог включает 25 событий [17]. Для всех семи регионов общее число анализировавшихся землетрясений равно 175.

Методика анализа данных и результаты

Для выявления связи землетрясений с космическими факторами в [17] предложена

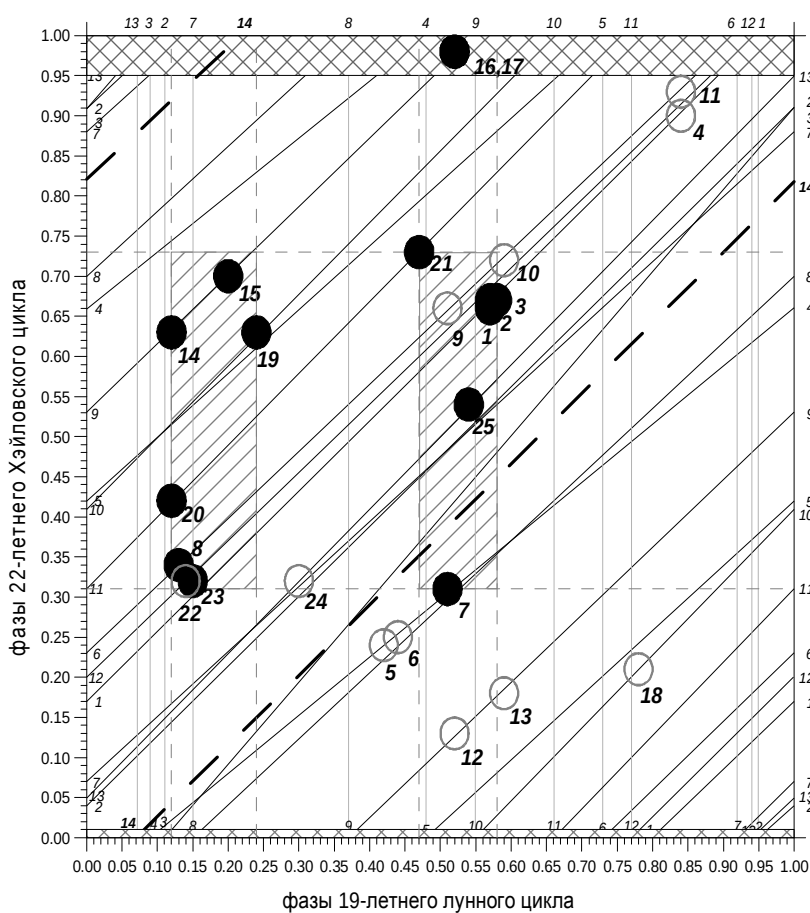


Рис.2. Распределение камчатских землетрясений в зависимости от фаз лунного и Хэйловского циклов за период 1737-2007 г.г. Светлые кружки соответствуют землетрясениям с $M = 7.5$, черные кружки – событиям с $M \geq 7.6$. Наклонными линиями показаны фазовые траектории, номера которых идентичны номерам Хэйловских циклов. Жирной пунктирной линией показан гипотетический Хэйловский цикл № 14. Для событий с $M \geq 7.6$ одинарной штриховкой выделены "опасные фазовые окна", соответствующие региональному сейсмическому отклику, двойной штриховкой выделен "опасный" фазовый интервал, соответствующий планетарному сейсмическому отклику. Пояснения в тексте.

методика, основанная на следующем. Во-первых, для каждого землетрясения рассчитываются значения фазы Φ_1 лунного прилива T_1 и фазы Φ_2 Хэйловского цикла T_2 . Во-вторых, на двумерной фазовой плоскости (Φ_1 , Φ_2) строятся фазовые траектории, с целью привязки к ним сейсмических событий, обозначенных нами в виде кружков (рис. 2, 3). В-третьих, исследуются особенности двумерного распределения моментов возникновения землетрясений на фазовой плоскости (Φ_1 , Φ_2). Охарактеризуем методический подход на примере Камчатки.

Распределение 25 землетрясений Камчатки на фазовой плоскости (Φ_1 , Φ_2) приведено на рис. 2. Здесь же в виде прямых линий проведены фазовые траектории, номера которых соответствуют номерам 22-летних циклов. Каждая траектория начинается с нулевой фазы цикла Хэйла и заканчивается нулевой фазой следующего по времени цикла. За 280 предыдущих лет фазовая плоскость заполнена траекториями

почти равномерно. В этом случае можно предположить, что при случайном возникновении землетрясений они распределяются на фазовой плоскости достаточно равномерно. Далее анализ распределения на фазовой плоскости (Φ_1 , Φ_2) проводится по "методу фазовых траекторий" (МФТ), более полно описанному в [17].

Как было показано ранее [6, 15, 18], наиболее сильные камчатские землетрясения с $M \geq 7.6$, эпицентры которых расположены южнее 57.0° с.ш., приурочены к двум узким интервалам фаз лунного прилива 18.613 г. с длительностью фазовых интервалов около двух лет. Это отчетливо видно на рис. 2, где все 14 событий с $M \geq 7.6$, обозначенные черными кружками, произошли в двух фазовых окнах ($\Phi_1 = 0.12-0.24$ и $\Phi_1 = 0.47-0.58$) длительностью 2.23 и 2.05 года. Гипотеза о равномерности распределения землетрясений в пределах лунного цикла по биномиальному критерию отвергается с уровнем доверия более 0.99 [2]. Землетрясения с $M = 7.5$, обозначенные светлыми кружками, этой статистически значимой закономерности не подчиняются. С уровнем доверия более 0.95 отвергается также гипотеза о равномерном распределении событий с $M \geq 7.6$ по фазам Хэйловского цикла. 12 землетрясений из 14 приурочены к интервалу фаз $\Phi_2 = 0.31-0.73$.

Распределение событий с $M \geq 7.6$ на фазовой плоскости является неравномерным (рис.2). Выделяются две области пересечения одной активной фазы Хэйловского цикла с двумя активными фазами лунного цикла. Эти два "опасных окна" заштрихованы. Гипотеза о равномерном распределении событий с $M \geq 7.6$ на фазовой плоскости отвергается с уровнем доверия более 0.99. Таким образом, для камчатских землетрясений с $M \geq 7.6$ за почти 300 лет наблюдений сейсмический отклик на изменения фаз двух космических ритмов оказался в определенном смысле детерминированным. Расчёты показывают, что в "опасных окнах" вероятность возникновения землетрясений на 2 порядка выше, чем вне этих окон.

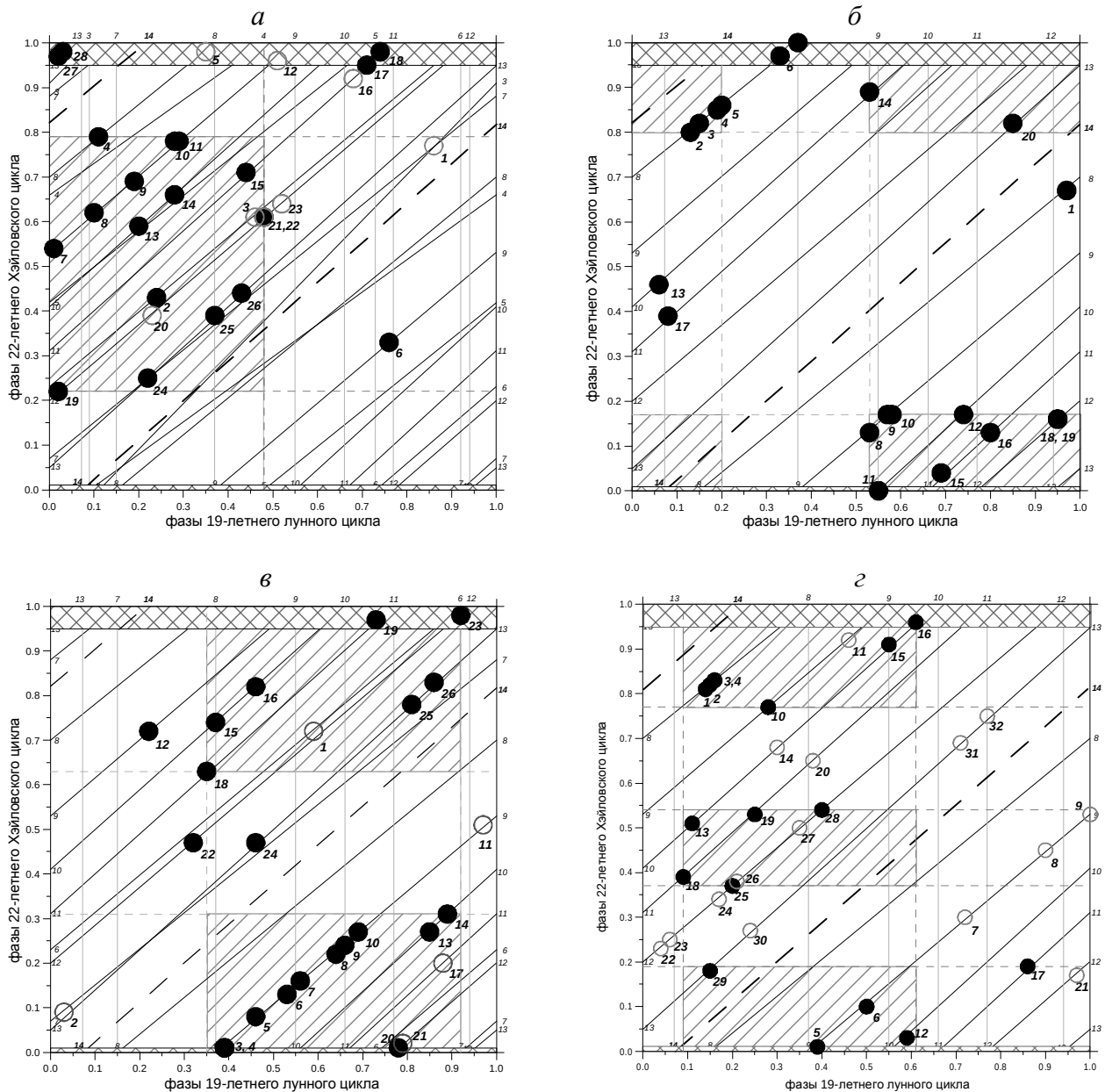
Об "опасной" фазе цикла Хэйла для Тихоокеанского сейсмического пояса

При анализе всей совокупности данных для исследуемых регионов Тихоокеанского сейсмического пояса обнаружено, что в окрестности минимумов 22-летних циклов в фазовом окне $\Phi_2 = 0.90-1.0-0.10$, симметричном относительно эпох минимумов, с уровнем доверия более 0.95 выделяется статистически значимый фазовый интервал $\Phi_2 = 0.95-0.01$ длительностью в среднем 16 месяцев. В этом узком "опасном" интервале, занимающем около 33% общей площади рассматриваемого фазового окна, отмечено 24 "главных" землетрясений из 33. К "главным" событиям будем относить землетрясения соответствующих магнитуд, по которым выделяются "опасные окна". Эффективность прогноза землетрясений для выделенного Хэйловского интервала составляет $I = (24/33)/0.33 = 2.2$.

В работе [17] сделан вывод, что выявленный эффект имеет планетарную природу, поэтому в указанном интервале значимо повышена вероятность возникновения землетрясений $M \geq 7.6$ в Тихоокеанском сейсмическом поясе. Если принять, что эпоха минимума следующего цикла начнется в середине второго полугодия 2007 г. (http://sidc.oma.be/html/sidc_graphics.html), то в интервале октябрь 2006–январь 2008 гг. в Тихоокеанском поясе можно было ожидать 2-6 землетрясений с $M \geq 7.6$. В соответствии со сделанной в 2006 г. оценкой [17], произошли землетрясения с $M=8.1 - 8.3$ в ноябре 2006 и январе 2007 г.г. на Курильских островах и в апреле 2007 г. на Соломоновых островах.

Рассчитаем эффективность I предложенной методики прогноза для каждого из семи регионов по ретроспективным данным. Величина I равна отношению доли ($D_{\text{прог}}$) соответствующих прогнозу "главных" землетрясений ($N_{\text{прог}}$) от их общего количества N к доле ($S_{\text{опас}}$) площади "опасных" окон и "опасных" фазовых интервалов в цикле Хэйла относительно принятой за единицу общей площади фазового квадрата (Φ_1 , Φ_2). Исходные данные для оценок I приведены в таблице 1. Согласно расчетам, величина $D_{\text{прог}}$ меняется от 78% (о-ва Новые Гебриды) до 100% (Камчатка). Величина $I = D_{\text{прог}}/S_{\text{опас}}$ меняется от 2.0 (Алеутские о-ва) до 5.9 (Камчатка).

На основе рис. 2 и 3 достаточно просто диагностируются интервалы времени, соответствующие трассам прохождения фазовых траекторий через "опасные" окна и фазовые интервалы. Если принять, что эпоха минимума следующего цикла начнется в середине второго полугодия 2007 г., а длительность цикла Хэйла №14 составит ~21 год (среднее значение за последние 100 лет), можно рассчитать временные интервалы, в которых ожидаются "главные" землетрясения для каждого региона. Возможные ошибки определения границ "опасных" интервалов времени в 80% случаев не превысят шесть месяцев. Долгосрочный прогноз времени возникновения "главных" землетрясений в каждом из регионов на период 2007- 2027 г.г. представлен в таблице 2. После того, как станет известно реальное время эпохи минимума Хэйловского цикла № 14, прогностические оценки должны быть скорректированы. На основании данных таблицы 2 следует, что в ближайшие 20 лет в рассматриваемых регионах длительность "опасных" интервалов в различных регионах меняется от 3.6 лет для Камчатки до 8.8 лет для Филиппинских островов.



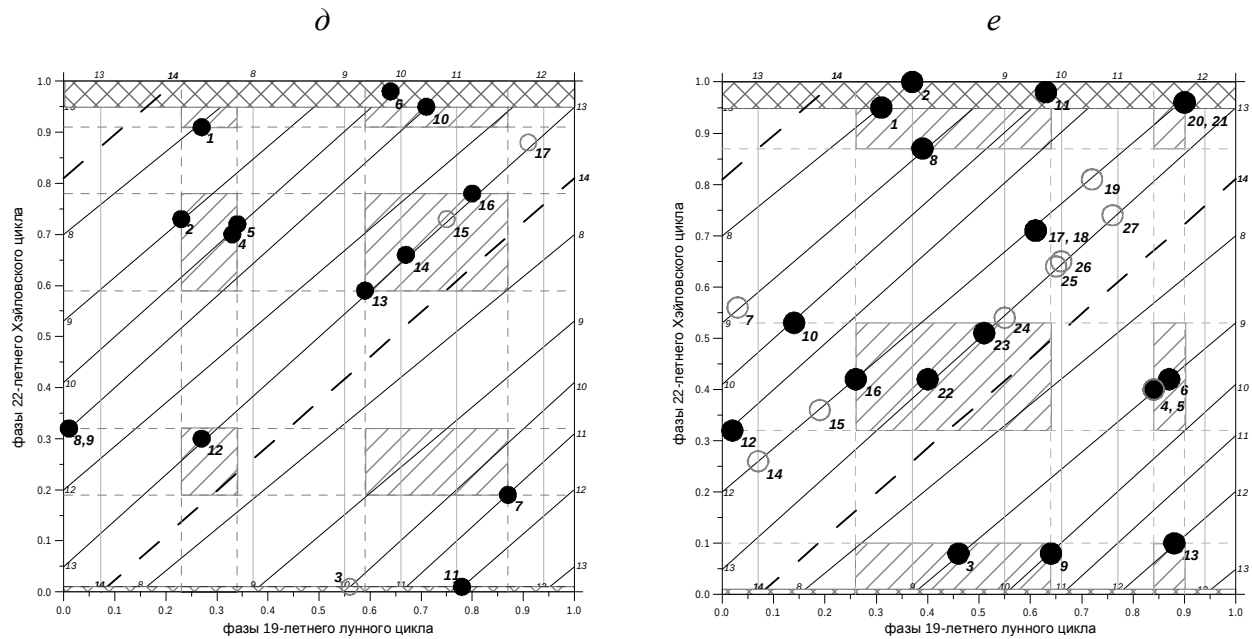


Рис.3. Распределение сейсмических событий в зависимости от фаз лунного и Хэйловского циклов: а) для Алеутских островов за период 1849 - 2006 гг.; б) для Курильских островов за период 1780 – 2007 гг.; в) для Японии за период 1894 - 2006 гг.; г) для Филиппинских островов за период 1897-2002 гг.; д) для о. Новая Гвинея за период 1899-2004 гг.; е) для о-вов Новые Гебриды за период 1900-2002 гг. Светлые кружки - события с $M = 7.5$, темные кружки – события с $M \geq 7.6$ (для Японии $M \geq 7.9$, для Филиппин $M \geq 7.8$). Наклонными линиями показаны фазовые траектории, номера которых идентичны номерам Хэйловских циклов. Жирной пунктирной линией показан гипотетический Хэйловский цикл № 14. Для событий с $M \geq 7.6$ одинарной штриховкой выделены "опасные фазовые окна", соответствующие региональному сейсмическому отклику, двойной штриховкой выделен "опасный" фазовый интервал, соответствующий планетарному сейсмическому отклику. Пояснения в тексте.

Таблица 1. Оценка эффективности I прогноза землетрясений по "методу фазовых траекторий" для семи регионов Тихоокеанского сейсмического пояса

Регион	Характеристика выборки землетрясений		Число землетрясений, N	Число спрогнозированных землетрясений, N_1	Площадь "опасных" окон и фазовых интервалов, $S_{\text{опас}}$	Эффективность прогноза, $I=(N_1/N)/S_{\text{опас}}$
	Магнитуда	Период наблюдений, годы				
Камчатка	$M_W \geq 7.6$	1737-2006	14	14	0.17	5.9
Курильские острова	$M \geq 7.6$	1780-2006	20	19	0.35	2.7
Япония	$M \geq 7.9$	1894-2006	20	17	0.28	3.0
Алеутские острова	$M \geq 7.6$	1849-2006	21	18	0.43	2.0
Филиппинские острова	$M \geq 7.8$	1897-2002	17	16	0.35	2.7
о. Новая Гвинея	$M \geq 7.6$	1899-2004	14	12	0.22	3.9
о-ва Новые Гебриды	$M \geq 7.6$	1900-2002	18	14	0.25	3.1

Таблица 2. Долгосрочный прогноз времени и магнитуды землетрясений для семи регионов Тихоокеанского сейсмического пояса на ближайшие 20 лет (01.2007 – 12.2026 г.г.)

Регион	Параметры прогноза		
	Магнитуда	Глубина, км	Временной интервал
Камчатка, Япония, Алеутские, Курильские и Филиппинские острова, о. Новая Гвинея, о-ва Новые Гебриды	$M \geq 7.6$ (Япония - $M \geq 7.9$), (Филиппины - $M \geq 7.8$)	0-100	I.2007 – I.2008
Камчатка	$M_w \geq 7.6$	0-100	XI.2014 – VII.2017
Курильские острова	$M \geq 7.6$	0-100	V.2012 – V.2015
Япония	$M \geq 7.9$	0-100	X.2007 – III.2010; VII.2024 – X.2028
Алеутские острова	$M \geq 7.6$	0-100	XII.2012 – IV.2014; XII.2020 – VII.2023
Филиппинские острова	$M \geq 7.8$	0-100	II.2008 – VIII.2011; VII.2015 – X.2017; IX.2026 – X.2028
о. Новая Гвинея	$M \geq 7.6$	0-100	VIII.2011 – X.2012; III.2020 – VIII.2022
о-ва Новые Гебриды	$M \geq 7.6$	0-100	VI.2014 – V.2018

Примечание. В период XII.2006 – I.2008 гг. ожидается от двух до шести землетрясений. На Камчатке вероятность возникновения землетрясений в этот период практически равна нулю.

Прогноз составлен в предположении, что эпоха минимума очередного цикла Хэйла № 14 соответствует середине второй половины 2007 г. Если эта оценка изменится, прогноз будет скорректирован.

Выводы

Разработана методика долгосрочного прогноза землетрясений, основанная на совместном анализе влияния на сейсмичность 22-летних солнечных циклов Хэйла и лунного прилива с периодом 18.613 г. по данным наблюдений за 1737 – 2006 г.г.

Для семи регионов Тихоокеанского сейсмического пояса дан прогноз сильных землетрясений с $M \geq 7.6$ на период 2007-2016 г.г., и сделаны оценки его эффективности по ретроспективным данным.

Работа выполнена в рамках гранта ДВО РАН 06 III А–08–336.

Список литературы

1. Барляева Т.В., Морозова А.Л., Пудовкин М.И. Влияние космических факторов на развитие землетрясений // Геофизические методы исследований Земли и недр. Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов "Геофизика-99", Санкт-Петербург, 9-12 ноября 1999 г. М. 2000. С. 8-19.
2. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 464 с.
3. Бузевич А.В. Солнечная активность и сейсмичность на Камчатке // Сборник докладов III международной конференции "Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений", с. Паратунка, 16-21 августа 2004 г. (<http://www.kcs.iks.ru/ikir>).
4. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. – Л.: 1973. – 257 с.
5. Гусев А.А. Схема очаговых зон сильных землетрясений Камчатки за инструментальный период // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 2004. С. 75-80.
6. Гусев А.А., Петухин А.Г. О возможной синхронизации сильных землетрясений лунным 18.6-летним циклом, его долями и кратными // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 64-79.

7. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34-42.
8. Кропоткин П.Н. Возможная роль космических факторов в геотектонике // Геотектоника. 1970. № 2. С. 30-76.
9. Ламакин В.В. О периодичности байкальских землетрясений // ДАН СССР. 1966. Т. 170. № 2. С. 210-213.
10. Серафимова Ю.К. О связи сильных ($M_w \geq 7.5$) землетрясений Камчатки с солнечной активностью // Геофизический мониторинг Камчатки. Материалы научно-технической конференции 17-18 января 2006 г., г. Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: "Оттиск", 2006. С. 171-177.
11. Сытинский А.Д. О зависимости глобальной и региональной сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла солнечной активности // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265. № 6. С. 1350-1353.
12. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13-30.
13. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1991. № 3. С. 110-112.
14. Широков В.А. Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западной части Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. – М.: Наука, 1977. С. 103-115.
15. Широков В.А. Влияние 19-летнего лунного прилива на возникновение больших камчатских извержений и землетрясений и их долгосрочный прогноз // Геологические и геофизические данные о Большом Трещинном Толбачинском извержении 1975-1976 гг. – М.: Наука, 1978. С. 164-170.
16. Широков В.А. Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996-2000 гг. с магнитудой $M = 6-7.8$ по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. – Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 95-116.
17. Широков В.А., Серафимова Ю.К. О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. №2. Вып. №8. С. 120-133.
18. Широков В.А., Широкова Н.В. О проблемах сейсмического риска и краткосрочного прогноза сильных землетрясений Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 2005. № 11. С. 44-55.

**СУТОЧНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВОЗМУЩЕНИЙ В СПОРАДИЧЕСКОМ СЛОЕ Es
ИОНОСФЕРЫ В СВЯЗИ С ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ ПО МАТЕРИАЛАМ
СТАНЦИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ «ПЕТРОПАВЛОВСК-
КАМЧАТСКИЙ» И «КОКУБУНЖИ» (ТОКИО)**

**DIURNAL DEPENDANCE OF PERTURBATIONS IN SPORADIC Es LAYER OF THE
IONOSPHERE IN CONNECTION WITH EARTHQUAKES ON THE DATA OF
“PETROPAVLOVSK-KAMCHATSKIY” AND “KOKUBUNJI” (TOKYO) VERTICAL
SOUNDING STATIONS**

*Е.В. Липеровская¹, В.В. Богданов², М.В. Родкин³, К.-В. Мейстер⁴,
Н.Э. Васильева¹, А.В. Олифиров⁵*

¹*Институт физики земли РАН,*

²*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,*

³*Геофизический Центр РАН,*

⁴*Астрофизический институт, Потсдам, Германия*

⁵*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Turbulization in the sporadic Es layer is analyzed in connection to earthquakes. The $foEs$ frequency does not characterize the maximal ionization density of the layer, as critical frequencies of regular layers, but characterizes small-scale (tens of meters) irregularities of plasma density in Es-layer. The maximal ionization density of Es-layer is proportional to $(fbEs)^2$, where $fbEs$ is the characteristic frequency of semi - transparency of Es-layer. The analysis shows that at sunset and sunrise hours three days before earthquakes the coefficient of semi - transparency $Q=(foEs-fbEs)/fbEs$, which characterizes small scale turbulization in E-region, increases. Analogous results are obtained using the data of «Petropavlovsk_Kamchatsky» and «Tokyo».vertical sounding stations

Es-spread occurrence, which characterizes large-scale (hundred of meters) turbulization in E-region, is analyzed using the 15-minutes data of «Petropavlovsk_Kamchatsky». The analysis shows that Es-spread occurrence increases in the pre-midnight hours three days before earthquakes.

Введение

К настоящему времени экспериментально установлено, что за несколько дней до землетрясений на разных высотах, и, соответственно, в разных областях ионосферы наблюдаются возмущения, которые можно связать с процессами подготовки землетрясений. Оказалось, что сейсмоионосферные возмущения с большей вероятностью возникают в определенное время суток. Для выявления механизмов сейсмоионосферной связи особенно важно комплексное исследование одновременных вариаций электромагнитных, ионосферных и других параметров. Среди ионосферных параметров, изучавшихся в связи с землетрясениями, есть регулярные, такие как $foF2$, foE , а есть параметры, характеризующие нерегулярные турбулентные процессы. К таким относятся, в частности, F - рассеяние, Es - рассеяние и так называемый коэффициент полупрозрачности спорадического слоя.

Несколько десятилетий тому назад исследование турбулентных эффектов в связи с процессами подготовки землетрясений считалось очень большой экзотикой, но в последние годы оказалось [6, 10, 12, 13], что ионосферная турбулентность изменяется в связи с процессами подготовки землетрясений. В этой работе мы обратимся к анализу турбулентности в Es-слое в первую очередь по данным станции вертикального зондирования (ВЗ) «Петропавловск–Камчатский», сравнивая эти результаты с результатами, полученными на станции «Токио».

Метод исследования

В настоящей работе были исследованы ионосферные эффекты землетрясений с использованием часовых данных станций вертикального зондирования «Кокубунжи» (Токио) ($\varphi=35.7^\circ$ с.ш., $\lambda=139.5^\circ$ в.д., 1957-1990 гг.), станции «Петропавловск-Камчатский»

($\varphi = 53.0^\circ$ с.ш., $\lambda = 158.7^\circ$ в.д., 1968-1995 гг.), представленных в Интернете <http://www.rl.ac.uk.wdcci/data.html> и 15 минутных данных станции «Петропавловск-Камчатский» за летние месяцы 2004 года.

Наиболее близка к земле E -область ионосферы, поэтому исследованиям эффектов подготовки в E -области было посвящено немало работ (2, 11, 16). В дневных условиях на высотах E -области ионосферы (от 90 до 130 км над поверхностью Земли) существуют как регулярный слой E , так и нерегулярные образования, называемые спорадическими слоями Es . В ночное время плотность ионизации регулярного слоя E , как правило, очень мала, след от него на ионограммах отсутствует, и доступны для изучения только спорадические слои Es .

Спорадические слои Es — это облака повышенной ионизации блинообразной формы, возникающие на высотах 90÷140 км, имеющие большие размеры по горизонтали и малые по вертикали, состоящие, как правило, из долгоживущих металлических ионов. Образование спорадических слоев обычно связывают с явлением ветрового сдвига (1, 18).). Согласно этой модели они образуются на таких высотах, где локальные зональные ветры меняют направление с западного на восточное. Заряженные частицы “сгоняются” по направлению к точке, в которой скорость ветра равна нулю, и в результате образуется Es -слой. Расплывание слоев происходит, в основном, благодаря амбиполярной диффузии, а также и турбулентной диффузии, если имеет место турбулизация ионосферной плазмы.

По порядку величины максимальная концентрация в Es -слоях достигает 10^5 - 10^6 см⁻³, при этом их горизонтальный размер варьирует от 100 до 200 км. Плотность ионизации в E -области составляет $N \leq 10^5$ см⁻³ днем и на два-три порядка меньше ночью.

Толщина слоев (то есть характерный размер области повышенной ионизации по вертикали) может изменяться от нескольких сотен метров до нескольких километров. Если спорадический слой состоит из долгоживущих металлических ионов, то время его расплывания при наличии только амбиполярной диффузии составляет десятки часов. За это время слой может сместиться по горизонтали за счет нейтральных ветров на несколько сотен километров. Одна из основных характерных частот, определяемых по ионограмме при вертикальном зондировании, — частота экранирования $fbEs$, как принято в настоящее время, соответствует максимальной плотности ионизации в спорадическом слое, $fbEs \sim (N_{max})^{1/2}$. Другой характерный параметр слоя, определяемый по ионограммам, — частота $foEs$, при которой слой перестает быть отражающим для обыкновенной волны. Как выяснилось, эта характерная частота достаточно сильно зависит от характеристик станции вертикального зондирования, от уровня поглощения радиоволн и от тонкой структуры электронной концентрации Es -слоя (пятна и острова ионизации, расслоения) [17], и определяется турбулентностью плазмы спорадического слоя [5]. Спорадические слои часто имеют тонкую структуру по горизонтали и вертикали. Мелкомасштабную турбулизацию можно характеризовать диапазоном полупрозрачности ($foEs$ - $fbEs$). В работе [4] отмечались случаи, когда за 2-5 минут $foEs$ менялось на 1-2 МГц. Для объяснения таких быстрых изменений в упомянутой работе было сделано предположение, что мелкомасштабная низкочастотная турбулизация вызывается акустическими импульсами, распространяющимися от поверхности Земли до высот ионосферы.

На рис. 1 представлен суточный ход коэффициента полупрозрачности $Q = (foEs - fbEs)/fbEs$ по данным станции «Токио» при высокой (индекс Вольфа $W > 70$) и низкой (индекс Вольфа $W < 70$) солнечной активности. За рассмотренные годы медианное значение индекса Вольфа составляло порядка 70. При увеличении солнечной активности коэффициент полупрозрачности слегка уменьшается, по-видимому, из-за повышения температуры нейтралов, что, по-видимому, характеризует уменьшение интенсивности мелкомасштабных турбулентных движений в спорадическом слое. Эта зависимость значительно слабее суточной.

На рис. 2 представлен суточный ход коэффициента полупрозрачности Q по

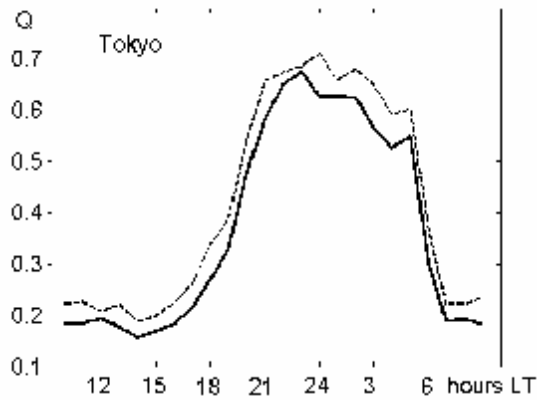


Рис.1. Суточный ход коэффициента полупрозрачности Q при высокой (сплошная линия) и низкой (пунктир) солнечной активности

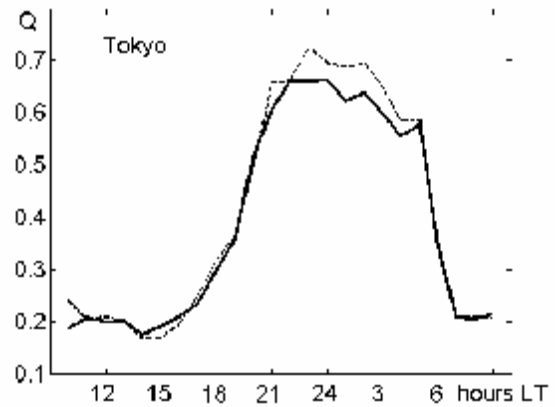


Рис.2. Суточный ход коэффициента полупрозрачности Q при высокой (сплошная линия) и низкой (пунктир) магнитной возмущенности.

данным станции «Токио» при высокой ($\Sigma Kp > 18$) и низкой ($\Sigma Kp < 18$) геомагнитной активности. За рассмотренные годы медианное значение ΣKp составляло порядка 18. При исследовании эффектов влияния геомагнитных вариаций сутками с возмущенной ионосферой считались сутки с $\Sigma Kp > 18$ и сутки после – время отрицательной фазы геомагнитной бури, которая, как правило, наступает через сутки-часы повышения Kp -индекса. Из рис.2 видно, что коэффициент полупрозрачности слегка уменьшается в магнитно-возмущенное время.

Характеристикой крупномасштабной (сотни метров) турбулизации спорадических слоёв E_s можно считать E_s -рассеяние, которое проявляется как диффузность, расплывчатость следа спорадического слоя E_s на ионограммах вертикального зондирования. Проявление E_s -spread имеет заметный максимум в минимуме 11-летнего солнечного цикла, причем наблюдается E_s -spread, как правило, при небольших значениях плотности спорадического слоя E_s . В минимуме солнечного цикла E_s -spread чаще наблюдается при значениях $fbEs < (2.5 \div 3)$ МГц, однако, в максимуме солнечного цикла E_s -spread чаще наблюдается при более низких значениях плотности спорадического слоя $fbEs < (1.5 \div 2)$ МГц. Распространена гипотеза, что E_s -spread вызывается акустическими импульсами, распространяющимися в атмосфере; [7, 18]. В годы солнечного максимума акустические импульсы сильнее поглощаются, по-видимому, редко достигают высот ионосферы, причем могут турбулизировать только менее плотные спорадические слои [9].

Итак, можно полагать, что как мелкомасштабная, так и крупномасштабная турбулизация вызывается акустическими импульсами, распространяющимися в атмосфере.

В настоящей работе в связи с землетрясениями исследуются суточный ход коэффициента полупрозрачности Q , характеризующего мелкомасштабную турбулентность, и суточный ход числа наблюдений E_s -рассеяния, характеризующего крупномасштабную турбулентность.

Обычно при исследовании сейсмоионосферных эффектов выбирают невозмущенные (слабовозмущенные) дни, а остальные исключают. В нашей работе мы анализируем только дни с $W < 100$ и $\Sigma Kp < 35$, таким образом, исключается из анализа немногим меньше половины всех дней.

Авторы исходили из предположения, что сейсмоионосферные эффекты в спорадическом слое E могут быть вызваны акустическими волнами с периодами до 5 мин. Радиус области подготовки землетрясения можно оценить, исходя из формулы Добровольского [8]: радиус области подготовки $R_{Добр} \sim \exp(M)$, где M – магнитуда землетрясения. Из геометрических соображений слабые возмущения, распространяющиеся от поверхности Земли, могут вызвать изменения в ионосфере, если

размер области подготовки порядка расстояния от поверхности Земли до E области, т.е. $H \sim d = 2R$, следовательно, магнитуды землетрясений должны превышать $M=4$. На высоте ионосферы амплитуда акустических возмущений, распространяющихся от поверхности Земли, будет максимальной при их вертикальном распространении. Исходя из этого, авторы предлагают рассматривать землетрясения, области подготовки которых расположены не слишком далеко от станции вертикального зондирования, расстояние от станции до эпицентра $R - R_{Добр} < 100$ км. Рассматривались только коровые землетрясения с глубиной $h < 40$ км.

Ранее в работе [3] по 15-минутным данным станции Душанбе было получено, что вероятность наблюдения E_s -рассеяния увеличивается за 1-3 суток перед изолированными во времени землетрясениями с $M > 4.5$ по сравнению с предшествующими тремя днями, что характеризует увеличение интенсивности крупномасштабных турбулентных движений в спорадическом слое.

В настоящей работе по данным станции Петропавловск-Камчатский также наблюдалось увеличение E_s -рассеяния в $(-2, -1, 0)$ сутки перед землетрясениями с $M > 4$ по сравнению с остальными сутками, которые считались фоновыми. За май-август 2004 года число таких дней составило 54 (из 120 рассмотренных).



Рис.3. Число наблюдений E_s -рассеяния в зависимости от локального времени для «сейсмоактивных» суток (сплошная линия), и «фоновых» суток (штриховая линия).

Далее подсчитывалось число наблюдений E_s -рассеяния за интервал времени с 20 до 3 час LT для каждого из моментов измерений (каждые 15 мин) отдельно для «сейсмоактивного времени», т.е. в $(-2, -1, 0)$ сутки и для «фоновое время». Такой подход позволил выяснить, в какое время суток чаще наблюдается E_s -рассеяние, связанное с процессами подготовки землетрясений. Было получено, что $(-2, -1, 0)$ сутки перед землетрясениями с 22 до 24 час LT имеется отчетливый максимум числа наблюдений E_s -рассеяния (см. Рис.3).

Итак, даже перед сравнительно слабыми ($M > 4$), но близкими ($R - \exp(M)) < 100$ км

к станции ВЗ землетрясениями число наблюдений E_s -рассеяния увеличивается в предполуночные часы.

Однако при исследовании вариаций коэффициента полупрозрачности выяснилось, что только при магнитуде землетрясения $M > 5$ наблюдается воздействие процессов подготовки землетрясений. Проводя процедуру наложения эпох для коэффициентов полупрозрачности, получаем для близких ($R - \exp(M)) < 100$ км коровых землетрясений с $M > 5$ увеличение коэффициента полупрозрачности в восходные и закатные часы (см. рис. 3). «Сейсмоактивными» также считались $(-2, -1, 0)$ сутки. Часы восхода и заката различаются для «Токио» и «Петропавловска» из-за разницы географических широт.

При наложении эпох были использованы данные для нескольких десятков землетрясений, но поскольку спорадический слой существует далеко не всегда, число реальных значений для каждого часа, использованное при наложении эпох, составляло порядка 20, что недостаточно для получения статистически достоверного результата. Поэтому полученный результат можно считать только предварительным.

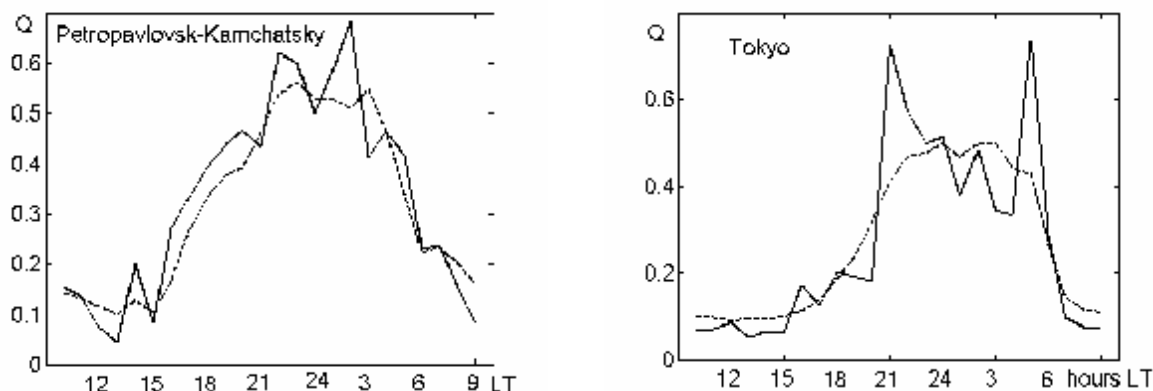


Рис. 3 Результаты наложения эпох для коэффициента полупрозрачности Q . Сплошная линия – «сейсмоактивные» (-2,-1,0) дни, пунктир – фоновые дни.

Выводы и обсуждение результатов.

Исследование мелкомасштабной турбулизации в E_s слое (коэффициент полупрозрачности E_s -слоя), показало её интенсификацию в часы восхода и заката Солнца за 1-3 суток до землетрясений с $M > 5$. Характерный масштаб неоднородности составляет десятки метров.

Исследование крупномасштабной турбулизации (E_s -рассеяние), показало увеличение числа наблюдений E_s -рассеяния в предполуночные часы (с 22 до 24 LT) за 1-3 суток перед землетрясениями с $M > 4$. Характерный масштаб неоднородности составляет сотни метров.

Все рассмотренные землетрясения были неглубокими, т.е. $h < 40$ км, и находились на расстояниях R меньших, чем радиус области подготовки по Добровольскому $R_{Добр} \sim \exp(M)$ плюс 100 км.

Нужно подчеркнуть, что и число наблюдений E_s -рассеяния, и величина коэффициента полупрозрачности уменьшаются в годы высокой солнечной активности. Это можно связать с усиленной диссипацией акустических возмущений в нагретой атмосфере в годы 11-летнего солнечного максимума.

Вероятность появления E_s -рассеяния уменьшается с повышением температуры атмосферы значительно сильнее, чем коэффициент полупрозрачности в несколько раз при изменении от минимума к максимуму 11-летнего солнечного цикла. (Липеровская и др., 2000). А в настоящей работе получено, что средние коэффициенты полупрозрачности при высокой и низкой солнечной активности различаются на $\sim 10\%$.

Таким образом, вероятность наблюдения E_s -рассеяния сильнее зависит от температуры, чем коэффициент полупрозрачности E_s -слоя; на E_s рассеяние влияют даже слабые землетрясения ($M > 4$), а на коэффициент полупрозрачности – только более сильные, с $M > 5$.

Что же может являться причиной увеличения E_s -рассеяния и коэффициента полупрозрачности перед землетрясениями?

Временной интервал перед полуночью (с 22 до 24 час LT), был выявлен в работах [14, 15], в которых в связи с землетрясениями изучалось ULF вариации магнитного поля в диапазоне (0.05-0.2 ГЦ). Можно предположить, что увеличение E_s -рассеяния перед землетрясениями вызвано увеличением активности акустических импульсов, с частотами, меньшими или порядка 0.05 ГЦ, (т.е. с периодами от 20 с и до нескольких минут), которые распространяются от области подготовки землетрясений вверх и доходят до ионосферных высот. Возможно, что и акустические импульсы, и ULF вариации магнитного поля вызваны одними и теми же причинами.

В закатные и восходные часы наступает время усиления неравновесных процессов, развития неустойчивостей в ионосферной плазме. Возможно, что в связи с воздействием

процессов подготовки землетрясений коэффициент полупрозрачности сильнее изменяется именно в это время суток при изменении условий динамического равновесия.

Список литературы

1. Гершман Б.Н., Игнатьев Ю.А., Каменецкая Г.Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя E_s на различных широтах. – М.: Наука, 1976. – 108 с.
2. Корсунова Л.П. Предвестниковые эффекты в спорадическом слое E от коровых землетрясений вблизи Японии и Средней Азии // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений :III междунар. конф., с. Паратунка Камч. обл., 16–21 авг. 2004 г. : сб. докл. – Петропавловск-Камч. : ИКИР ДВО РАН, 2004. с.65-70.
3. Липеровская Е.В., Силина А.С., Сайдшоев А., Липеровский В.А., Майстер К.-В., Васильева Н.Э. Об эффекте E_s -рассеяния ночных спорадических слоев // Геомагнетизм и Аэронавтика. 2000. № 1. Т. 40. С. 120–122.
4. Липеровский В.А., Сенченков С.А., Липеровская Е.В., Майстер К.-В., Рубцов Л.Н., Алимов О.А. Изучение возмущений во временном ходе частоты $f_b E_s$ ночного среднеширотного слоя E_s на основе минутных измерений // Геомагнетизм и Аэронавтика. 1999. Т. 39. № 1. С. 131–134.
5. Фаткуллин М.Н., Васильев К.Н., Зеленова Г.И., Савина О.Н. Явление E-рассеяния в среднеширотной ионосфере // Геомагнетизм и аэронавтика. 1985. Т.25, N 3. С.388-393.
6. Alimov O.A., Gokhberg M.B., Liperovskaya E.V., Gufeld I.L., Liperovsky V.A., Roubtsov L.N. Anomalous characteristics of the middle latitude E_s layer before earthquakes // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989. Vol. 57. P. 76–81.
7. Bowman G. G. Some aspects of mid-latitude spread E_s and its relationship with spread F // Planet. and Space Sci. 1985. V. 33, N 9. P. 1081-1089.
8. Dobrovolsky I. R., Zubkov S. I., Myachkin V. I., Estimation of the size of earthquake preparation zones// Pageoph. 1979. V.117. P. 1025-1044.
9. Hickey M.P., Schubert G., Walterscheid R.L. Acoustic wave heating of the thermosphere// J. Geophys. Res. 2001. V.106, N A10, P.21543-21548.
10. Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.-V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2001. Vol 3. P. 1-6.
11. Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Liperovskaya E.V., Parrot M., Meister C.-V., Alimov A. Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity //Surveys in Geophysics, 2000, V. 21, P. 449-486.
12. Liperovsky, V. A., Meister, C.-V., Liperovskaya E.V., Vasil'eva, N.E., Alimov, O. On E_s -spread effects in the ionosphere before earthquakes // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005, V.5 N1, P.59-62.
13. Liperovskaya E. V., Meister C.-V., Pokhotelov O.A., Parrot M., Bogdanov V. V., and Vasil'eva N. E. On E_s -spread effects in the ionosphere connected to earthquakes // Natural Hazard and Earth System Sciences, 2006. №6. P.740-744.
14. Molchanov O.A., Schekotov A.Yu., Fedorov E.N., Belyaev G.G., Solovieva M., Hayakawa M., Preseismic ULF effect and possible interpretation, Ann. Geophys., 47 (1), 121-133, 2004.
15. Molchanov O., Schekotov A., Solovieva M., Fedorov E., Gladyshev V., Gordeev E., Chebrov V., Saltykov D., Sinitsin V.I., Hattori K., Hayakawa M., Near-seismic effects in ULF fields and seismo-acoustic emission: statistics and explanation // Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 1-10, 2005.
16. Ondoh T. Anomalous sporadic-E ionization before a great earthquake // Adv. in Space. Res. 2004, V.34. P.1830-1835.
17. Takefu, M., Effects of scattering on the partial transparency of sporadic E-layers. 2. Including the Earth's magnetic field // J. Geomagn. and Geoelectr. V.41 N.8, 699-726, 1989.
18. Whitehead J.D., Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E // J. Atmos. Terr. Phys. 1989. V.51. N.5, P.401-424.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКАХ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

ELECTRICAL FIELDS AND INFRARED EMISSION IN AEROSOL CLOUDS BEFORE EARTHQUAKES

*В.А. Липеровский¹, В.В. Михайлин², Б.М. Шевцов³, Р.М. Умарходжаев⁴,
В.В. Богданов³, К.-В. Мейстер⁵*

¹*Институт физики земли РАН,*

²*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,*

³*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,*

⁴*НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова,*

⁵*Астрофизический институт, Потсдам, Германия*

A model of generation of non-stationary bay-formed variations of local electric fields in the atmosphere is analyzed in the work. These variations with characteristic time scales of 1–60 min were observed above faults a few tens of hours before earthquakes in a number of experiments, carried out in Kamchatka in particular. In the model, the presence of aerosols, upstreaming air flows and increased ionization velocity, caused by radon emanation, are proposed.

The local electric field bay-formed variations should cause to the local pulses of electrical currents and non-equilibrium infrared emissions 0.7–70 μm and local pulses of magnetic fields. Anomalies of equilibrium infrared emission above seismoactive fault regions in the night conditions before earthquakes were observed over and over again with low-altitude satellites, and the observations allowed to make a conclusion that the temperature of the region of earthquake preparation increased by a few degrees. But it seems likely that nobody observed local pulses of non-equilibrium infrared emissions with the duration of 10–60 min and modification of infrared spectra in night conditions in connection to earthquakes. So it would be interesting to carry out special on-ground observations of night atmosphere infrared emission and electrical and magnetic quasi static fields in a few near-fault points in seismoactive regions. To understand the physical mechanism of the phenomenon it is necessary to carry out simultaneous routine vertical sounding of ionosphere.

Введение

1. В течение нескольких последних десятилетий разными авторскими коллективами отмечалось появление световых явлений и аномальных вариаций электрического поля в приземной атмосфере перед землетрясениями. В частности, световые явления наблюдались перед ташкентским землетрясением 1966 г. Результаты, полученные до 1980 г., суммированы в книге [18]. Согласно историческим источникам, вспышки света и другие световые явления в течение тысячелетий неоднократно наблюдались в ночных условиях перед разрушительными землетрясениями. Проста и естественна была мысль о том, чтобы использовать световые явления в качестве предвестников землетрясений, но выяснилось, что световые явления перед землетрясениями бывают далеко не всегда [24]. По историческим источникам вспышки света наблюдались последние 2000 лет перед землетрясениями с $M > 6$ в одном случае из 20 за 5–6 дней до землетрясений. Таким образом, световые явления нельзя использовать в качестве предвестника землетрясений. Исследовать вспышки инфракрасного (ИК) неравновесного излучения в связи с проблемой прогноза землетрясений, по-видимому, никто еще не пытался. Можно предположить, что если электрические поля перед землетрясениями недостаточно велики для возникновения световых вспышек, то вероятно, что эти поля будут достаточными для возбуждения неравновесного ИК-излучения.

В настоящей работе анализируется возможный нестационарный модельный процесс генерации и исчезновения локального вертикального электрического поля в атмосфере в надразломной зоне за несколько дней перед землетрясениями при появлении в атмосфере радона литосферного происхождения, присутствии аэрозолей и наличии

вертикальных потоков воздуха. Электрические поля могут приводить как к всплескам джоулева нагрева электронов и ионов, так и к всплескам неравновесного инфракрасного излучения, которое в ночных условиях может наблюдаться в атмосфере. Такое явление может быть условно названо «атмосферным ИК-сиянием» – предвестником землетрясения.

2. Электрические поля перед землетрясениями в атмосфере – причина локального инфракрасного излучения

Экспериментальное исследование возмущений квазипостоянного электрического поля в связи с землетрясениями проводится уже несколько десятилетий [10, 12, 14, 25, 27,]. Выяснено, что продолжительные аномалии электрического поля возникают за первые часы, десятки минут до землетрясения на расстояниях до 200-250 км от эпицентров.

Такие возмущения электрического поля обычно объяснялись увеличением проводимости воздуха перед землетрясениями за счет выбросов радона. Однако отмечалось, что локальным увеличением проводимости возникновение электрического поля обратной полярности объяснить нельзя [10].

Вариации проводимости и электрического поля связаны с вариациями плотности аэрозолей в атмосфере. При дроблении, взаимном трении частиц и притяжении малых ионов к ним возникает пространственный электрический заряд. Не скомпенсированные заряды пылевых облаков при пылевых бурях могут вызвать грозовые явления [2, 26, 27].

Эффекты такого рода наблюдались и анализировались, в частности, в масштабном эксперименте «МАССА» [2]. Если по каким-либо причинам пыль становится радиоактивной, то увеличивается плотность заряженных частиц каждого знака, влияние аэрозолей на атмосферное электрическое поле усиливается.

В ночных условиях, когда температура приземного воздуха понижается, а относительная влажность увеличивается, достаточно вероятен процесс конденсации водяного пара на заряженных аэрозолях и дальнейшей зарядки крупных аэрозолей преимущественно отрицательно, а мелких положительно [20]. Появление в атмосфере больших отрицательных зарядов, на высоте более десятка метров, приводящих к появлению электрического поля обратной полярности, может быть интерпретировано на основе механизма образования квазидиполей – френкелевских генераторов [21].

Отметим, что очень интересное и полезное обобщение и анализ результатов наблюдения аномалий напряженности электрического поля и плотности вертикального электрического тока содержатся в работе [13], где предполагалось, что регистрируемые возмущения квазипостоянного вертикального электрического поля могут быть интегральным эффектом потока импульсов ЭМИ. При этом было выделено два типа аномалий электрического поля.

Первый тип аномалии E заключается в уменьшении от значений, характерных для условий хорошей или близкой к ним погоды, до некоторого значения E_{min} и последующем увеличении примерно до прежнего уровня. При этом значение E_{min} становится часто отрицательным, т.е. происходит изменение знака E . Длительность такой аномалии обычно 0.3-4 ч. *Второй тип аномалии E* представляет обычно пакет колебаний с некоторым набором частот, возникающий внезапно на фоне нормального или близкого к нему атмосферного электрического поля. Длительность всего возмущения от 0.2 до 3-4 ч, а видимый период колебаний находится в пределах от первых секунд до 1,5-2 ч, причем амплитуда может превышать фон в несколько раз.

Ряд приведенных наблюдений показал, что предвестниками землетрясений могут также являться модификации аэрозольных характеристик приземного слоя атмосферы, которые существенно изменяются за несколько часов до момента землетрясения [1, 6].

Интересная модель, которая объясняет генерацию аномального электрического поля в приземной атмосфере перед землетрясениями была предложена в работе [26]. Эта

модель учитывает появление источников ионизации при выделении радона из земной коры и наличие процесса гидротации – притяжения молекул воды к только образовавшимся ионам, ионным кластерам, предохраняющим заряженные частицы от рекомбинации.

В работах [11, 17, 22,] приведены результаты современно поставленного эксперимента по измерению вариаций вертикального электрического поля в связи с землетрясениями. Первый важный результат работ: аномалия в суточном ходе напряженности квазипостоянного вертикального электрического поля перед землетрясениями проявляется в виде бухтообразных вариаций, чаще понижений различной длительности и глубины. Аномалии электрического поля до и сразу после землетрясений на 1-2 порядка превышают средние фоновые значения. Второй важный результат, полученный в том же цикле исследований на Камчатке: наиболее вероятное значение бухт составляет 100-300 В/м, а длительности аномалии 40-60 мин. При этом был подчеркнут мозаичный характер процессов в литосфере.

3. Модель и некоторые оценки

Рассмотрим следующую модель. Пусть в «начальный момент» $t=0$ в атмосфере задано облако аэрозолей в форме «блина» двух сортов, «крупных» и «мелких» частиц размером R и r . Плотность крупных аэрозолей N_R , плотность мелких аэрозолей N_r .

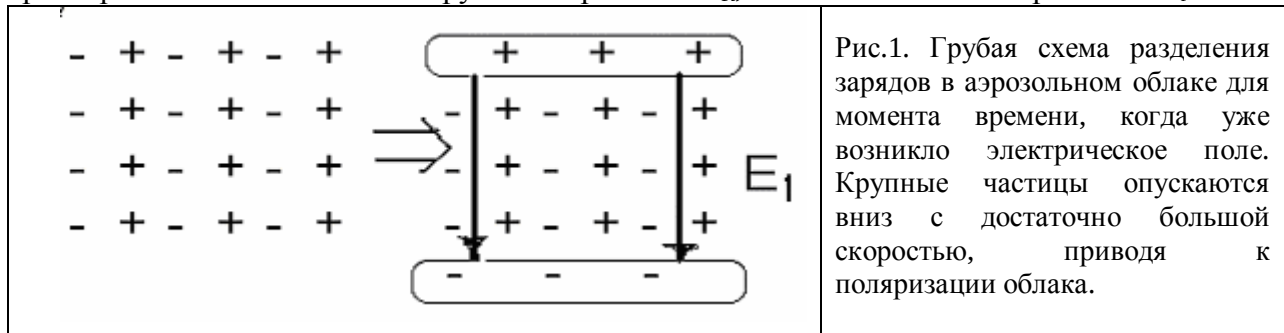


Рис.1. Грубая схема разделения зарядов в аэрозольном облаке для момента времени, когда уже возникло электрическое поле. Крупные частицы опускаются вниз с достаточно большой скоростью, приводя к поляризации облака.

Допустим, в это облако аэрозолей в начальный момент $t=0$ добавляется ионизатор радон, происходит ионизация, при этом крупные аэрозоли заряжаются преимущественно отрицательно [16], а мелкие – положительно. Например, примем, что радиус крупных частиц $R=20$ мкм, а мелких – $r_+=1$ мкм. Предположим далее, что быстрая ионизация и дополнительная зарядка аэрозолей прошла и прекратилась. Крупные частицы, заряженные отрицательно, опускаются быстрее и имеют относительную скорость U_- , направленную вниз, а мелкие практически покоятся. Схематическая картина представлена на рис. 1. Описанная система – это «френкелевский» генератор локального электрического поля.

Такую систему можно упрощенно рассматривать как «плоский конденсатор». В этом случае

$$E_* = \frac{z_0 r_+}{e_0}, \quad \Delta\tau \sim \frac{\sqrt{\min(x_0^2, y_0^2)}}{U_-}$$

где z_0 – характерный размер сдвига по вертикали, x_0 и y_0 – характерные размеры облака по горизонтали. Таким образом, – «время существования» максимального поля определяется минимальным размером облака в плоскости XY .

Выразим напряженность электрического поля через заряд.

$$E_* = \frac{z_0 r_+}{e_0} = \frac{Q}{e_0 x_0 y_0} = \frac{s_{eff}}{e_0} = \frac{Q_+}{S e_0}$$

Если же рассмотреть случай, когда в начальный момент облако было задано в форме шара, то эта геометрия дает меньшее в 4 раза максимальное значение поля E_* , но то же самое по порядку величины.

Во всех случаях амплитуда всплеска вертикального локального электрического поля в атмосфере между зарядами определяется средней «поверхностной» плотностью положительного заряда $Q_+/S = \sigma_{eff}$, причем в верхней части облака заряд положительный, а в нижней – отрицательный.

Анализ случаев различной геометрии облака оправдывает проведение оценок электрического поля, не конкретизируя геометрию расположения аэрозолей и геометрию их ионизации. При этом «время существования» максимального электрического поля определяется минимальным горизонтальным размером облака и относительной вертикальной скоростью мелких и крупных аэрозолей.

Поскольку убывание электрического поля без поддержания электродвижущей силы пропорционально $\exp(-t/\tau)$, то во всех случаях «время существования» локального электрического поля не может быть больше, чем в несколько раз времени максвелловской релаксации $\tau \sim 10$ мин. А до того момента, когда создавшееся поле уменьшится на порядок, пройдет несколько интервалов максвелловского времени релаксации. Можно предполагать, что максимальное время существования электрического поля, когда оно еще достаточно велико – 40-60 мин, в атмосфере без повышенной плотности аэрозолей и дополнительной ионизации. При нестационарных всплесках в области генерации поле уменьшается на 2-3 порядка от максимального значения, что вполне измеряемо и гораздо больше среднего электрического поля. А максимальное значение по оценкам составляет 10^5 В/м. Если область генерации достаточно велика, и находится от области измерения на расстоянии всего в несколько раз больше, чем размер облака, можно наблюдать аномалию электрического поля заметно выше средней в виде бухты длительностью 40-60 мин. Если усложнить модель и учесть еще и процесс продолжения ионизации, то реальная продолжительность аномалии будет больше.

Имея в виду модель двух «заряженных пластин конденсатора» можно представить уравнение для максимального электрического поля в виде

$$ae \frac{\partial E_x}{\partial t} = U - r_+(t) - l_{eff} \left(N_a, \frac{n}{n_0}, n_e \right) E^*$$

где a – некий геометрический коэффициент порядка 1, он равен единице для идеального конденсатора, λ_{eff} – эффективная проводимость. Максвелловское время релаксации в атмосфере обычно оценивается как $\tau_0 = \varepsilon_0 / \lambda_0$, где λ_0 – средняя проводимость при отсутствии аэрозолей.

Первый член учитывает увеличение поля при дальнейшем гравитационном разделении зарядов, второй – уменьшение из-за электропроводности.

Известно, что наличие аэрозолей в атмосфере, особенно крупных, приводит к уменьшению проводимости в атмосфере [8], так как ионы, обеспечивающие проводимость, присоединяются к аэрозольным. С другой стороны, дополнительная ионизация, связанная с появлением радона, должна приводить, наоборот, к увеличению проводимости. Для условий Камчатки проводимость по большей части скорее уменьшается на порядок, и это соответствует наблюдаемым характерным временам бухт электрического поля перед землетрясениями.

Могут быть другие ситуации, когда рекомбинация зарядов происходит медленнее, чем обычно. Например, если область повышенной ионизации окружена со всех сторон аэрозольным слоем с уменьшенной проводимостью. Так что реальна ситуация, когда время существования заряженного облака больше в несколько раз, чем среднее максвелловское время релаксации в окружающей атмосфере.

Известно, что пробой в атмосфере наступает, когда энергия, набираемая электроном в «среднем» постоянном электрическом поле достаточна для ионизации $W_0 \sim qE_0 L_f$, где энергия ионизации $W_0 \sim 15$ эВ, напряженность пробойного электрического поля $E_0 \sim 3 \cdot 10^6$ В/м, L_f – средняя длина свободного пробега.

Для электрического поля любой напряженности, меньшей, чем пробойное, энергия,

набираемая в постоянном поле порядка энергии кванта ИК-излучения $qEL_f \sim W \sim hc/\lambda$, где λ – длина волны кванта света в интересующей нас инфракрасной области спектра.

Для излучения на «красной» границе ($\lambda_1=0.7$ мкм) $W_r=1.75$ ЭВ, а соответствующее электрическое поле должно быть порядка $E_r=3.5 \cdot 10^5$ В/м.

Для ИК-излучения с длиной волны $\lambda_m=24$ мкм, большей на полтора порядка $W_m=0.052$ ЭВ, а соответствующее электрическое поле должно быть порядка $E_m=1,1 \cdot 10^4$ В/м.

Заметим, что обычно говорят о наборе энергии в электрическом поле на длине свободного пробега. Однако, реально, длина свободного пробега частиц имеет функцию распределения, и велика доля частиц, имеющих свободный пробег, например, в несколько раз больше. Отсюда и появляется очень грубая оценка всплесков электрического поля $\sim 10^3$ В/м и ожидания возникновения локальных мозаично расположенных областей ИК-излучения. Предлагая в этой работе изучение ИК-спектров от 0.7 мкм до 24 мкм в связи с землетрясениями, можно предположить, что электрические поля в областях излучения должны быть $\sim 10^3$ В/м, а в приземном слое 200÷500 В/м. Эти оценки грубы и требуют экспериментальной проверки.

4. Обсуждение

4.1. Естественно, что аэрозольные структуры атмосферы разнообразны и как правило, неоднородны, что ведет к резким неоднородностям «френкелевских» электрических полей. Среднее электрическое поле будет достаточно интенсивным только для достаточно «толстых» по вертикали облаков, т.е. общая картина электростатического поля определяется в атмосфере «интегральными» зарядами достаточно большого облака, и ему соответствует интегральная по высоте разность потенциалов. Локальная структура электрического потенциала в атмосфере модифицируется. А пробой и всплески свечения наблюдаются там, где возникает локальный максимум поля. Могут появляться светящиеся облака, «токовые вспышки», вызванные нестационарными локальными электрическими полями. Вспышки электрического поля приведут к вспышкам инфракрасного излучения, а также к всплескам электрического поля на земле продолжительностью несколько секунд [10].

Авторы полагают, что изучаемые процессы возникновения ЭДС и генерации бухтообразных локальных электрических полей и токовых систем различны в разных сейсмоактивных зонах. Могут быть разные аэрозольные системы, и соответственно, разные характерные длительности бухтообразных всплесков электрического поля. Можно предположить, что на суше вблизи моря, в частности, на Камчатке, где достаточно высока влажность в вечернее и ночное время, имеет место процесс конденсации водяного пара на минеральных аэрозолях. Соответственно τ – время максвелловской релаксации больше обычного среднего времени максвелловской релаксации. Можно предположить (а потом и проверить в специальной работе), что вдали от моря, например, в Средней Азии или на Северном Кавказе вероятны более кратковременные всплески электрического поля и ИК-излучения при его атмосферной «френкелевской» генерации.

4.2. В настоящее время проводится исследования равновесного ИК-излучения земной поверхности с использованием спутников.

В работах [4, 28] на основе измерений со спутников изучались аномалии инфракрасного излучения земной поверхности, характеризующие тепловые аномалии, связанные с землетрясениями в Японии и Китае. Было обнаружено наличие положительных тепловых аномалий, ассоциированных с системами разломов в земной коре.

При использовании данных о вариациях ночной температуры на земной поверхности от MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectra Radiometer), полученных на борту спутника National Aeronautical space Agency Terra Satellite, и сравнении их с данными по излучению земной поверхности [23] была найдена корреляция между

атмосферными динамическими процессами и процессами в твердой земле перед землетрясением 26.01.2001 в Bhuj Gujard в западной Индии $M=7.7$. За 5-6 дней перед землетрясением обнаружено увеличение температуры на 3-4 градуса С на расстоянии не более 200 км от эпицентра. Отметим, что при исследовании на спутниках обнаруживают аномалии температуры, а не электрических полей.

4.3. Все измерявшиеся в связи с землетрясениями в последние годы электрические поля регистрировались вблизи поверхности земли [5, 7, 10, 13, 15, 17, 18]. И эти измерения привели к выводу, что перед землетрясениями появляются вариации электрического поля в диапазоне длительностей от импульсов-«миллисекундников» до часовых бухт. Почти во всех исследованиях измерения практически все одноточечные, хотя в ряде работ и был сделан вывод о мозаичности проявления электрических полей сейсмической природы. В литературе пока нет никакой статистически значимой информации о характерных пространственных масштабах появления этих полей! Измерения характерных вертикальных и горизонтальных масштабов этих полей также не проводились.

5. Заключение

Как представляется авторам, перспективно проведение инфракрасного сканирования атмосферы на высотах до нескольких километров и выше при достаточно хорошей погоде, на Камчатке, в сейсмоактивной зоне. Также нужно продолжать непосредственные измерения электрического поля E , тока j и проводимости, причем многоточечные.

В связи с этим интересны и важны работы по предварительному лабораторному изучению ИК- спектров, планируемые в НИИЯФ МГУ.

Заметим, что изучение инфракрасных спектров свечения атмосферы для неравновесного излучения, по-видимому, еще не использовалось с целью поиска предвестника землетрясений.

В НИИЯФ МГУ предполагается провести разработку и выбор оптической схемы наблюдения на лабораторной установке, имитирующей натурные условия, с защитой от фоновых лабораторных физических полей, регистрирующей всплески инфракрасного излучения в электрическом поле в условиях дополнительной ионизации и при наличии аэрозолей. Также предполагается провести оптимальный выбор фотоприемников с нужными спектральными характеристиками, подбор фотостимулируемых люминофоров для регистрации всплесков слабой интенсивности. Здесь следует подчеркнуть, что в МГУ в 1965 г. был создан сканирующий спектрометр СКФ-1 для инфракрасной области фоновых излучений (премия им. Н.И.Вавилова, 1965 г.), а также разработан фурье-спектрометр IFS66 V/S в диапазоне от 0.3 до 3 мкм, диапазон которого частично соответствует инфракрасной области спектра [9, 3, 19].

Еще раз подчеркнем, что хотя механизмов возникновения электрического поля в приземной атмосфере несколько: атмосферные механизмы, литосферные механизмы с образованием трещин, однако все эти механизмы должны приводить к всплескам неравновесного ИК- излучения, совокупность измерений которого в сейсмоактивных зонах и последующий анализ, можно надеяться, приведет к полезным прогностическим результатам. Для практических целей прогноза, конечно, нужны непрерывные измерения на Камчатке, нужен ход во времени ИК-излучения.

Итак, представляется интересным проект, в котором

! была бы разработана и поставлена аппаратура для анализа инфракрасных спектров при круговом сканировании атмосферы в сейсмоактивных зонах.

! было бы необходимо провести лабораторное моделирование инфракрасных спектров в соответствующих электрических полях от 2×10^2 до 10^6 В/м.

! было бы интересно провести первые предварительные наблюдения на Камчатке

Однако, для таких работ нужна кооперация усилий нескольких научных групп.

Список литературы

1. Алексеев А.С., Аксенов В.В. Об электромагнитном поле в очаговой зоне землетрясений // ДАН. 2003. Т.392.№1.С. 101-110.
2. Альперович Л.С., Пономарев Е.А., Федорович Г.В. Геофизические явления, моделируемые взрывом: обзор. Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985, №.11, С.9-21.
3. Васильев А.В., Михайлин В.В., Введение в спектроскопию твердого тела. М., Изд. МГУ.1987. 287 с.
4. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли — индикатор сейсмической активности // Докл. АН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67-69.
5. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. — М.: Наука. 1988. — 174 с.
6. Гришин А.Н., Матвиенко Г.Г., Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Донченко В.А., Воднев С.А. Аэрозольные и электрические характеристики атмосферы в сейсмоопасных районах// Томск. Институт оптики атмосферы СО РАН. Препринт №6. 2003. 15 с.
7. Здоров А.Г., Моргунов В.А., Степанов М.В. Электромагнитные предвестники и прогноз землетрясений (М=3-4) на Кавминводском полигоне//Физика Земли. 2004. № 12. С. 48-57.
8. Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физических наук. 1962. т.76, вып.4, с. 593-642.
9. Королев Ф.А., Михайлин В.В., Клементьева А.Ю., Мещерякова Т.Ф. Скоростной светосильный спектрометр СКФ-1// Прикладная спектроскопия. 1968. С.68-73.
10. Мальцев С.А., Моргунов В.А. К физической модели возмущений электростатического поля литосферной природы в атмосфере и ЭМИ // Физика Земли. 2005. № 9. С.65-73.
11. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Бузевич А.В., Смирнов С.Э. Особенности атмосферных шумов, наложенных на вариации квазистатического поля в приземной атмосфере Камчатки // Геомагнетизм и Аэрoномия. 2005. Т.45. №5. С. 690-705.
12. Моргунов В.А. Электрические явления, предшествующие Шикотанскому землетрясению и его афтершокам // Докл. АН СССР. 1998. Т. 359. № 1. С. 102-105.
13. Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы//Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57-68.
14. Руленко Р.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед Камчатским землетрясением 13.11.93 г. М=7.0//ДАН. 1996. Т.348.№ 6. С. 814-816.
15. Руленко Р.П., Иванов А.В., Шумейко А.В. Краткосрочный атмосферно-электрический предвестник Камчатского землетрясения 6.III.1992, М=6.1.//ДАН. 1992. Т.326. №6. С. 980-982.
16. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. Санкт-Петербург, Гидрометеoиздат. 1992. 312с.
17. Смирнов С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке//Геомагнетизм и Аэрoномия. 2005. № 2. С. 282-287.
18. Соболев Г.А., Демин В.М. Механoeлектрические явления в Земле. — М.: Наука.1980.—260 с.
19. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. М.: Энергоатомиздат. 1990. 304 с.
20. Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. ГИТТЛ, М-Л. 1949. 155 с.
21. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Davidov V.F., and Bogdanov V.V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes// Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005. V.5. N6 P. 783 – 789.
22. Mikhailov Yu. M., Mikhailova G.A., Kapustina O.V., Buzevitch A.V., Smirnov C.E. Power spectrum features of near-Earth atmospheric electric field in Kamchatka //Annals of Geophysics. 2004. V. 47. N 1. P. 237-245.
23. Ouzounov D. and Freud F.: Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data, Adv. Space Res. 2004. V.33. P.268–273.
24. Papadopoulos G. A. Luminous and fiery phenomena associated with earthquakes in the East Mediterranean//Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes/Ed. by M.Hayakawa, TERRAPUB, Tokyo, 1999. P.559-575.
25. Pierce E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction / /Geophys. Res. Lett. 1976. V.3. N3. P. 185-188.

26. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Karelin A.V. Conception and model of seismo-ionosphere-magnetosphere coupling// Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Ed. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. Tokyo: Terrapub. 2002. P. 353–361.
27. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P. and Lomonosov A.M. Quasielectrostatic model of atmosphere-thermosphere-ionosphere coupling//Adv. Space Res. 2000. V.26.N 8. P.1209-1218.
28. Tronin A.A., Hayakawa M., Molchanov O.A. Thermal IR satellite data application for earthquake research in Japan and China//Journal of Geodinamics. 2002. V.33. P.519-534.

СЕЙСМОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИГНАЛЫ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМ НА КАМЧАТКЕ

SEISMOELECTROMAGNETIC SIGNALS BEFORE EARTHQUAKES IN КАМЧАТКА

Ю.М. Михайлов

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

Results of the analysis of occurrence times of earthquake precursors in a quasistatic electric field of the surface atmosphere in Kamchatka peninsula [5] are described. For sequence of earthquakes in March 1992 harmonics of horizontal component of Earth magnetic field were found, their periods coincided with aftershock periods. Velocity of precursor propagation is in the range from 0.87 to 1.8 ms⁻¹. The same values were received from the analysis of variation of ionospheric F2- and E-layers by calculation on the base of logarithmic relation between appearance time of moderate-term EQ precursors and different distances from epicenter.

Одной из первых публикаций была работа, в которой анализировалась зависимость времени появления предвестников землетрясения (ЗТ) от эпицентрального расстояния [4]. По данным многочисленных и разнородных наблюдений предвестников ЗТ была получена эмпирическая формула $\lg(TR) = 0,72 \cdot (M - 1)$, где Т - время наблюдения предвестника в сутках; R – расстояние от будущего эпицентра ЗТ до точки наблюдения в км; М - магнитуда ЗТ. В той же работе было выделено два класса предвестников: долгосрочных и краткосрочных. Вышеприведенная формула оказалась справедливой для первых, для вторых же зависимость была более сложной, и не удалось получить подходящей аппроксимирующей функции.

Пользуясь результатами наблюдений электростатического поля на Камчатке, где было обнаружено подобие временной формы предвестников, нам удалось оценить скорость распространения предвестников, которая оказалась равной ~1 мс⁻¹. Подробно исследуя интервал наблюдений горизонтальной компоненты земного магнитного поля в период сильных серийных землетрясений (март 1992) нам удалось обнаружить в Н-компоненте поля гармоника, соответствующие периоду афтершоков. Целью работы является изучение физической природы электромагнитных процессов, предшествующих ЗТ.

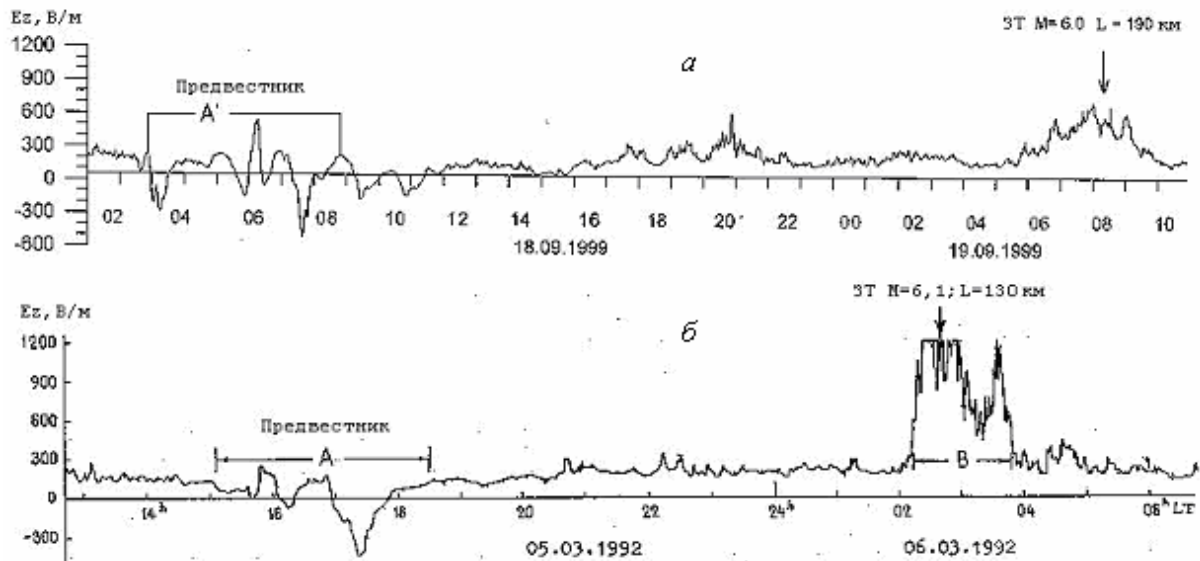


Рис.1. Изменения квазистатического электрического поля E_z по измерениям на Камчатке в периоды подготовки и развития землетрясений 19 сентября 1999 г. (а) и 6 марта 1992 г. (б). А и А' - предполагаемые предвестники землетрясений.

Представлены результаты анализа предвестников землетрясений (ЗТ), наблюдаемых в разные периоды в квазистатическом электрическом поле в приземной атмосфере на Камчатке в ИКИР ДВО РАН (пос. Паратунка, $\varphi = 52^\circ 58.3'N$; $\lambda = 158^\circ 14.9'E$). В качестве иллюстрации появления предвестников перед ЗТ на рис.1 приведены два случая.

В период, предшествовавший ЗТ 6 марта 1992 г. с магнитудой $M=6.1$ и эпицентром в Авачинском заливе на глубине 30 км на расстоянии 130 км от пункта регистрации, наблюдалось бухтообразное понижение квазистатического поля величиной до -300 В/м (Рис.1б). Аналогичное понижение величины квазистатического электрического поля наблюдалось также перед ЗТ 18 сентября 1999 г. с магнитудой $M=6.0$ и эпицентром на глубине 60 км на расстоянии 190 км от пункта регистрации (Рис.1а). Обращает на себя внимание подобие временных форм предвестников, однако время упреждения ЗТ несколько различно: в первом случае - 10 ч, во втором - 29 ч. Полагая, что разность времен зависит от скорости распространения предвестника, находим ее: $V = 0.87$ м/с [5].

Рассмотрим подробнее рис.1 и проанализируем сейсмическую обстановку на Камчатке в начале марта 1992 г. Этот период характеризовался двумя сериями ЗТ: 2 и 5 марта (табл.1, в которой данные приведены по каталогу NEIC).

Таблица 1.

Землетрясения вблизи п-ова Камчатка а марте 1992 г.

Номер	Дата	Время, UT	$\varphi, ^\circ N$	$\lambda, ^\circ E$	D, км	Мр
1	02	12:29:39.59	52.92	159.89	38	6.9
2	02	12:49:18.08	52.92	159.75	33	4.6
3	02	14:07:59.57	52.83	159.88	34	6.0
4	04	08:44:59.13	53.09	159.87	33	4.9
5	05	14:39:10.25	52.90	159.62	45	6.4
6	05	15:14:33.23	52.86	159.50	33	4.7
7	05	16:01:44.27	54.12	157.73	33	4.4

Обе серии состояли из одного главного толчка ($M=6.9$ и $M=6.4$) и двух афтершоков. Глубина очагов была приблизительно одинаковой - в пределах 37 ± 5 км.

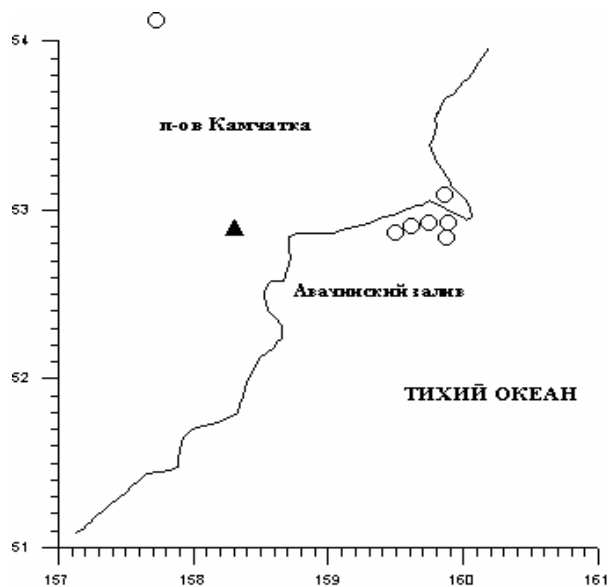


Рис.2. Расположение очагов землетрясений, приведенных в табл.1. Треугольник – пункт регистрации.

методика обработки. Из исходной суточной вариации (кривая 1) исключалось среднесуточное значение (кривая 2) и методом периодограмм с прямоугольным временным «окном» оценивался спектр мощности кривой 2, дополненной нулями до 2048 точек, необходимых для использования алгоритма БПФ. Этот способ аналогичен ранее использованному методу для оценки спектра мощности суточных вариаций квазистатического электрического поля [2] и атмосферных ОНЧ-радишумов [3]. Результирующий спектр показан на фрагменте 4 рисунка. На фрагменте 5 две спектральные полосы выделены в зависимости от периодов T , причем справа показан спектр данных, отфильтрованных в полосе 0,1-36 мин. Временные вариации этих спектральных составляющих, полученные обратным БПФ и приведенные на фрагменте 3, представляют собой короткопериодные колебания, представляющие интерес. Для оценки спектра мощности этих колебаний использован метод модифицированных периодограмм Уэлча [6], в котором исходная суточная вариация разбивается на короткие интервалы введением временного «окна» Ханна $u(t) = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\pi t/T_i)$ при $0 \leq t \leq T_i$. Чтобы уменьшить дисперсию оценки спектра, используется прием вычисления выборочных спектров на перекрывающихся на половину коротких отрезках исходной реализации. Далее оценивается средний спектр исходной

Аномалия квазистатического электрического поля, предшествовавшая ЗТ, наблюдалась 5 марта в 3:39 UT, а само ЗТ произошло в 14:39 UT. Хотя ЗТ 2 марта по интенсивности было сильнее, чем 5 марта, неблагоприятные метеорологические условия, по-видимому, не позволили выделить его эффект в вариациях квазистатического электрического поля. На рис.2 приведена карта Авачинского залива, на которой нанесены эпицентры ЗТ. Обращает на себя внимание тот факт, что практически из одного очага в обеих сериях ЗТ афтершоки следовали с интервалом порядка получаса.

Нами сделана попытка проанализировать записи горизонтальной компоненты магнитного поля для ст.Петропавловск-Камчатский. На рис.3 показана

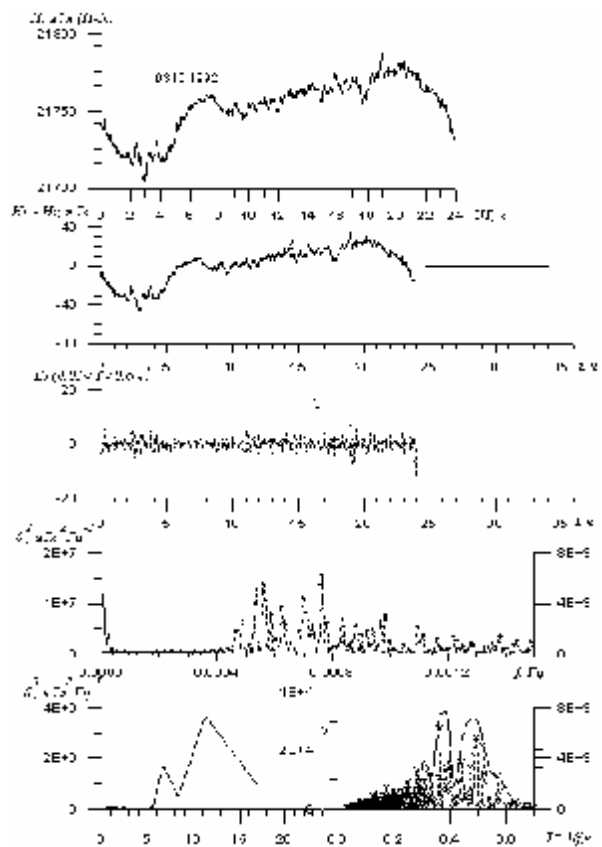


Рис.3. Методика спектрального анализа магнитных данных.

реализации путем усреднения спектров на этих коротких интервалах. Длительность коротких интервалов выбрана равной $T_1=6$ ч. Количество интервалов усреднения при общей длительности исходной реализации в 24 ч равно 7. Для увеличения дискретности по частоте исходные данные дополнялись нулями. Пример результирующего сглаженного спектра мощности в полосе периодов 0,1-36 мин приведен на правом фрагменте 5 рис.1 жирной линией.

Результаты анализа данных за период 1-10 марта 1992 представлены на рис.4. Справа приведена по вертикали снизу вверх шкала времени (UT) для этого интервала. Горизонтальными линиями указаны ЗТ с магнитудой $M>5$ (шкала внизу). Обращают на себя внимание триплеты и дуплеты ЗТ 3.03.92 и 6.03.92. Слева на горизонтальной шкале приведены спектры Н-компоненты магнитного поля для станции Петропавловск-Камчатский в интервале периодов от 6 до 40 мин. Обращает на себя внимание гармоника с периодом 35 мин, которая наиболее ярко выражена в те дни, когда происходит ЗТ или реагирует на него с запаздыванием. Малый интервал данных не позволяет достаточно корректно оценить это запаздывание, но, по предварительным оценкам, оно соответствует скорости 1мс^{-1} .

В работе [1] сделана попытка определения вариаций параметров ионосферных

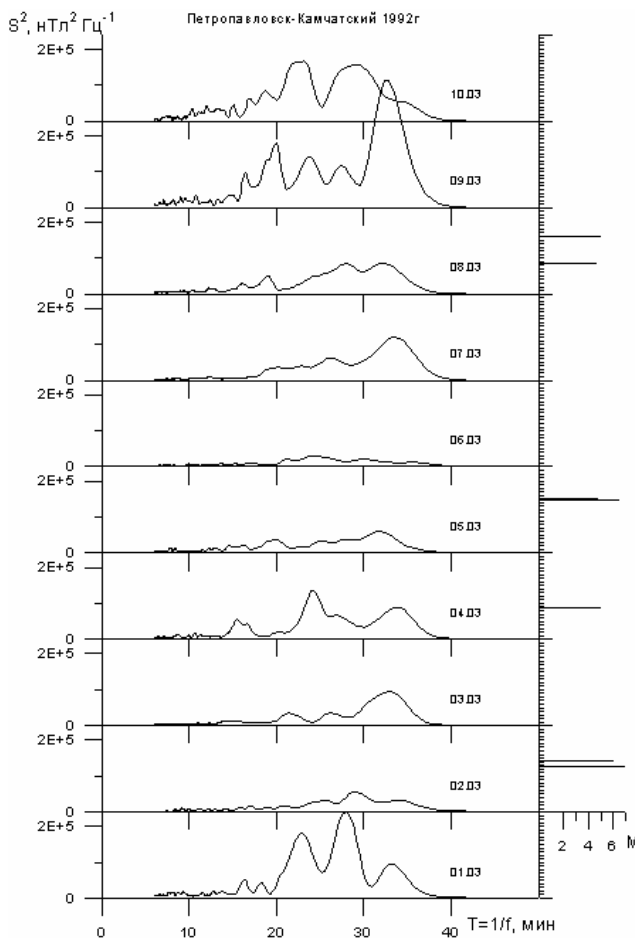


Рис.4. Последовательность спектров мощности горизонтальной компоненты магнитного поля в зависимости от периода. Справа – серия землетрясений.

слоёв F2 и Es в течение 7 дней перед ЗТ. Рассматривались ЗТ с магнитудой >6 в Тихом океане вблизи Японии. Использовались часовые данные станции Кокубунджи для 40 ЗТ с эпицентрами на расстоянии $R<1000$ км, для которых ЗТ величина скорости распространения среднесрочных предвестников даёт значение 3 км/час, что совпадает с вышеприведённой оценкой для электростатических полей. В заключение сформулируем основные выводы:

- оценки скорости предвестников ЗТ в электростатическом поле и среднесрочных предвестников в слоях F2 и Es в ионосфере дают близкие значения скорости распространения, что свидетельствует об общем механизме их возникновения;

- при наблюдении последовательных серий ЗТ в горизонтальной компоненте магнитного поля Земли обнаруживаются гармоники, соответствующие периоду афтершоков. Для района Авачинского залива в марте 1992г. эти периоды равнялись $\sim 0,2-0,4$ часа.

Автор благодарен О.В.Капустиной за помощь в обработке данных и подготовку рукописи.

Список литературы

1. Корсунова Л.П., Хегай В.В. Сейсмо-ионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45. №5. С.706-711.
2. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Бузевич А.В., Смирнов С.Э. Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т43. №3. С.422-428. 2003.
3. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Дружин Г.И., Капустина О.В. Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т44. №2. С. 245-253.2004.
4. Сидорин А.Я. Зависимость времени проявления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния // ДАН СССР. 1979. Т.245. №4. С.825-828.
5. Mikhailov Yu.M. On the properties of earthquake precursors in the electrostatic field of the surface atmosphere // Izvestia Physics of the Solid Earth. 2005. V.43. No.4. P.336-339.
6. Welch P.D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short modified periodograms // IEEE Trans. Audio and Electroacoustic. V.AU-15. N2. P.70-75.1967.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА КАМЧАТКЕ

ELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE NEAR GROUND AIR BEFORE EARTHQUAKES IN KAMCHATKA

Ю.М. Михайлов¹, Г.А. Михайлова¹, О.В. Капустина¹, Г.И. Дружин², С.Э. Смирнов²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Simultaneous records of diurnal variations in quasi-static electric field in the near-Earth atmosphere, fluxes of discrete electromagnetic pulses in the VLF band, source azimuths, narrowband filter output emission intensity at the frequencies of 4.65 and 5.3 kHz, and time forms and spectra of VLF pulses have been analyzed. The anomalous behavior of these parameters in October, 2002 and August, 2004 with different time delay was accompanied by earthquakes near the southeastern coast of Kamchatka at distances of 250--400 km from the registration points. Based on the results of a fine spectral-temporal analysis of the broadband records of VLF signals, it has been indicated for the first time that discrete electromagnetic pulses observed in anomalous fluxes before earthquakes were the signals of local thunderstorm processes.

Многолетние исследования аномальных эффектов в вариациях квазистатического электрического поля в приземной атмосфере показали, что они проявляются преимущественно в виде бухтообразного понижения напряженности, а в вариациях естественного электромагнитного поля в КНЧ- и ОНЧ-диапазонах – как в изменении интенсивности, так и в возрастании потоков дискретных импульсов [1, 2, 3]. Хотя природу этих эффектов связывают с изменением напряженно-деформированного состояния верхней литосферы в результате подготовки очага землетрясений, механизм аномалий этих геофизических явлений до сих пор не ясен. Очевидно только, что наблюдения этих явлений следует проводить не только непрерывно, но и комплексно. Исходя из этого уже в течение многих лет, начиная с 1991 г., в районе Паратунской гидротермальной системы (обс. Паратунка, $\varphi = 52^{\circ}58,3'N$, $\lambda = 158^{\circ}14,9'E$) Институтом космических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН ведутся регулярные целенаправленные наблюдения широкого комплекса

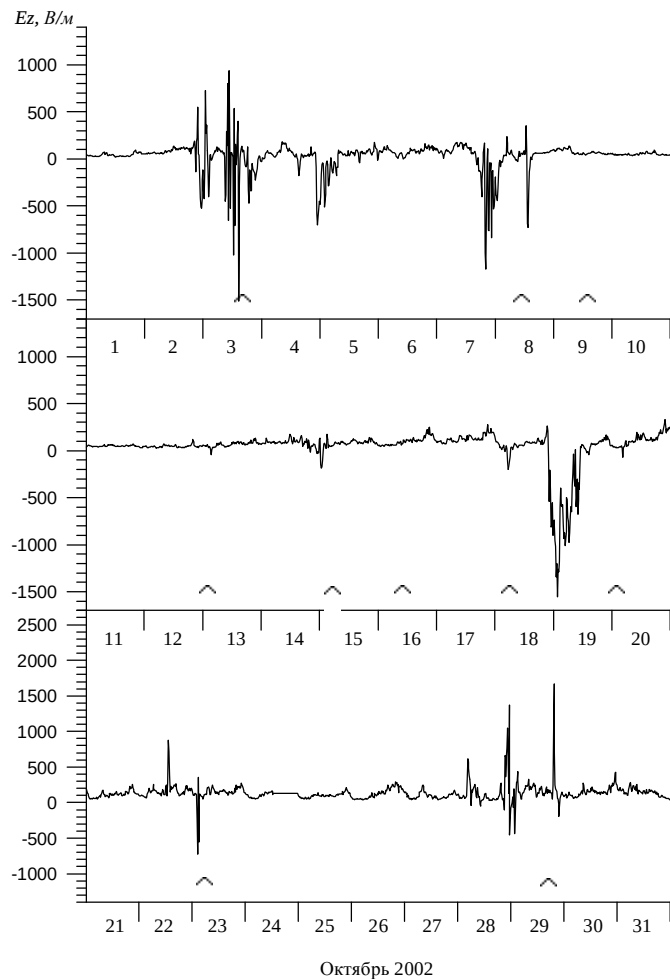


Рис.1. Суточные вариации E_z -компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки в октябре 2002 г. Стрелками указаны моменты землетрясений.

регулярные целенаправленные наблюдения широкого комплекса

геофизических параметров. В данной работе выполнен анализ одновременных записей суточных вариаций квазистатического электрического поля в приземной атмосфере, потока дискретных электромагнитных импульсов в ОНЧ-диапазоне, азимутов их источников, интенсивности излучений на выходе узкополосных фильтров на частотах 4,65 и 5,3 кГц, а также временных форм и амплитудных спектров ОНЧ-импульсов в октябре 2002 г. и августе 2004 г. Аномалии в поведении этих параметров с различным запаздыванием по времени сопровождалось землетрясениями на юго-восточном

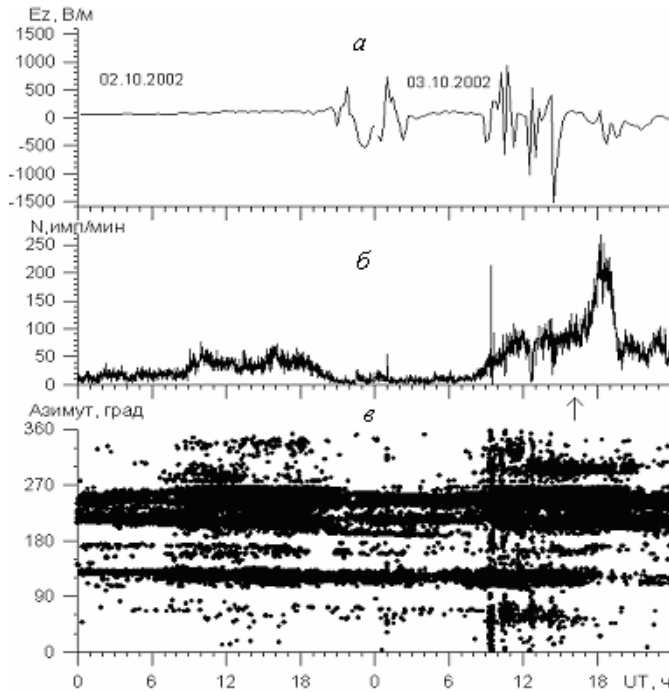


Рис.2. Суточные вариации E_z -компоненты электрического поля (а), потока дискретных электромагнитных импульсов (N имп/мин) (б), азимутов источников этих импульсов в прямоугольной системе координат 02-03 октября (в).

сигналов. Длительность этого всплеска значительно короче длительности аномалии электрического поля. На рис.2 в качестве иллюстрации приведены: суточные вариации электрического поля за 2-3 октября (а); поток импульсов N имп/мин (б) и азимуты их источников в прямоугольных координатах (в). На рис.2 в вертикальные линии в интервале времени 09-15 UT во всем диапазоне азимутов указывают на локальный («над головой») источник интенсивного потока импульсов. Стрелкой на рисунке указан момент времени 3Т.

Последовательность суточных вариаций числа N имп/мин для всех аномальных событий в вариациях E_z -компоненты, указанных на рис.1, приведена на рис.3. Анализ этого рисунка в сравнении с рис.1 показывает, что в начальный момент понижения E_z до величины, превышающей минус 500 В/м, одновременно наблюдается интенсивный поток дискретных импульсов. Опережение по времени момента 3Т составляет величину от одного до 25 ч. При меньшей величине скачка E_z -компоненты (5, 15, 18 октября на рис.2) усиление потока импульсных сигналов не наблюдалось. Здесь же на нижнем фрагменте рис.3 показан суточный ход N имп/мин 29-30 августа 2004 г., когда также наблюдался эффект усиления потока дискретных сигналов, но более продолжительный по времени по сравнению с явлениями в октябре 2002г. Длительность всех наблюдаемых аномалий составляет величину от 1 мин до 3 ч, что существенно короче длительности эффекта аномального усиления потоков импульсов, зарегистрированных на Камчатке в октябре 2002г. во время тропических циклонов в северо-западном регионе Тихого океана [4].

побережье п-ова Камчатка на расстояниях 250-400 км от пунктов регистраций.

Наблюдаемые аномальные вариации напряженности электрического поля, как видно на рис.1, имеют характерные особенности при грозовой активности в приземной атмосфере. Одновременно с регистрацией электрического поля велись наблюдения интенсивности ОНЧ-излучения на частоте 5,3 кГц, а также определялись азимуты источников дискретных электромагнитных импульсов с помощью ОНЧ-пеленгатора. Кроме азимутов, по записям пеленгатора определялся поток дискретных сигналов в одну минуту. Оказалось, что в момент первого скачкообразного понижения величины E_z -компоненты электрического поля наблюдался интенсивный всплеск потока дискретных электромагнитных

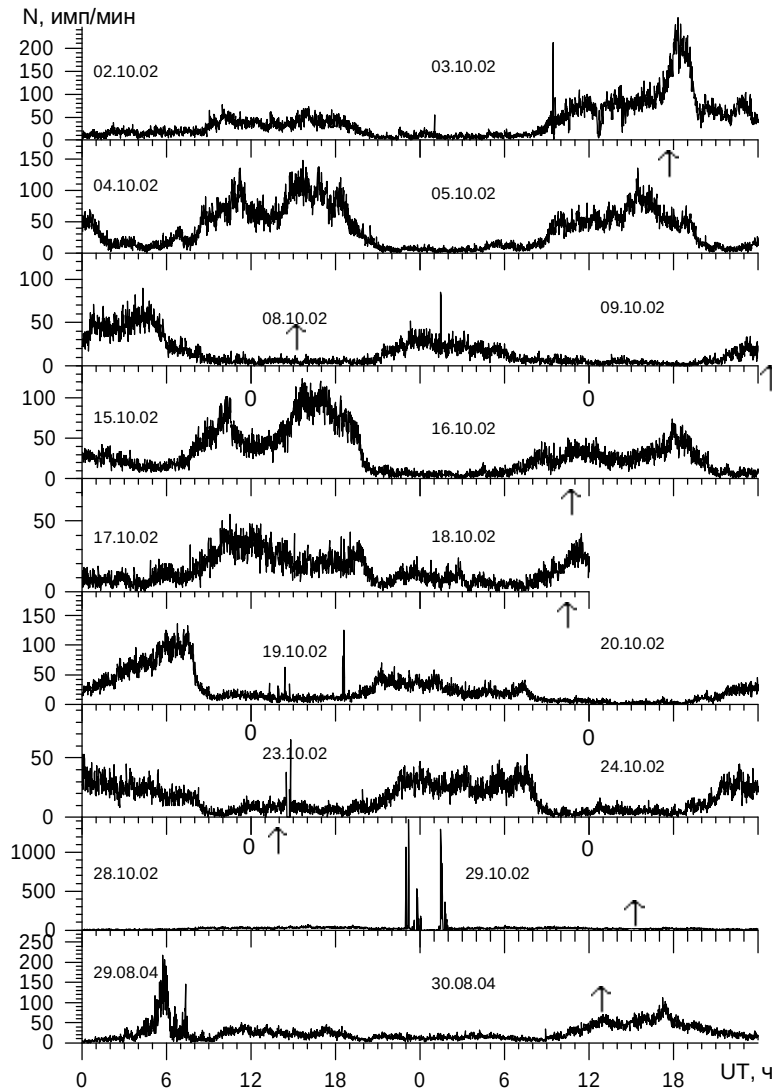


Рис.3. Суточное распределение потоков дискретных электромагнитных импульсов в окрестностях аномальных изменений электрического поля, приведенных на рис.2. Нижний фрагмент показывает суточное распределение N имп/мин 29-30 августа 2004 г.

Подобный эффект был зарегистрирован и на частоте 4,65 кГц (рис.4в). Момент максимума N совпадает с началом первого отрицательного скачка электрического поля (рис.4з) и слабым положительным скачком электропроводности (рис.4д) λ_+ с последующим ростом отрицательной электропроводности даже спустя 6-9 ч после сильных вариаций электрического поля. Длительность аномалии потока дискретных импульсов близко совпадает с длительностью первой отрицательной бухты понижения электрического поля. Вслед за этой бухтой наблюдаются значительные вариации E_z -компоненты поля, сопровождаемые сильными вариациями отрицательной электропроводности даже спустя несколько часов после сильных вариаций электрического поля.

Был выполнен тонкий спектрально-временной анализ одномоментных широкополосных записей прибора АНЧ-2МЕ с дискретностью по времени 20 мкс в разные дни августа 2004 г. (К сожалению, в октябре 2002 г. записи этого прибора отсутствовали). Метод анализа показан на рис.5 на примере аномалии N имп/мин в 06.00 UT 29 августа. На верхнем фрагменте (а) приведена спектрограмма сигналов в зависимости от времени в диапазоне частот 20-20000 Гц. Степень почернения следов пропорциональна интенсивности спектральных компонент во всем диапазоне частот. На

Для изучения временных форм и спектров дискретных импульсов, составляющих аномальные потоки, были использованы дополнительные широкополосные записи в полосе частот 20-20 000 Гц (АНЧ-2МЕ) в пос. Левая Авача на расстоянии около 100 км от обс. Паратунка, где ведется регистрация квазистатического электрического поля и электропроводностей, а также установлен ОНЧ-пеленгатор. Кроме широкополосных записей, одновременно проводились записи в узкополосных каналах на частоте 4,65 кГц в пос. Левая Авача и на частоте 5,3 кГц в обс. Карымшина на расстоянии 20 км до обс. Паратунка. На рис.4 приведены результаты этих комплексных наблюдений нескольких параметров 29 и 30 августа 2004 г. перед ЗТ 30 августа. Как видно на рис.4а, на выходе широкополосного канала увеличение потока до 50 имп/мин при фоновом уровне 20 имп/мин постепенно началось в 05 UT и достигло максимальной величины 200 имп/мин в 06 UT. Этому моменту времени на частоте 5,3 кГц (рис.4б) соответствует незначительное возрастание интенсивности.

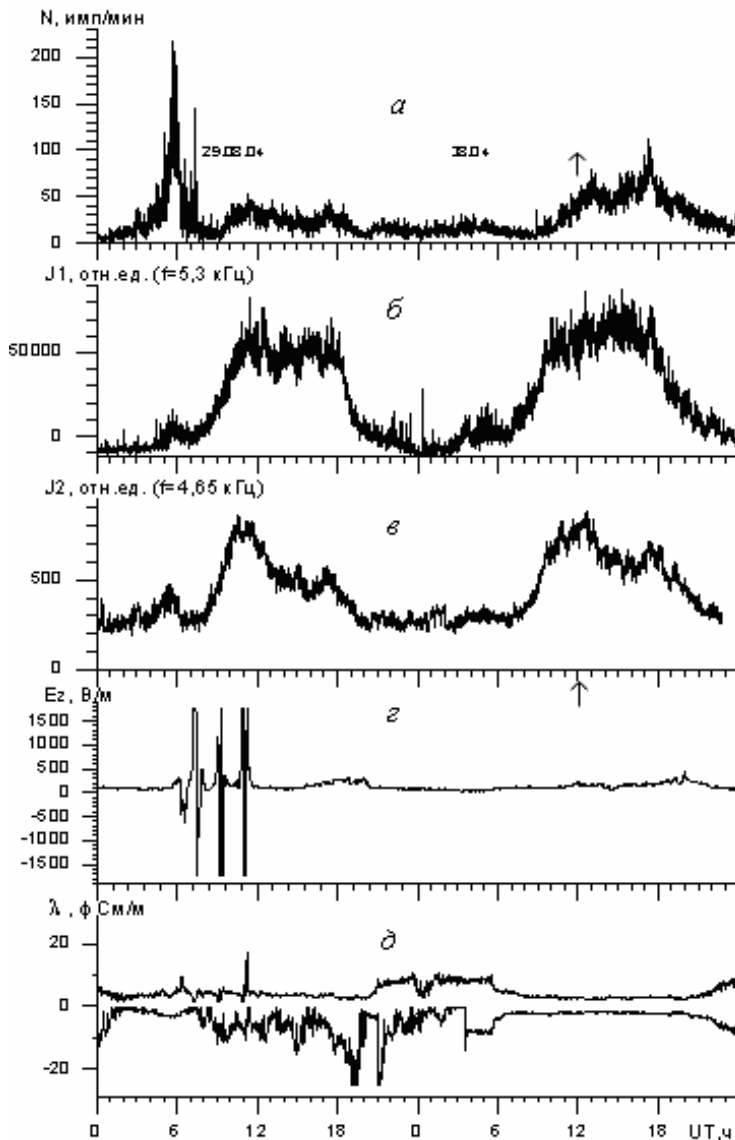


Рис.4. Суточное распределение потока дискретных электромагнитных импульсов на выходе широкополосного канала ОНЧ-пеленгатора (а), отклика фильтров на частоте 5,3 кГц в обс. Карымшина (б), на частоте 4,65 кГц в пос. Левая Авача (в), а также E_z -компоненты квазистатического электрического поля (г) и электропроводностей (λ_+ и λ_-) (д) 29 и 30 августа 2004 г.

сигналы, и по форме и по длительности аналогичные атмосферикам от источников, удаленных на расстояния порядка и более 1000 км, а их спектр (рис.6г) имеет характерный максимум для такого типа атмосфериков. Модуляция спектра на этом фрагменте вызвана наложением коротких атмосфериков. Детальный анализ индивидуальных импульсов показывает, что они включают в себя известные стадии молниевых разрядов [6]. Подобные биполярные импульсы обратных ударов молний от ближних гроз наблюдались также на расстояниях до 300 км от источника [5]).

Анализ всей совокупности данных наблюдений в октябре 2002 г. и августе 2004 г. показал следующее:

- наличие аномальных вариаций величины электрического поля, характерных для грозовой активности в приземной атмосфере;

следующем фрагменте (б) показана последовательность импульсов в интервале времени 300 мс, ниже (в) – в интервале времени 10 мс. Рис.5в показывает последовательность коротких импульсов длительностью порядка 100 – 400 мкс с наложенными более высокочастотными, но слабыми по интенсивности импульсами. На рис.5г приведен спектр Фурье временной реализации в 10 мс (рис.5в) с широким максимумом на частотах 1 – 4 кГц с практически постоянным уровнем спектральной плотности на частотах выше 6 кГц. В качестве контрольного примера рассмотрен фрагмент 22 августа 2004 г. в 02 UT, когда на спектрограмме были выделены пачки интенсивных импульсов, подобные случаю 29 августа в 06 UT. На рис.6 воспроизведена последовательность результатов обработки этого фрагмента записи. Сравнение двух рисунков показывает следующее: длительность всплеска дискретных импульсов 22 августа (рис.6б) более чем в 20 раз короче всплеска 29 августа (рис.5б); в последовательности импульсов на рис.6 в отчетливо видны импульсные

- при ослаблении величины электрического поля ниже минус 500 В/м одновременно наблюдалось усиление потоков дискретных электромагнитных импульсов. Данные ОНЧ-пеленгатора указывали на локальный источник этих импульсов;
- наличие аномальных вариаций величины электрического поля, характерных для грозовой активности в приземной атмосфере;

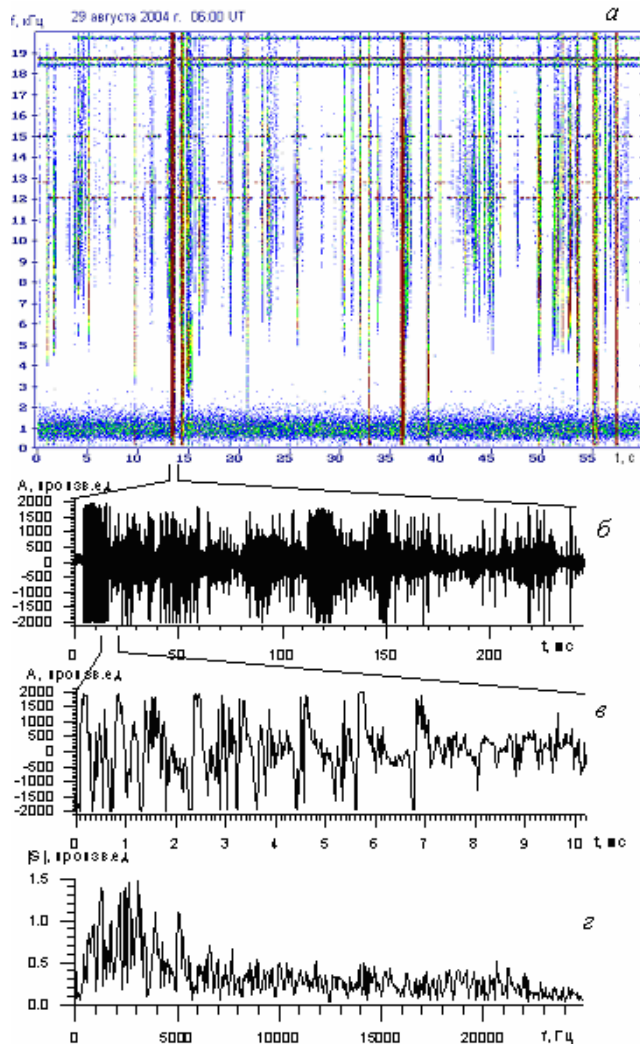


Рис.5. Спектрограмма электромагнитных излучений в полосе частот 20-20 000 Гц в максимуме потока дискретных сигналов в 06.00 UT 29 августа (а), динамика во времени выборочного фрагмента цуга в масштабах 0-300 мс (б) и 0-10 мс (в) соответственно, а также спектр Фурье фрагмента длительностью 10 мс (г).

- при ослаблении величины электрического поля ниже минус 500 В/м одновременно наблюдалось усиление потоков дискретных электромагнитных импульсов. Данные ОНЧ-пеленгатора указывали на локальный источник этих импульсов; скачкообразные изменения отрицательной и положительной электропроводностей, характерных при аномальных вариациях электрического поля;

- на выходе узкополосных каналов наблюдалось незначительное по сравнению с потоками дискретных сигналов усиление интенсивности;

- временные формы и спектры дискретных электромагнитных сигналов в аномальных потоках подобны соответствующим характеристикам сигналов вблизи молниевых разрядов.

- аномалии в поведении этих параметров с различным запаздыванием по времени сопровождалось землетрясениями у юго-восточного побережья Камчатки.

Таким образом, по результатам прямых и косвенных комплексных наблюдений различных геофизических параметров впервые показано, что в октябре 2002 г и августе 2004 г. дискретные электромагнитные импульсы в аномальных потоках перед землетрясениями являлись сигналами локальных грозowych процессов.

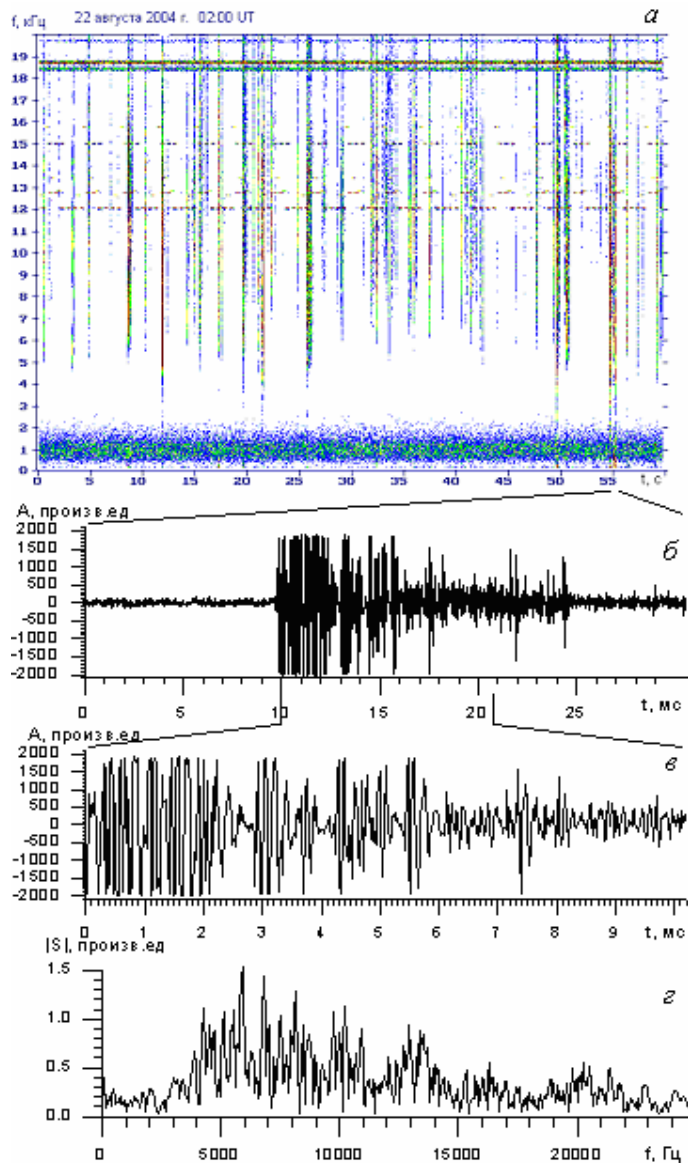


Рис.6. То же, что и на рис.5, но в 02.00 UT 22 августа.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 02-05-79066 и 04-05-65100).

Список литературы

1. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1988.
2. Дружин Г.И. Опыт прогноза камчатских землетрясений на основе наблюдений за электромагнитным ОНЧ-излучением // Вулканология и сейсмология. №6. С.51-52. 2002.
3. Ремизов Л.Т. Регистрация изменений естественного электромагнитного поля в периоды времени, предшествующие землетрясениям (обзор) // Радиотехника и электроника. Т.36. Вып.6. С.1041-1080. 1991.
4. Михайлов Ю. М., Дружин Г. И., Михайлова Г. А., Капустина О. В. Динамика грозовой активности во время тропических циклонов // Геомагнетизм и аэрономия. Т.46. №6. С. 825-838. 2006.
5. Михайлова Г.А. Амплитудные и фазовые спектры близких атмосфериков в диапазоне 2 -30 кГц // Геомагнетизм и аэрономия. Т.5. №1. С.179-183. 1965.
6. Norinder H., Vollmer B. Variation forms and time sequence of multiple lightning strokes // Ark. for. Geofis. B.2. N25. P.515-531.1956.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗЕМЛЕ С ЦЕЛЮ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

RESEARCH OF VERTICAL ELECTRIC FIELD OF THE EARTH FOR EARTHQUAKES' PREDICTION

Ю.Ф. Мороз, Т.А. Мороз

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

The vertical component of the Earth's electric field contains prominent information about the medium's geoelectric heterogeneity. This component equals zero in the horizontal-homogeneous media. In heterogeneous media it differs from zero. It gives an opportunity to use it to control the behavior of geoelectric heterogeneity of the medium that characterizes geodynamic processes. Electric tipper is going to be used for that. It represents a transmission function between vertical and horizontal components of electric field in the frequent-time area.

Electric tipper has been already studied at the Lake Baikal where seismic activity is really high. An observational net has been made around the lake. Holes up to 100m deep are used to measure the vertical component. The horizontal components of the field are registered in the directions of the geoelectric heterogeneity medium's axes. The discontinuity of measures is 10sec. Based on the electrotelluric field monitoring time rows of the electric tipper were made. In their behavior anomalous changes which precede earthquakes with $K \geq 12$ are expressed on the epicentric distances up to 300km. Anomalous effects appear 9-30 days before the earthquakes. It's likely that the effects appear due to the changes or emerge of electric heterogeneity of the media because of tectonic violations, their watering, water mineralization and some other reasons which precede serious earthquakes.

В геофизических полях, используемых для изучения геодинамических процессов, важное место занимает электромагнитное поле Земли, связанное с внешними (ионосферным, магнитосферным) и внутриземными источниками. Внешние электрические токи индуцируют в Земле магнитотеллурическое (МТ) поле различной частоты и интенсивности. Наблюдая на земной поверхности составляющие этого поля, можно контролировать во времени изменение электропроводности литосферы на различных глубинах

Важным является не только регистрация вариаций горизонтальных составляющих электрического поля на земной поверхности, но и его вертикальной составляющей в скважинах. Это дает возможность получить достаточно полную информацию о поведении электрического поля Земли в пространстве и во времени и его возможной связи с геодинамическими процессами. К настоящему времени накоплен большой объем такой информации на оз. Байкал в п.п. Узур и Тырган. На основе этих данных рассмотрены результаты изучения электрического поля Земли.

Методика наблюдений

Пункт Узур находится на острове Ольхон, а пункт Тырган на западном побережье оз. Байкал (рис.1).

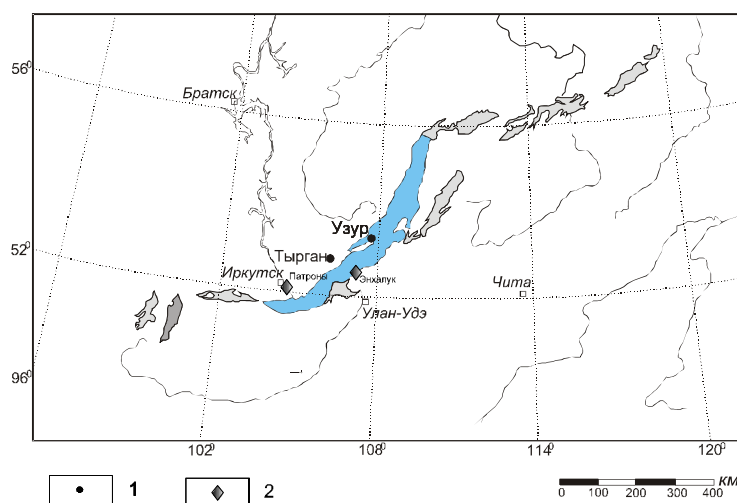


Рис.1. Схема расположения пунктов наблюдений электрического поля Земли; 1-пункты наблюдений электрического поля; 2-обсерватории геомагнитного поля;

Расстояние между ними около 115 км. Пункты мониторинга электрического поля выбраны по данным предварительных наблюдений. Важно было, чтобы на них не было технических помех и геоэлектрическая среда являлась резко неоднородной. По результатам первоначальных наблюдений определены направления осей геоэлектрической неоднородности среды. Они ориентированы вдоль и вкрест простирания береговых линий острова Ольхон и озера Байкал. По этим направлениям ориентированы измерительные линии (рис.2).

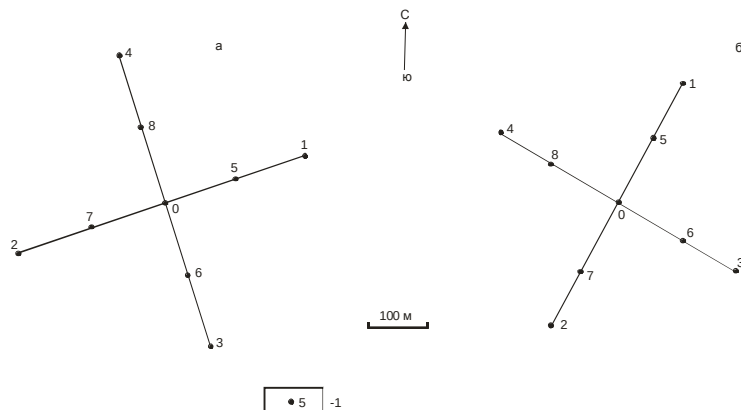


Рис.2.Схема расположения измерительных линий в пп. Узур (а) и Тырган (б). Цифрами обозначены номера электродов. Вертикальный канал в центре установки. Масштаб приведен для измерительных линий

Длина основных диполей в пп. Тырган и Узур - 240 м и 250 м (01, 02, 03, 04), дополнительных - 120 м и 125 м (05, 06, 07, 08), соответственно. В качестве заземлений использованы свинцовые электроды, опущенные на глубину 4 м. Наряду с горизонтальными компонентами электрического поля на обоих пунктах осуществляется регистрация вертикальной компоненты в скважинах, затампонированных глиной. Глубина скважин 44 м.

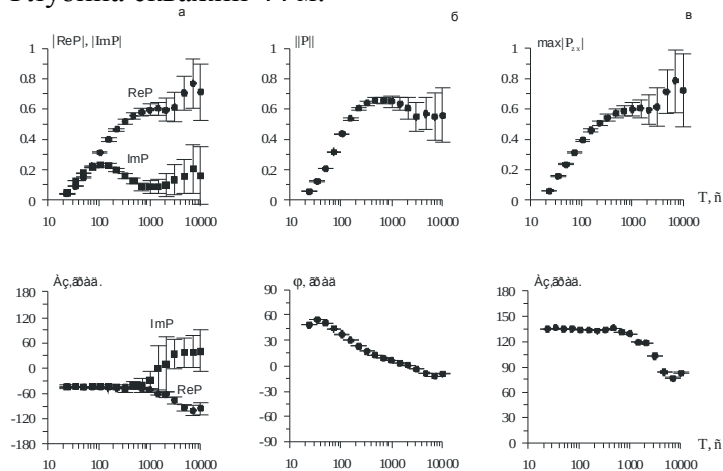


Рис.3. Частотные кривые параметров электрического типпера. а-модули вещественных и мнимых электрических стрелок и их азимуты; б-норма и фаза электрического вектора; в-модуль максимальной компоненты электрического типпера и ее азимут.

Длина вертикальных диполей 40 м. Регистрация вариаций электрического поля производится современной японской аппаратурой (DATAMARK) в цифровом виде, с дискретностью 10 с. Кроме этого на удаленных обсерваториях Энхалук и Патроны регистрируются компоненты геомагнитного поля H , D и Z в цифровом виде с дискретностью 1 мин (рис.1). Интенсивность электротеллурических вариаций в п. Тырган в 20 раз выше, чем в п. Узур, что связано с различным геологическим строением. Также следует обратить внимание, что в обоих пунктах интенсивность вертикального электрического поля заметно выше горизонтального. Это как будет показано ниже, связано с влиянием геоэлектрической неоднородности среды.

Интерпретация данных мониторинга электротеллурического поля

В основе электротеллурических исследований лежит допущение, что первичное поле можно представить полем плоской волны, нормально падающей на границу земля-воздух [1,2]. В рамках этого приближения в горизонтально-однородных средах

компонента E_z равна нулю. В средах, содержащих геоэлектрические неоднородности, компонента E_z отлична от нуля. Мониторинг вертикальной и горизонтальных компонент электрического поля дает информацию о геоэлектрических неоднородностях среды.

По аналогии с геомагнитным полем [2,6,7,9] связь между вертикальной и горизонтальными составляющими электротеллурического поля в частотной области можно представить в следующем виде:

$$E_z = \hat{P} E_{\text{гор}},$$

$$\text{где } \hat{P} = \begin{bmatrix} C_{zx} & C_{zy} \end{bmatrix}$$

$E_z = P_{zx} E_x + P_{zy} E_y$, где E_z, E_x, E_y – составляющие электрического поля, P_{zx}, P_{zy} – компоненты матрицы, зависящие от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей.

Матрицу $\hat{P}$ мы назовем электрическим типпером, по аналогии с магнитным типпером (tipper), введенным К. Возоффом [8]. Как и магнитный типпер, электрический типпер представляет собой матрицу опрокидывания, преобразуя горизонтальную составляющую в вертикальную.

Инварианты матрицы $\hat{P}$ записываются в следующем виде:

$$C = \sqrt{C_{zx}^2 + C_{zy}^2}, \quad \hat{P} = \sqrt{|C_{zx}|^2 + |C_{zy}|^2}, \quad \text{где } \|\hat{C}\| - \text{норма матрицы.}$$

Как и магнитный типпер [2,6,7,9], электрический типпер можно изобразить графически в виде полярной диаграммы, вещественных и мнимых стрелок, электрического вектора.

Уравнение электрической полярной диаграммы имеет вид:

$$|C_{zy}(\alpha)| = \sqrt{C_{zx} \cos^2 \alpha + C_{zy} \sin^2 \alpha + 2 \operatorname{Re} C_{zx} \bar{C}_{zy} \sin \alpha \cdot \cos \alpha},$$

где горизонтальная черта означает комплексную сопряженность.

Полярная диаграмма представляет собой симметричный овал или двухлепестковую кривую с взаимно перпендикулярными главными осями. В двумерной модели она имеет вид восьмерки с лепестками, вытянутыми в направлении перпендикулярном к оси однородности среды. Также выглядит диаграмма в осесимметричной модели. В этом случае лепестки вытянуты в радиальном направлении.

Электрический типпер может быть представлен в виде вещественной и мнимой стрелок:

$$\operatorname{Re} \hat{P} = \operatorname{Re} P_{zx} \mathbf{I}_x + \operatorname{Re} P_{zy} \mathbf{I}_y$$

$$\operatorname{Im} \hat{P} = \operatorname{Im} P_{zx} \mathbf{I}_x + \operatorname{Im} P_{zy} \mathbf{I}_y$$

Вектор $\operatorname{Re} \hat{P}$ характеризует влияние активных избыточных токов, находящихся в фазе с горизонтальным электрическим полем. Вектор $\operatorname{Im} \hat{P}$ отражает влияние реактивных избыточных токов, фаза которых отличается от фазы горизонтального электрического поля на $\pi/2$. В двумерной модели вещественные и мнимые стрелки коллинеарны.

По аналогии с магнитовариационным вектором [3], электрический типпер можно изобразить в виде электрического вектора $\mathbf{V}$, направленного по большой оси эллипса поляризации квазипоперечного горизонтального электрического поля и имеющего величину равную $\|\hat{C}\|$. Фаза вектора определяется как аргумент инварианта P .

$$\varphi = \arg C = \arg \sqrt{C_{zx}^2 + C_{zy}^2}.$$

Электрическая фаза не зависит от направления координатных осей. Она отражает вклад активных и реактивных токов. При j близком к 0 или p , в E_z преобладает вклад

активных токов, а при приближении j к $p/2$ - вклад реактивных токов. Электрические полярные диаграммы, вещественные и мнимые стрелки, электрический вектор характеризуют геоэлектрическую неоднородность среды.

Обратимся к экспериментальным данным в п. Тырган, где мы располагаем более длинным временным рядом вертикальной и горизонтальных компонент электрического поля. Здесь наблюдения осуществляются с 2003 года. Для получения типпера использована программа [5]. С ее помощью определены компоненты типпера C_{zx} , C_{zy} , вещественные (**ReC**) и мнимые стрелки (**ImC**), электрический вектор **V**, полярные диаграммы $P_{zx}(\alpha)$.

В начале рассмотрим частотные характеристики электрического типпера. Они получены по данным трехмесячной непрерывной регистрации электрического поля с дискретностью 10 с. На рис.3а,б,в представлены частотные кривые вещественных и мнимых стрелок (**ReC** и **ImC**) электрического вектора (**V**) и максимальной компоненты типпера ($\max P_{zx}$).

Обратимся к вещественным и мнимым стрелкам (рис.3а). Модуль вещественной стрелки возрастает с увеличением периода вариаций, что свидетельствует об увеличении вклада активных токов в вертикальную электрическую компоненту. Мнимая стрелка в области низких частот в несколько раз меньше вещественной. Это характеризует слабый вклад реактивных токов в вертикальную компоненту. Лишь на периодах 100 и 800 с выражены максимумы **ImC**, отражающие незначительный вклад реактивных токов. Вещественные и мнимые стрелки коллинеарны в диапазоне периодов от 20 до 1000 с, что характеризует двумерно-неоднородный геоэлектрический разрез. Они ориентированы поперек глубинного разлома в районе п. Тырган. (рис.1). При увеличении периодов (1000 – 10000 с) стрелки становятся ортогональными, что отражает трехмерность геоэлектрической среды. Следует отметить, что на периоде 1000 с слабо выраженному максимуму кривой **|ReC|** отвечает минимум кривой **|ImC|**. На этом же периоде происходит изменение азимутов мнимой стрелки. Можно предполагать, что в длиннопериодном диапазоне на поведение стрелок скорее всего оказывают влияние северные и южные фланги рифтовой зоны, за счет которых неоднородность отличается от двумерной. Это отражается в поведении стрелок, которые становятся почти ортогональными, что характерно для проводящих зон сложной формы.

Обратимся к частотной характеристике электрического вектора (рис.3б). Норма вектора имеет максимум на периодах 500 - 1000 с. На этих периодах фаза вектора приближается к нулю, что отражает преобладающий вклад активных токов, насыщающих проводящую зону.

Частотная кривая $\max |C_{zx}|$ (рис.4в) подобна кривой **|ReC|**. Это обусловлено тем, что основной вклад в вертикальное электрическое поле дают активные электрические токи. Азимут $\max |C_{zx}|$ в диапазоне периодов от 20 до 1000 с почти не меняется и равен около 130° , т.е. вкост простирания разлома. На периодах более 1000 с азимут уменьшается до 80° , что обусловлено трехмерной неоднородностью среды.

Представление о влиянии геоэлектрических неоднородностей на различных периодах дают также электрические полярные диаграммы. На них хорошо видна сходимость лепестков в начале координат на периодах от 50 до 1000 с. Это свидетельствует о двухмерности геоэлектрической среды. Оси лепестков направлены вкост простирания разлома. Расходимость этих лепестков на периоде 7200 с указывает на влияние трехмерных неоднородностей. При увеличении периода от 50 до 7200 азимут уменьшается на 30° .

Рассмотрим частотные характеристики электрического типпера и их изменение во времени. Компоненты типпера определены из соотношения: $E_z = P_{zx}E_x + P_{zy}E_y$.

Точность определения компонент типпера зависит от длины временного интервала и когерентности между вертикальной и горизонтальными составляющими электрического поля. Поэтому предварительно выбраны оптимальные условия, при которых компоненты типпера определяются устойчиво в диапазоне периодов от первых минут до первых часов. Анализ показал, что при регистрации с дискретностью 10 с временной интервал должен быть не менее 3 суток, а когерентность не менее 0.8. Для обработки создана специальная программа, позволяющая из поступающего массива цифровых данных формировать временные интервалы необходимой длины и определять компоненты типпера в широком диапазоне периодов. В результате обработки данных получены временные ряды параметров типпера на периодах от 70 с до 12000с. Сравнительный анализ временных рядов в указанном диапазоне периодов показывает, что аномальные изменения типпера в связи с землетрясениями выражены более контрастно на периодах 100-1000 с. на более длинных периодах аномальные возмущения затухают. На периоде 12000 с они практически уже не выражены. Сопоставление временных рядов модуля вещественной стрелки, нормы и модуля максимальной компоненты типпера свидетельствует, что они даже в деталях подобны между собой. Это обусловлено тем, что среда является близкой к двумерно-неоднородной и основной вклад в вертикальную компоненту вносят активные электрические токи, за счет которых вещественная часть типпера почти на порядок больше мнимой.

На рис.4 мы в качестве примера привели модули вещественных и мнимых стрелок на периоде 330 с за время наблюдений с 01.08.2003 г. по 06.02.2006 г. Временные ряды указанных параметров сопоставлены с моментами сильных землетрясений с $K \geq 12.4$, происшедших за рассматриваемый период на эпицентральных расстояниях до 300 км. В графиках $|\text{ReC}|$ видны аномальные изменения, которые могут быть связаны с землетрясениями. Эти аномалии проявляются следующим образом. Перед землетрясениями с $K \geq 12.4$ во временных рядах указанных параметров выделяется 1,5 – месячный интервал с увеличенной дисперсией. В его начале изменяется фаза электрического вектора. За 9 суток перед обоими землетрясениями с $K=12$ и $K=12.4$ параметры $|\text{ReC}|$, $|\text{ImC}|$, $\max|C_{zx}|$ возрастают в несколько раз. Такой эффект обнаружен впервые. Также следует обратить внимание на изменение параметра $|\text{ReC}|$ в конце марта. Его можно увязать с землетрясениями $K=11$, но эта работа требует специальных исследований и выходит за рамки настоящей статьи.

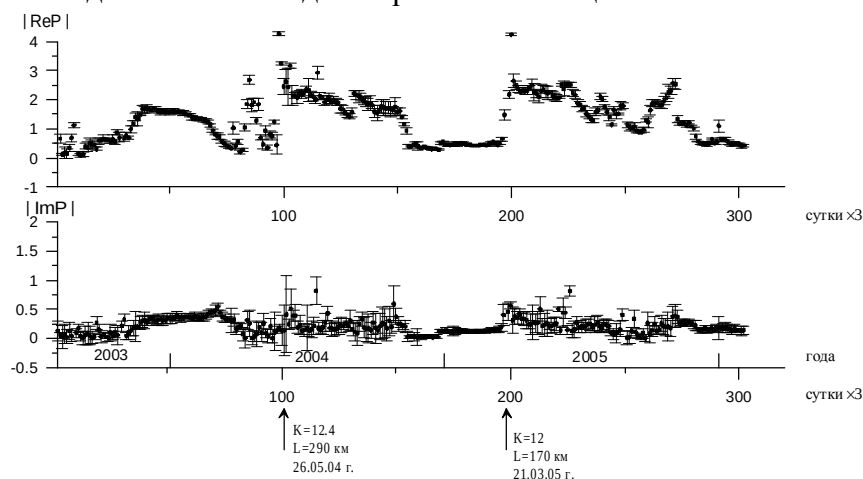


Рис.4. Графики модулей вещественных и мнимых электрических стрелок на периоде 330 с в п. Тырган. Период наблюдений: 01.08.2003-06.02.06 гг. На временной оси показаны моменты землетрясений с $K \geq 12$ на эпицентральных расстояниях (L) до 360 км.

Какова природа выявленных аномальных изменений? По-видимому, на поведение типпера могут влиять локальные геоэлектрические неоднородности верхних частей земной коры, вызывающие гальванические аномалии электрического поля. Одной из таких неоднородностей может оказаться разлом северо-восточного простирания в районе п. Тырган. При геодинамических процессах, связанных с подготовкой землетрясения,

возможно изменение степени обводненности и минерализации вод в зоне разлома, что может соответственно изменить вклад активных токов в вертикальную компоненту электрического поля.

Выводы

Мониторинг вертикальной и горизонтальной составляющих электрического поля земли в частотно-временной области даёт возможность получить информацию о состоянии геологической среды в связи с геодинамическими процессами в Байкальской рифтовой зоне. Для извлечения этой информации предлагается (по аналогии с геомагнитным полем) ввести электрический типпер, связывающий вертикальную и горизонтальные составляющие электротеллурического поля. Типпер отражает распределение электрических токов в районе геоэлектрической неоднородности. Представление типпера в виде вещественных и мнимых электрических стрелок и электрического вектора позволяет оценить характер геоэлектрической неоднородности и вклад активных и реактивных токов в вертикальную составляющую электротеллурического поля. Особенно информативным является электрический типпер при изучении трёхмерных геоэлектрических неоднородностей.

Мониторинг электрического типпера с 2003 по 2005 гг. выполнен в п. Тынган. По данным частотно-временного анализа выявлены аномальные изменения в параметрах электрического типпера на периодах от 100 до 1000с, которые могут быть связаны с землетрясениями с $K = 12$ и $K = 12,4$. Аномалии проявляются в увеличении вещественного типпера в несколько раз примерно за 9 суток до землетрясения. Они вызваны перераспределением активных электрических токов в районе разлома, где возможны изменения уровня и минерализации вод перед землетрясением.

Список литературы

1. Бердичевский М.М. Электрическая разведка методом теллурических токов. –М. Гостоптехиздат. 1960. – 231 с.
2. Бердичевский М.М., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электрического поля Земли. – М.; Недра. 1981. –327 с.
3. Бердичевский М.М., Нгуен Тхань Ван. Магнитовариационный вектор // Физика Земли. 1991. С. 52-62.
4. Солоненко В.П. Хилько С.Д. Павлов О.В. Сейсмотектоника // Сейсмотектоника и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья.//М.:Наука.1968.С.123-143
5. Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiedelisi A. and Rieven S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions// Geophysical Journal International. 1996.V.124.P.801-819.
6. Parkinson W.D. Direction of rapid geomagnetic fluctuation // Geophys. J. 1959. V.2. P. 1-14.
7. Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the South-Western United States. Berkley Los – Angeles – London: Univ. California Press. 1970. 165 p.
8. Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics. 1972. V. 37. P. 98-141.
9. Wiese H. Geomagnetische Tiefentelluric. Berlin: Deutsche Akad. Wiss. 1965. 146 p.

СВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ТАЙФУНАМИ CONNECTION OF SEISMIC PROCESSES WITH TYPHOONS

Л.И. Морозова

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН

In contrast to previous works, we used online cloud cover images transmitted every one hour from geostationary meteorological satellite, in addition to surface weather chart, to locate a typhoon in the Pacific Ocean. Interposition of the seismic centers and typhoons at different stages of its development in space images is shown. The space images of cloud cover provide a more precise and vivid idea of the typhoon's position relative to seismic sources. Earthquakes occurred within the first two days from the moment of typhoon passage near epicenter. An analysis of the spatiotemporal interrelation of seismicity and typhoons demonstrated that, in the initial period of two days (including the moment of the typhoon's passage), 80% of earthquakes (from a total of 59) occurred near the typhoon track in four days. All disastrous earthquakes ($M \geq 6.0$) occurred in the initial two days.

Помимо атмосферных процессов, соответствующих критерию катастрофических, тайфуны иногда сопровождаются землетрясениями. Представляет интерес использование внешнего по отношению к земной коре воздействия – вариаций атмосферного давления, обусловленных прохождением тайфуна. Регистрируемая вдоль траектории тайфуна сейсмичность свидетельствует об отклике верхних слоев земной коры на внешнее воздействие. В данном исследовании предстояло эмпирически определить время запаздывания сейсмического события по отношению к моменту прохождения тайфуна, а также влияние тайфуна на энергию землетрясения. В России изучением механизма воздействия тайфунов на сейсмичность занимались А.Д. Сытинский, М.И. Ярошевич, С.Н. Нетреба [6,8,5]. А.Д. Сытинским было установлено, что сильные землетрясения происходят во время планетарных возмущений атмосферы, энергия которых превосходит энергию землетрясений. Теоретические исследования влияния веса столба атмосферы на тектоническую плиту провел в Германии Visser S.[9]. В работе А.А.Любушина [3] было показано, что “пространственный радиус корреляции барообразований с периодом несколько суток и земной коры составляет сотни километров. Для пульсаций с периодами порядка 10 ч и ниже радиус корреляции баровариаций может стать соизмеримым с характерным размером блоков земной коры”.

Тайфуны изменяют напряжения внутри слоев земной коры, могущие быть причиной для разрыва неустойчивых зон в сейсмических областях. Изменения давления над водной поверхностью передаются в земную кору посредством внутренних гравитационных волн [1]. Энергия тайфуна является дополнительной к тектонической потенциальной энергии, а сильные вариации атмосферного давления являются эффективными триггерами в сейсмически неустойчивых областях.

Перемещаясь, тайфуны вызывают существенные изменения термодинамической структуры океана, образуя так называемый термический след. Индуцируемая тайфуном полоса охлажденной воды на поверхности океана является причиной, по которой следующий тайфун отклоняется от траектории предыдущего. Температура поверхности воды для зарождения и существования тайфуна должна быть выше $+26^{\circ}\text{C}$.

В отличие от работ предшественников, для определения положения тайфуна в Тихом океане помимо приземных карт погоды использовались оперативные снимки облачности с геостационарных метеорологических спутников. Космические снимки позволяют косвенно определить горизонтальный масштаб области природной катастрофы, взаиморасположение тайфуна и эпицентров землетрясений в его зоне, обеспечивая охват картины в целом на обширном пространстве. Определение положения тайфунов в пространстве по снимкам (до 10 в сутки) более точно, чем на приземной карте погоды (составляемой 4 раза), что очень важно для определения последовательности землетрясения и момента прохождения тайфуна над эпицентром.

Слабое землетрясение к югу от о.Хоккайдо 2.09 произошло спустя сутки после прохождения тайфуна над эпицентром.

Таблица 1

Землетрясения тайфуна Chaba

date [GMT]	lat	lon	depth	mb	region name
2004/08/26 11:38:06	28.03N	139.45E	503	4.5	BONIN ISLANDS, JAPAN REGION
2004/08/27 10:06:43	45.08N	142.25E	276	4.1	HOKKAIDO, JAPAN REGION
2004/08/28 18:24:08	32.02N	141.45E	42	4.6	IZU ISLANDS, JAPAN REGION
2004/08/29 00:55:06	55.41N	166.25E	19	4.7	KOMANDORSKIYE OSTROVA
2004/08/30 12:23:25	49.52N	157.29E	35	5.7	EAST OF THE KURIL ISLANDS
2004/08/30 23:22:15	24.39N	121.61E	75	4.6	TAIWAN
2004/09/01 02:49:28	36.94N	141.61E	35	5.7	NEAR THE EAST COAST OF HONSHU
2004/09/01 14:10:21	28.80N	129.96E	56	4.5	RYUKYU ISLANDS, JAPAN
2004/09/02 22:01:21	42.45N	142.75E	60	4.3	HOKKAIDO, JAPAN REGION

Тайфун Meari (22 сентября – 1 октября 2004 г) дошел до юга Курильской гряды (рис. 2). Минимальное давление составило 920 гПа, вблизи Курильской гряды 990 гПа. В период движения тайфуна по Филиппинской плите 23.09 были зарегистрированы толчки у ее границы 23.09 и к югу от о. Хоккайдо 22.09 (табл. 2). Сейсмические события этих дней на Курилах и Камчатке происходили на фоне западного циклона. Пересечение тайфуном границы Филиппинской плиты сопровождалось землетрясениями на севере плиты и на ее границах на востоке и западе. При движении тайфуна над Японскими островами землетрясения там не отмечались.

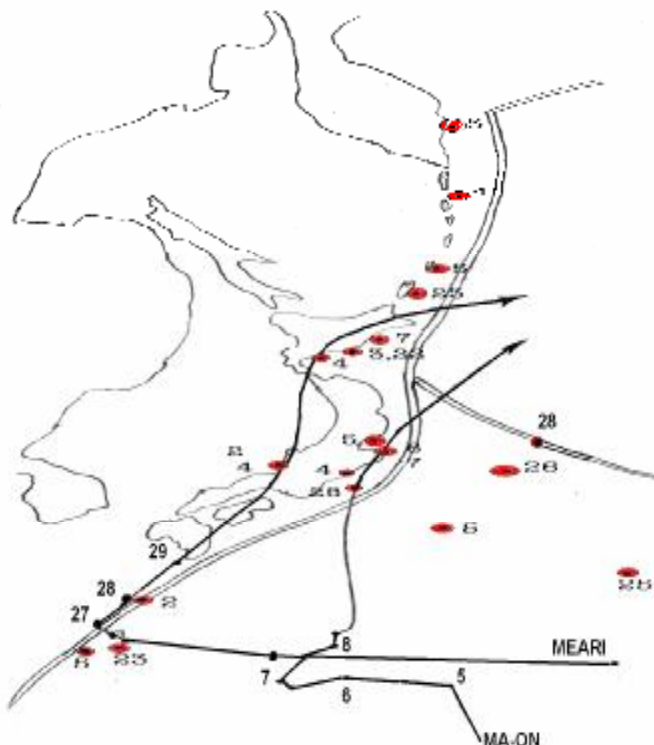


Рис.2. Схема траекторий тайфунов Meari и Ma-On и эпицентры землетрясений.

Тайфун Ма-Он (3 - 10 октября) (рис. 2). При движении тайфуна над Филиппинской плитой почти все землетрясения отмечались вдоль границы Евроазиатской и Тихоокеанской плит – от о. Тайвань до п-ва Камчатка (табл. 2). Близко расположенные на о. Хонсю очаги могли быть обусловлены как этим тайфуном, так и прохождением 6.10 западного циклона. Дополнительную неустойчивость здесь земной коре создает угол сочленения трех плит. 7.10 землетрясения на островах Хоккайдо и Хонсю отмечались при давлении в тайфуне - 953 гПа, в период его максимальной энергетической активности.

Можно допустить, что удаленные землетрясения Камчатки и Курильской гряды являются результатом воздействия тектонических волн, порожденных тайфуном на юге [7].

Землетрясения тайфуна Meari

date [GMT]	lon	lon	depth	mb	region name
2004/09/22 11:03:52	41.41	141.32	111.4	5.0	HOKKAIDO, JAPAN REGION
2004/09/23 01:05:26	25.08	127.19	50.6	4.8	RYUKYU ISLANDS, JAPAN
2004/09/23 01:55:26	25.04	127.06	39.1	5.3	RYUKYU ISLANDS, JAPAN
2004/09/23 12:14:57	44.51	148.54	60.5	4.3	KURIL ISLANDS
2004/09/23 22:30:06	55.6	159.97	199.4	4.3	KAMCHATKA PENINSULA
2004/09/25 01:15:3	23.93	141.81	171.0	4.3	JAPAN REGION
2004/09/26 21:38:0	32.06	142.01	27.9	4.3	IZU ISLANDS, JAPAN
2004/09/28 05:33:58	32.39	141.29	52.4	4.6	IZU ISLANDS, JAPAN REGION

Таблица 3

Землетрясения тайфуна Ma-On

date [GMT]	lon	lon	depth	mb	region name
2004/10/02 15:22:15	27.92	127.70	78.7	5.1	RYUKYU ISLANDS, JAPAN
2004/10/02 23:00:20	33.42	136.73	8.5	4.7	NEAR S. COAST OF HONSHU
2004/10/03 23:41:25	41.93	142.40	88.2	4.7	HOKKAIDO, JAPAN
2004/10/04 23:33:51	35.87	136.28	10.0	4.4	WESTERN HONSHU
2004/10/05 00:24:32	29.75	138.74	415.3	4.1	IZU ISLANDS, JAPAN
2004/10/05 00:04:41	43.61	151.09	67.4	4.5	EAST OF KURIL ISLANDS
2004/10/05 22:10:04	24.83	125.14	80.9	4.5	RYUKYU ISL., JAPAN
2004/10/06 14:40:39	35.88	139.96	61.9	5.8	NEAR S. COAST OF HONSHU
2004/10/06 14:40:39	35.88	139.96	61.9	5.8	NEAR S. COAST OF HONSHU

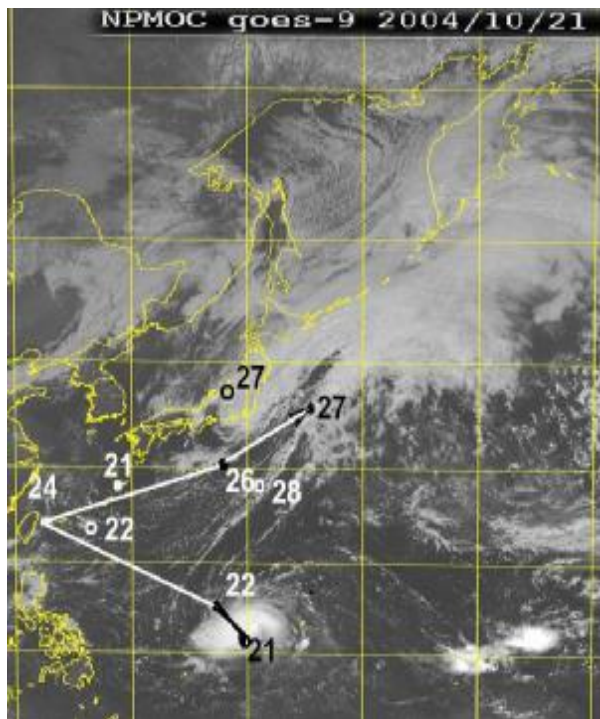


Рис.3.Траектория тайфуна Nock-Ten и эпицентры землетрясений

Тайфун Nock-Ten (21-27.10.2004)

заполнился над Филиппинской плитой (рис. 3). На снимке, запечатлевшем начальную стадию тайфуна, показана его траектория и эпицентры порожденных им землетрясений. При движении тайфуна над плитой отмечены толчки на границе плиты 21 и 22.10. Вблизи границы плиты в г. Ниигата 27.10 повторно произошло сильное землетрясение, ранее -23.10 отмечавшееся в связи с прохождением тайфуна Tokage (на снимке его центр располагается у восточного побережья о. Хонсю), в японских средствах массовой информации названного причиной этого катастрофического землетрясения [4]. Тайфун, проходя на минимальном расстоянии от эпицентра, вновь оказал триггерное воздействие на тектонические напряжения в области очага при довольно высоком давлении в тайфуне (1006 гПа). Очаг на севере плиты 28.10 возник спустя сутки после прохождения тайфуна. Во время движения тайфуна над

Филиппинской плитой землетрясения происходят как на самой плите, так и на ее границе, причем, на границе значительно чаще.

Землетрясения тайфуна Nock-Ten

date [GMT]	lon	lon	depth	mb	region name
2004/10/21 10:09:21	28.70N	129.46E	100.9	4.8	RYUKYU ISLANDS, JAPAN
2004/10/22 13:44:17	25.00N	128.02E	43.3	4.9	RYUKYU ISLANDS, JAPAN
2004/10/27 01:40:50	37.26N	138.86E	15.7	6.0	NEAR WEST COAST OF HONSHU
2004/10/28 04:54:29	29.60N	140.51E	124.6	4.7	IZU ISLANDS, JAPAN

По А.Д. Сытинскому, необходимым условием возникновения сильного землетрясения является большая скорость смещения тайфуна, сопровождающаяся значительной скоростью падения давления в течение суток. Эти условия выполнялись при прохождении супертайфуна «Маэми» над Японским морем 12.09.2003 г, когда давление в нем менялось от 965 до 980 гПа. С ним произошло три землетрясения в течение 5 часов $M = 4.2 - 4.4$. Однако медленное смещение тайфуна над Камчаткой 12.08.2003 г с давлением 990 гПа не должно было закончиться землетрясением, тем не менее, оно осуществилось с $M = 5.1$. В другом случае - медленное смещение здесь западного циклона с высоким давлением в центре (1004 гПа) 12.09.2003 г, также сопровождалось толчком $M = 4.4$.

В моменты землетрясений на Японских о-вах давление в тайфунах составляло 910 - 995 гПа, а на Камчатке, в уже заполняющихся тайфунах 980 - 1010 гПа. Тайфуны с низким давлением 945-970 гПа сопровождались землетрясениями $M = 4.2 - 8.1$, на высоком поле давления землетрясения имели значения магнитуд менее 5.0 .

На основе феноменологической связи землетрясений с прохождением тайфуна установлено время запаздывания сейсмического события по отношению к моменту прохождения тайфуна, а также влияние тайфуна на энергию землетрясения. Для оценки времени отклика литосферы на колебания атмосферного давления, обусловленные тайфуном, подсчитывалось число землетрясений сначала в период до двух суток с момента его прохождения вблизи очага, затем спустя еще такое же время. Анализ пространственно - временной связи сейсмичности и тайфунов показал, что в первый двухдневный период прохождения тайфуна вблизи его траектории произошло 80% землетрясений от их общего количества (59); учитывались только гипоцентры на глубинах менее 80 км (табл.5). Если бы тайфуны не оказывали триггерного воздействия на сейсмические процессы, количество землетрясений в обоих столбцах было бы одинаковым. Из 13 тайфунов 46% сопровождались землетрясениями $M \geq 6.0$.

Возможно, что изменение направления движения тайфунов (с северо-западного на северо-восточное) над границей плит происходит под влиянием геофизических полей литосферы, а не в результате различия термодинамических свойств подстилающей поверхности на границе суша-океан, как принято считать.

Полученные связи резкого изменения атмосферного давления с последующим землетрясением позволяют рассматривать землетрясение не только как геологическое, но и как атмосферное явление.

Сейсмичность в периоды тайфунов

Периоды тайфунов	Количество землетрясений		Интервал магнитуд
	за первые	за вторые	
	двое суток		
8-12.08.2003	4	2	4.4-5.0
17-20.08	3	0	4.7-5.5
30.08-2.09	2	0	5.2-5.4
10-15.09	3	2	4.2-5.3
20-25.9	1	1	4.2-8.1
10-12.11	4	1	4.4-6.4
29.06-5.07.2004	9	2	3.9-5.1
26.08-2.09	4	1	4.1-5.7
5-9.09	3	2	4.3-7.2
23-30.09	2	0	4.3-5.3
4-10.10	2	0	4.1-6.5
14-22.10	8	0	4.2-6.7
22-27.10	2	1	4.3-6.0
	47(80%)	12 (20%)	

Список литературы

1. Алексеев В.В., Киселева С.В., Лаппо С.С. Лабораторные модели физических процессов в атмосфере и океане. – М.: Наука, 2005. –312 с.
2. Куснер Ю.С., Леви К.Г., Потемкин В.Л. Атмосферно-литосферное взаимодействие в рое Южно-Байкальских землетрясений, январь-февраль 1999 г. Материалы Всероссийского совещания “Современная геодинамика и сейсмичность Центральной Азии: фундаментальные и прикладные аспекты”. Иркутск. Институт земной коры СО РАН, 20 – 23 сентября 2005 г. Вып. 2. Иркутск. 2005. С. 58 -64.
3. Любушин А.А. (мл.) Периодичности и катастрофы во взаимодействии геофизических процессов. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 2. М. Научный мир, 1998. С. 380-385.
4. Морозова Л.И. Тайфуны и сейсмичность // Доклады АН. 2006. Том 410, № 3. С. 397- 400.
5. Нетреба С.Н. Усиление инфразвука при атмосферной конденсации // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 6. С. 817 – 826.
6. Сытинский А.Д. Об одном солнечно-атмосферном эффекте во время сильных землетрясений // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. № 6. С. 1337-1340.
7. Хаин В.Е. Глобальная геодинамика на пороге нового века // Геотектоника. 2002. № 4. С. 3 - 13.
8. Ярошевич М.И. Тропические циклоны и сейсмическая активность // Докл. АН СССР. 1991. Т. 316. № 1. С. 88–92.
9. Visser S.S. Tropical cyclones in the Northeast Pacific, between Hawaii and Mexico // Montly Weather Rev. 1922. Vol. 50. P. 288-295.

ПОЛОСЫ ПОМЕХ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ КАК КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

STRIPS OF IMAGE DISTORTIONS ON SATELLITE IMAGES AS SHORT-TERM EARTHQUAKE PRECURSORS

Л.И. Морозова

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН

The space-time relation between the epicenters of earthquakes position and strips of image distortions on scanner satellite meteorological images was empirically investigated. The expediency of usage of such images in the short-term seismicity forecast is pointed out.

В Центре приема и обработки спутниковой информации снимки со значительными искажениями изображения отбраковывались. Искажения представляют собой полосы, широтно пересекающие снимок (см. рис.). Просматривая такие снимки, я обнаружила, что полосы проходят вблизи эпицентра в ближайший к землетрясению момент времени, до или после него.

Метеорологические спутники работают в УКВ диапазоне. Электромагнитное излучение из разломов, усиливающееся в период подготовки землетрясения, ухудшает условия прохождения радиоволн в волноводе Земля – ионосфера, нарушая работу приборов на спутнике вследствие чего часть передаваемой ими визуальной информации (снимка) искажается.

Сопоставление временных и пространственных параметров сильных землетрясений с авиационными происшествиями показало, что наибольшее число авиационных катастроф приходится на день, предшествующий сильному землетрясению [1].

Аномально большие значения электромагнитной энергии выводят из строя навигационные приборы самолетов, трассы которых обычно проходят на высоте до 12 км. Для сейсмических процессов характерна диссипация энергии на высоких частотах; она нарушает условия распространения радиоволн в атмосфере. Спутники передают информацию в УКВ диапазоне в Центр приема и обработки, где она преобразуется в снимки поверхности и облачных полей Земли. При пролете над сейсмическим очагом на них возникает искажение изображения, обусловленное радиопомехами. На снимке образуется двумерная полоса, отражающая трехмерный процесс в земной коре. Поскольку снимки сканерные, то есть изображение состоит из отдельных полос – искажение распространяется на всю ширину снимка; долгота эпицентра остается неизвестной – географическое положение эпицентра определяется только широтой местности. Тем не менее, положение полос на снимке позволяет вполне определенно связать каждую полосу с близлежащим эпицентром. Эта аномалия относится к предвестникам в широком смысле: она не позволяет указать место будущего эпицентра землетрясения – только широту региона и время.

Чередование линейных облачных аномалий и полос радиопомех наблюдалось перед катастрофическими землетрясениями в Индии 29.09. 1993 г. и Китае 1.12. 1993 г. [3], в Японии (Кобе) 17.01. 1994 г. и на Сахалине (Нефтегорск) 28.05.1995 г. [4], строго через эпицентр проходила полоса радишумов перед землетрясением $M = 8.1$ с эпицентром к югу от о. Хоккайдо [5], перед Корякским землетрясением 21 апреля 2006 г. [2].

В выборку землетрясений периода с августа по ноябрь 2003 г. вошли землетрясения Тихоокеанского региона, сопровождающиеся помехами на снимках; исходной информацией являлись спутниковые снимки с искажением изображения (табл.). Снимки со спутников системы NOAA принимались до семи раз в сутки в Хабаровском спутниковом центре, данные по землетрясениям получены по Интернету [7].

Таблица

Параметры полос искажения изображения на снимке
и магнитуда землетрясений

Дата	Время	Расстояние полосы до эпицентра (км)	Появление полосы относительно толчка (час/мин)	Магнитуда
снимка				
09.08. 2003	08: 48	825	74: 57	5.1
10.08	03: 20	60	56: 25	5.1
11.08	08: 01	60	27: 41	5.1
		0	41: 17	4.6
	21: 55	0	47: 33	4.0
12.08	07: 39	105	4: 06	5.1
		0	17: 40	4.6
31.08	22: 23	450	-0: 26	4.4
12.09	07: 10	250	2: 10	4.7
	10: 30	150	-1: 11	4.7
		0	1: 08	4.4
	21.01	75	-29: 40	4.2
		0	-34: 40	4.4
		75	-30: 34	4.4
13.09	02: 01	300	-16: 41	4.4
	20: 36	0	-53: 13	4.4
		0	-68: 15	4.2
22.09	03: 38	0	88 :12	8.1
	08: 11	0	83:29	
	20: 24	0	71.26	
30.09	20: 36	150	-11: 46	4.8
20.10	21: 07	0	56: 00	4.2
23.10	09: 22	150	-4:22	4.2
30.10	22: 10	375	2:56	6.8
31.10	07: 53	0	-6:47	6.8
	09: 37	без ЗТ		
		без ЗТ		
12.11	20: 48	0	11: 38	6.4

В работе [6] отмечены аномальные явления в прохождении радиоволн в коротковолновом диапазоне частот в ночные часы на расстояниях в первые сотни километров за несколько суток до землетрясения. Радиошумы, обуславливающие полосы искажения изображения на снимках, отмечались не только ночью, но и днем. Полос было больше, чем сейсмических событий, поскольку полосы появлялись до и после толчка и не единожды, кроме того, они отмечались и без регистрируемой сейсмичности. Ширина полос на местности составляла от 15 до 900 км. В таблице период времени появления полос, возникших после землетрясения, дан со знаком минус. Полосы искажения изображения фиксировались на снимках не ранее, чем за двое суток до подземного толчка и не позднее такого же периода после него; чаще интервал времени составлял несколько часов.

Расстояние от эпицентра до края полосы на снимке характеризует тесноту связи сейсмического процесса с моментом нарушения условий прохождения радиосигнала вблизи очага. Из 27 случаев возникновения полос на 21 снимке во время сейсмических

событий 23 полосы (79.3%) отмечались в непосредственной близости от очага, на расстоянии не более 150 км; в 48.3 % очаг находился под полосой или на ее границе. Заблаговременность появления полос перед толчком, как и их последствие, как правило, не более двух суток. Как известно, этот период времени соответствует наиболее интенсивной фазе деформирования земной коры.

В качестве ключа к таблице приводится описание анализа снимка на рис.1. На снимке 11августа полоса южнее Камчатки, предшествовала толчку $M = 5.1$ 12.08 в близлежащем эпицентре, полоса через о. Хоккайдо сопровождалась землетрясением на юге острова $M = 4.6$ 13.08, третья полоса на севере о. Хонсю не связана с конкретным очагом; возможно, она обусловлена сейсмическим процессом на о. Хоккайдо.

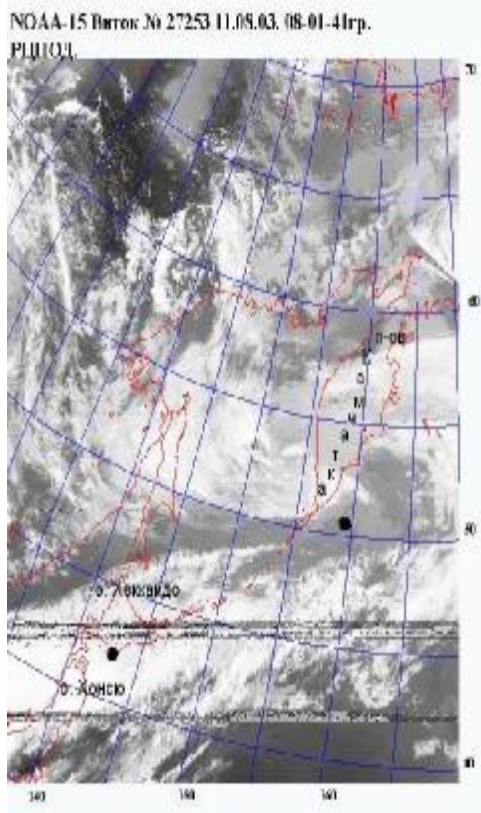


Рис.1. Полосы искажения изображения на снимке, предшествующие землетрясениям вблизи юго-восточного побережья Камчатки и на о. Хоккайдо. Эпицентры обозначены точками.

На снимке 12.09 в 10 ч 30 мин (табл.) полоса через Камчатку возникла в промежутке между двумя толчками, поэтому интервалы ее появления над будущим очагом после первого и перед вторым толчками неодинаковые и с разным знаком (минус 1 ч 11 мин и плюс 1 ч 8 мин, соответственно). Две полосы искажения через о. Хонсю, одна зафиксированная на снимке 30.10 в 22 ч 10 мин за 2 ч 56 мин до землетрясения 31.10 $M=6.8$ и в особенности другая (31.10 в 7 ч 53 мин), возникшая спустя 6 ч 47 мин после него пространственно были тесно связаны с эпицентром (375 и 0 км, соответственно).

Перед землетрясением на о. Хонсю 12.11.2003 г. на снимке, полученном за 11 ч 38 мин до толчка, отмечались три полосы радиозумов (одна через эпицентр) на пространстве в 1375 км к северу от очага.

Если на снимке наблюдается полоса радиозумов, а землетрясение еще не произошло, то не позднее двух суток в сейсмоопасном регионе вблизи полосы с вероятностью 94% следует ожидать землетрясение. Информационная значимость полос на спутниковых снимках Земли, обусловленных сейсмическими процессами, заключается в возможности их использования в качестве оперативного предвестника землетрясений.

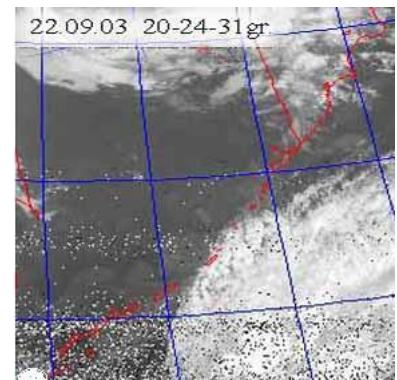
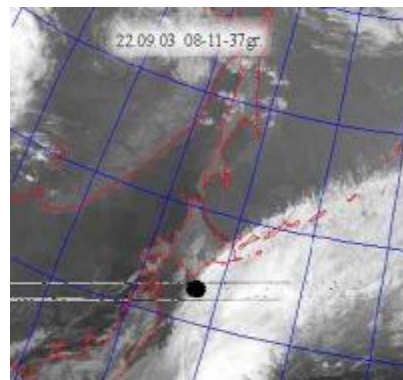
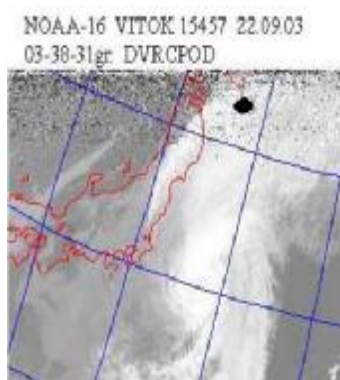


Рис.2. Полосы радиопомех на снимках 22.09 2003 г. через эпицентр землетрясения $M = 8.1$ у южного побережья о. Хонсю 25 сентября 2003 г.

Список литературы

1. Ананьин И.В., Мерзлый А.М., Сорокин Л.В. Сопоставление временных и пространственных параметров сильных землетрясений с авиационными происшествиями // Атлас временных вариаций природных и антропогенных процессов. Т. 3. –Москва.: Янус-К, 2002. С. 278 – 281.
2. Морозова Л.И. Тектонические процессы в период Корякского землетрясения 21 апреля 2006 г. // Современные проблемы регионального развития. Хабаровск. ДВО РАН, 2006. С. 113 – 115.
3. Морозова Л.И. Особенности проявления лито-атмосферных связей в периоды сильных землетрясений Азии // Физика Земли. 1996. № 5. С. 63-68.
4. Морозова Л.И. Спутниковые метеорологические снимки как носители информации о сейсмических процессах // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17. № 2. С. 136 – 140.
5. Морозова Л.И. Тайфуны и сейсмичность // Докл. РАН. 2006. Т. 410. № 3. С. 397 – 400.
6. Моргунов В.А., Шахрамьян М.А. Задачи оперативного прогноза землетрясений // Докл. РАН. 1996. Т. 349, № 6. С. 818 - 821.
7. <http://www.ceme.gsr.ru>.

ФОРМИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

FORMATION OF IONOSPHERIC EARTHQUAKE PRECURSORS BY ELECTRIC FIELD

А.А. Намгаладзе¹, М.В. Клименко², В.В. Клименко³, И.Е. Захаренкова³

¹*Мурманский государственный технический университет,*

²*Калининградский государственный технический университет,*

³*Западное Отделение ИЗМИРАН*

A physical mechanism has been proposed for the forming of areas of increased or decreased total electron content (*TEC*) in the ionosphere as observed by the measurements of the GPS signal delays before strong earthquakes. The main cause of these *TEC* disturbances is the vertical plasma transport under the action of the zonal electric field directed eastward in cases of the positive *TEC* disturbances at midlatitudes and in cases of deepening of the F2-region equatorial anomaly minimum. The spatial potential pattern for such electric field was proposed. For the eastward electric field existence at the near-epicentral region it is necessary, that the positive electric charges were located at the western boundary of this region, and the negative charges at the eastern boundary. To investigate an efficiency of the proposed mechanism the numerical model calculations were performed. The ionosphere reaction to the action of the electric field created by such configuration of electric charges was calculated. The numerical calculation results revealed an excellent agreement with the *TEC* observations before strong earthquakes at mid- and low latitudes.

Поиски ионосферных предвестников землетрясений ведутся в течение последних двух десятилетий (см. ссылки в работе [3]. Широкое применение для исследования ионосферных эффектов сейсмической активности нашло использование системы спутников GPS и сети приёмников радиосигналов этих спутников [11; 17]. С помощью измерений временных задержек этих сигналов можно осуществлять картирование *TEC* и изучать его временную эволюцию.

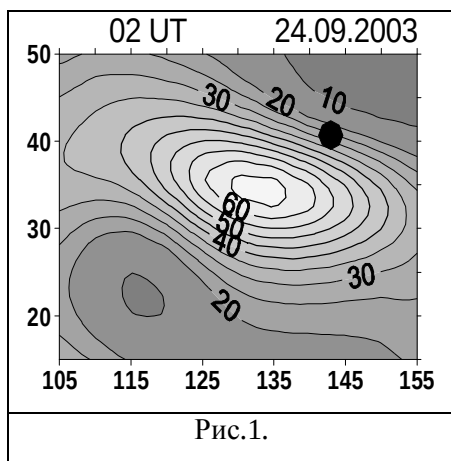


Рис.1.

может достигать -30% относительно невозмущенных значений [8]. В спокойных геомагнитных условиях смена знака сейсмо-ионосферного возмущения может трактоваться как сигнал приближающегося землетрясения.

На рис.1 показано характерное возмущение TEC , наблюдавшееся перед среднеширотным землетрясением 25 сентября 2003 г. в Японии [3].

Перед сильными приэкваториальными землетрясениями их предвестниками являются углубление и расширение минимума электронной концентрации над магнитным экватором в дневное время и смещение гребней аномалии [9; 2; 17]. На рис.2 показана сейсмогенная экваториальная аномалия (черные кружки) в ионосфере за день до землетрясения в Чили 12.04.1963 по данным спутника Alouette-2. Другими линиями показаны вариации $foF2$ в невозмущенное время (до и после землетрясения). EQ – положение эпицентра (16).

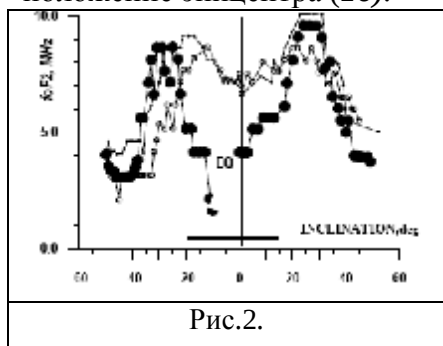


Рис.2.

В работах [3; 17] показано, что для сильных среднеширотных землетрясений эффекты в TEC имеет вид локального увеличения электронной концентрации, которое наблюдается за 2-3 суток до землетрясения, причем максимум возмущений расположен в непосредственной близости от эпицентрального района. Область занимает несколько тысяч километров по долготе и около 1000 км по широте. По мере приближения к началу землетрясения амплитуда возмущения увеличивается до 40-100% относительно фонового уровня. За 10-30 час. до землетрясения электронная концентрация над эпицентральной областью уменьшается. Величина "отрицательного" эффекта

Физическая интерпретация формирования ионосферных предвестников землетрясений предложена в работах [10; 15] и базируется на гипотезе о сейсмогенном электрическом поле амплитудой от единиц до десятков мВ/м (12). В пользу этой гипотезы говорят магнитная сопряженность ионосферных предвестников [14] и упомянутые эффекты в экваториальной аномалии [9; 17].

В работе [6] был проведен анализ возможных физических механизмов формирования возмущений TEC с характерными для предвестников пространственно-временными масштабами и было высказано предположение, что главной причиной возникновения областей повышенного (пониженного) TEC в ионосфере, наблюдаемых с использованием измерений задержек сигналов спутников GPS перед сильными землетрясениями [3], является вертикальный перенос плазмы F2-области ионосферы вверх (вниз) под действием восточного (западного) электрического поля.

В средних широтах вертикальная составляющая электромагнитного дрейфа, создаваемая восточным полем и направленная вверх, приводит к увеличению N_mF2 за счёт переноса плазмы на большие высоты с меньшей скоростью потерь [1]. Западное поле вызывает отрицательный эффект в N_mF2 . В низких широтах усиление восточного поля углубляет провал над магнитным экватором в широтном ходе электронной концентрации за счёт усиления фонтан-эффекта.

Для существования восточного электрического поля в околоэпицентральной области необходимо, чтобы на западной границе этой области были расположены положительные электрические заряды, а на восточной – отрицательные.

Для проверки высказанной гипотезы и выяснения эффективности предложенного механизма в данной работе выполнены модельные расчёты реакции ионосферы на

действие электрического поля, создаваемого такой конфигурацией зарядов в окрестности эпицентра землетрясения для случаев среднеширотных и приэкваториальных землетрясений.

Расчёты проводились с использованием глобальной численной модели [13, 7], модифицированной в части решения уравнения для электрического потенциала [4, 5]. Анализ результатов модельных расчётов проводился на основе сопоставления глобальных карт распределения различных ионосферных параметров, полученных без дополнительных и с дополнительными, предположительно сейсмогенными, источниками электрического поля.

За невозмущённое состояние принят магнитно-спокойный день весеннего равноденствия при низкой солнечной активности. Возмущённое состояние, предваряющее сильное землетрясение, моделировалось включением дополнительных источников электрического поля.

Эти источники включались и не изменялись в течение 24 часов в виде дополнительных положительных и отрицательных потенциалов в 5 кВ (в случае низкоширотного источника) и 10 кВ (в случае среднеширотного источника) на западной и восточной границах околоэпицентральных областей, соответственно. Дополнительные потенциалы добавлялись в моделирующее уравнение для расчета глобального распределения потенциала спокойного магнитосферного и динамо поля, которое затем интегрировалось с учетом этих дополнительных источников.

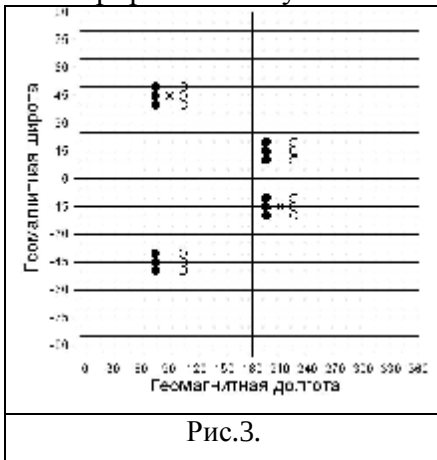
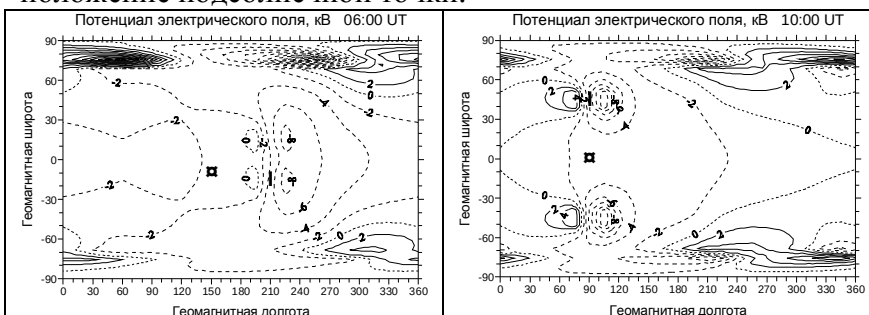


Рис.3.

Были рассмотрены 2 околоэпицентральных области размерами 10° по широте и 30° по долготе с эпицентрами в точках с магнитными координатами ($\Phi = 45^\circ$, $\Lambda = 90^\circ$) – Рим и ($\Phi = -15^\circ$, $\Lambda = 210^\circ$) – Ванимо. Эти размеры примерно соответствуют размерам областей повышенных значений *TEC*, обнаруженных в [3].

На рис.3 показана используемая в модельных расчётах геомагнитная координатная разностная сетка и отмечены темными и светлыми кружками узлы, в которых задавались дополнительные положительные и отрицательные потенциалы, соответственно.

Рассчитанные глобальные распределения потенциала и векторов электрического поля показаны в геомагнитных координатах на рис. 4 и 5 для случаев приэкваториального (слева сверху) и среднеширотного (справа сверху) источников. Внизу для сравнения показаны распределения соответствующих параметров без дополнительных источников. Чёрными кружками отмечены положения эпицентров землетрясений, кружком с точкой отмечено положение подсолнечной точки.



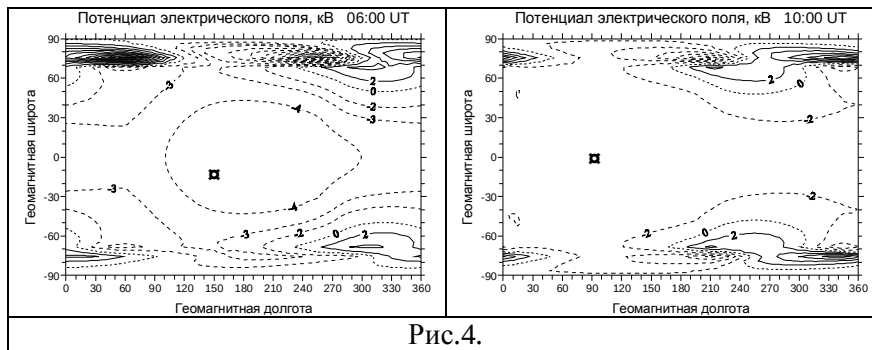


Рис.4.

дополнительных полей заметно превосходят невозмущённые значения как в случае приэква-ториального источника (усиление поля в Ванимо от 0.2 мВ/м до 2-3.5 мВ/м), так и в случае среднеширотного источника (возрастание поля в Риме от ~1 мВ/м до ~3-9 мВ/м), оставаясь, однако, существенно меньшими спокойных высокоширотных электрических полей магнитосферного происхождения (~15-25 мВ/м, см. рис.5).

На рис. 6 и 7 показаны рассчитанные глобальные распределения критических частот $foF2$ и TEC при дополнительных среднеширотных (вверху) и приэкваториальных (посередине) источниках и в их отсутствие (внизу) для моментов времени 03 UT, 08 UT и 23 UT. В 03 UT среднеширотный источник находится на ночной стороне, а экваториальный на дневной. В 08 UT среднеширотный источник находится на освещённой утренней стороне, а экваториальный на освещённой вечерней стороне. В 23 UT среднеширотный источник находится на ночной стороне, а экваториальный в раннем утреннем секторе.

Действие приэкваториального источника усиливает экваториальную аномалию F2-слоя в околоэпицентральной области, углубляя минимум $foF2$ над экватором и отодвигая гребни аномалии от экватора к средним широтам. Такое поведение полностью согласуется с наблюдениями спутника Alouette-2 за день до землетрясения в Чили 12.04.1963 (см. рис.2).

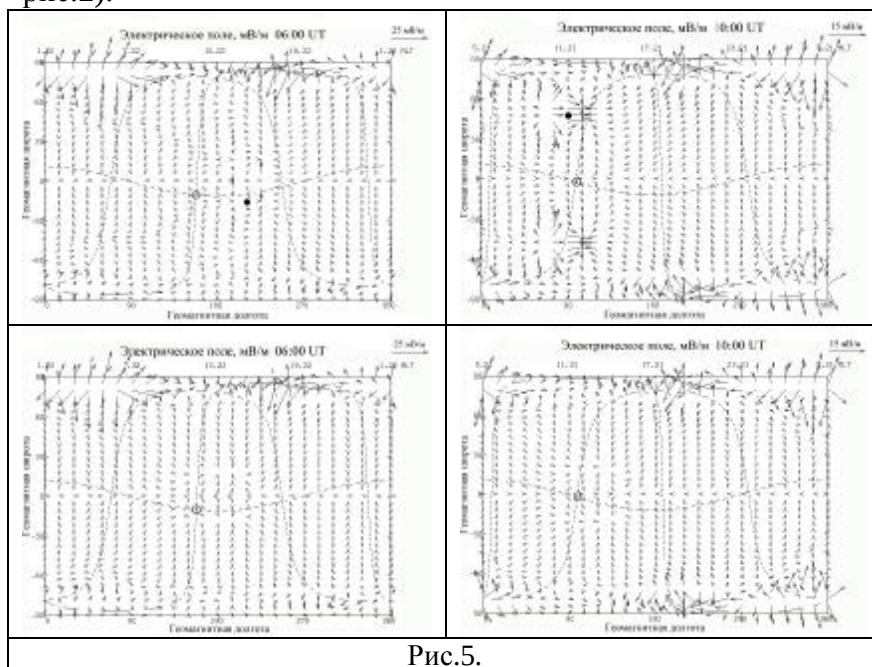


Рис.5.

Из рисунков видны области восточного электрического поля над предполагаемыми эпицентрами будущих землетрясений и магнитно-сопряжённые с ними области в противоположных полушариях. Величины

Действие среднеширотного источника приводит к повышению $foF2$ и TEC в околоэпицентральных областях, если они освещены Солнцем. Величина повышений и их пространственные масштабы совпадают с характеристиками предвестников, обнаруженных в TEC [3].

В ночное время наличие источника не вызывает заметных эффектов. Они появляются после восхода и

сохраняются после захода. Величина электрического поля среднеширотного источника получается большей, а эффекты слабее, чем в низких широтах.

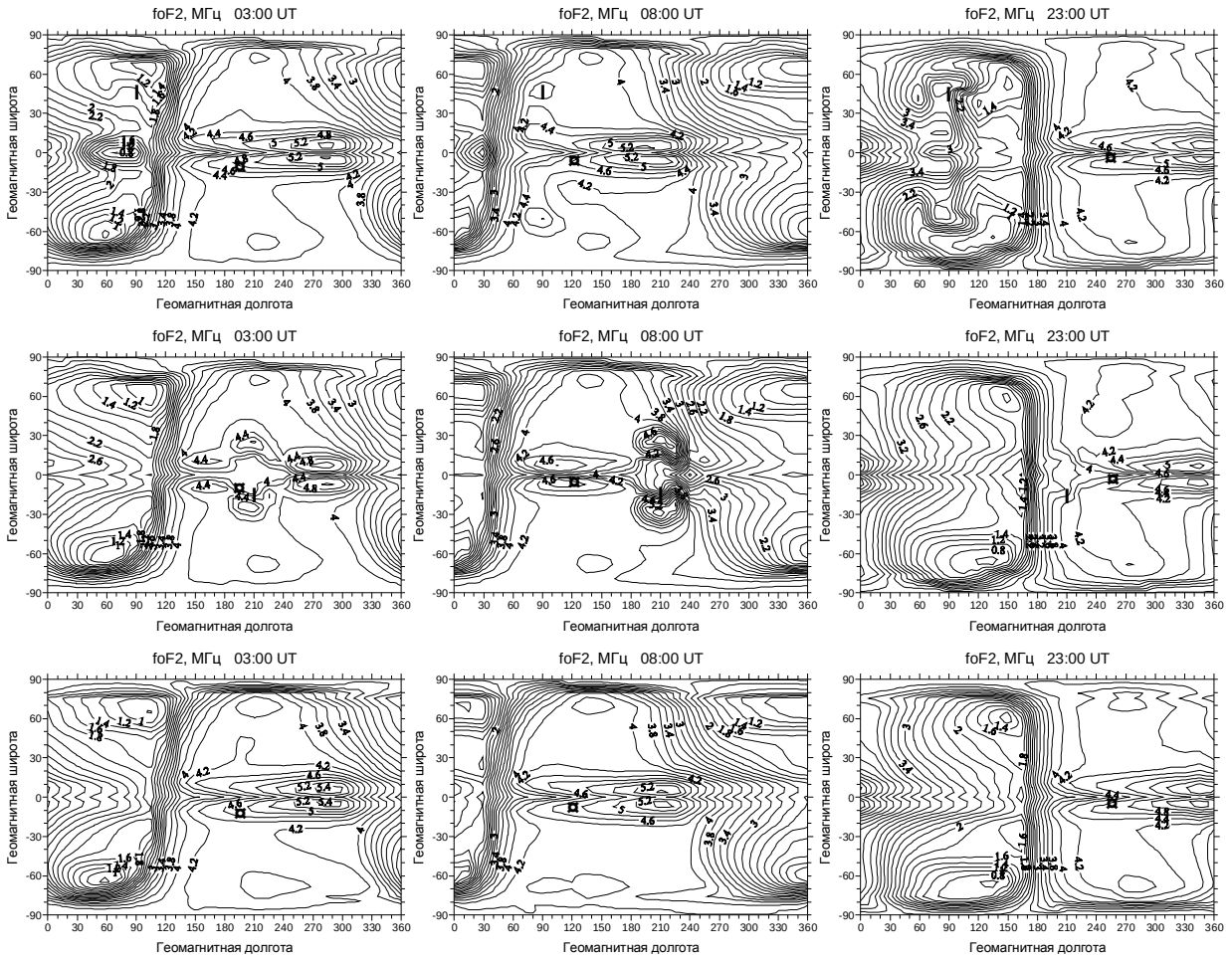
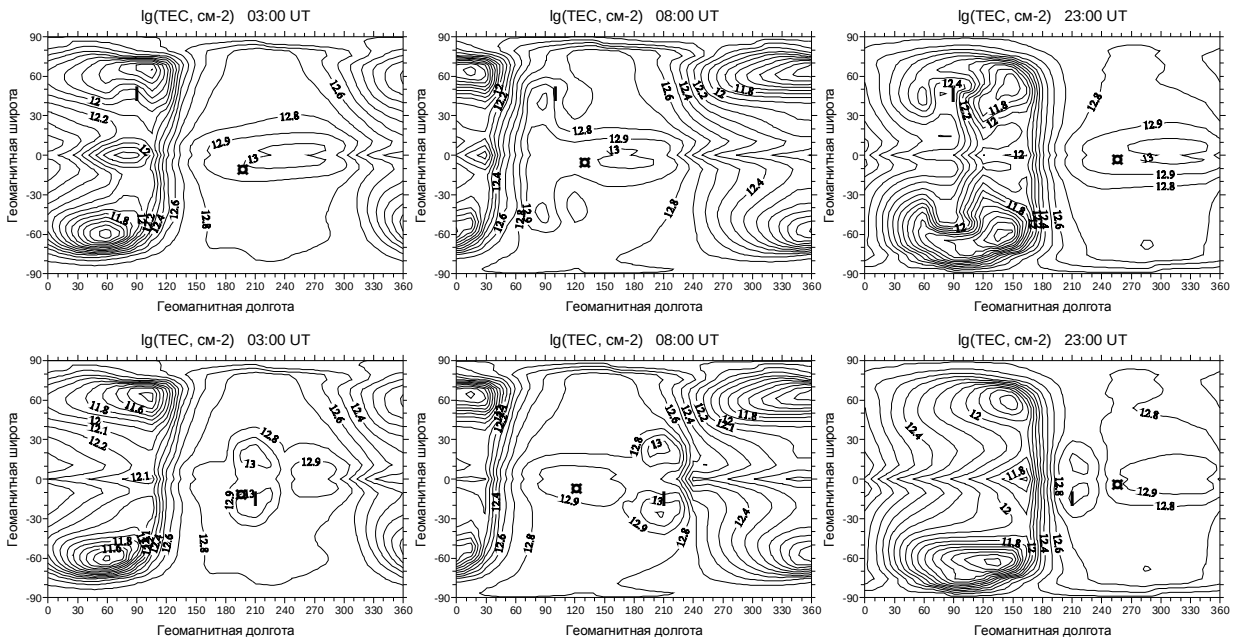


Рис.6.

Помимо эффектов в электронной концентрации в F2 слое и в *ТЕС* действие обоих источников проявляется в виде отчётливых эффектов практически во всех моделируемых ионосферных параметрах и, в особенности, в экваториальном электроджете (см. рис.8).



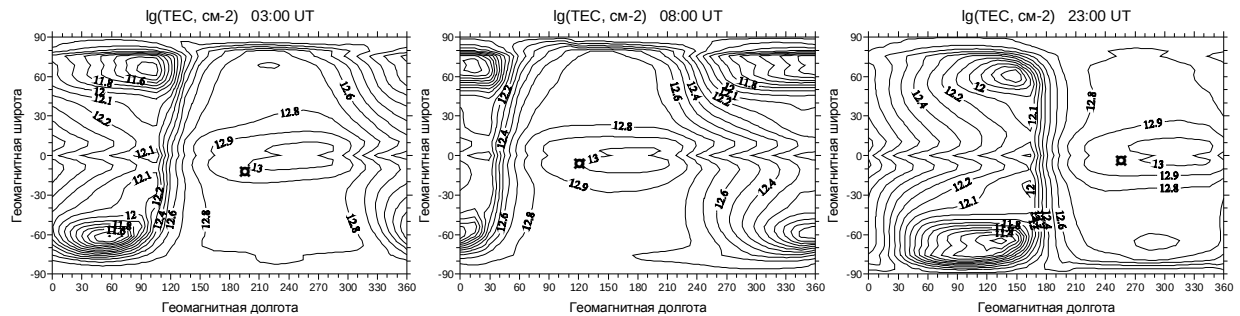


Рис.7.

Полученные в модельных расчётах эффекты в $foF2$ и TEC в околоэпицентральных областях, вызванные модельными сейсмогенными источниками электрического поля, очень похожи на экспериментально наблюдавшиеся эффекты перед сильными землетрясениями в низких и средних широтах. Это указывает на правильный выбор дополнительных потенциалов. Варьируя их расположение и величину, можно добиться большего сходства с наблюдаемыми ионосферными предвестниками землетрясений.

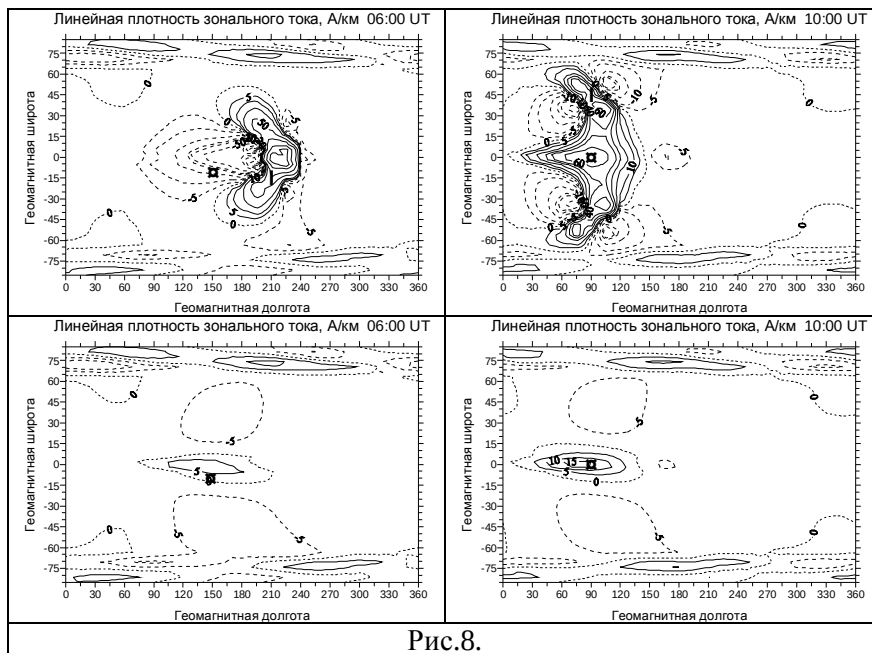


Рис.8.

Согласие полученных результатов расчетов с наблюдениями убедительно свидетельствуют в пользу гипотезы о зональных электрических полях, появляющихся в околоэпицентральных областях за несколько суток до землетрясений и вызывающих локальные изменения TEC в средних широтах и экваториальной аномалии.

Работа поддержана грантом РФФИ №05-05-97511.

Список литературы

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 526с.
2. Депуева А.Х., Михайлов А.В., Деви М., Барбара А.К. Пространственные и временные вариации критических частот области F ионосферы над зоной подготовки экваториального землетрясения // Геомагнетизм и аэрономия. Т.47. №1. С.138-142. 2007.
3. Захаренкова И.Е. Использование измерений сигналов системы GPS для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений // Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук, Калининград, РГУ им. И.Канта. 146 стр. 2007.
4. Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Постановка задачи и тестовые расчеты // Математическое моделирование. Т.18. №3. С.77-92. 2006.
5. Клименко М.В., Клименко В.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – Динамо поле и экваториальный электроджет // Геомагнетизм и аэрономия. Т.46. №4. С.485-494. 2006.
6. Намгаладзе А.А. О возможных физических механизмах формирования ионосферных предвестников землетрясений // Мат. Междунар. науч.-тех. конф. МГТУ «Наука и образование-2007». 2007.

7. Намгаладзе А.А., Ю.Н.Кореньков, В.В.Клименко, И.В.Карпов, Ф.С.Бессараб, В.А.Суроткин, Т.А.Глущенко, Н.М.Наумова. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрномия. Т.30. №4. С.612-619. 1990.
8. Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // УФН. 1998. Т.168, №5. С.582-589.
9. Пулинец С.А., Легенька А.Д. Динамика приэкваториальной ионосферы в период подготовки сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрномия. 2002. Т.42. №2. С.239-244.
10. Сорокин В.М., Чмырев В.М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // Геомагнетизм и аэрномия. 2002. Т.42. №6. С.821-830.
11. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Permyakova V.E., Steblov G.M., Shalimov S.L. Variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California // Rus. J. Earth Sci. 2004. V.6, №5. P.339-354.
12. Chmyrev V.M., Isaev N.V., Bilichenko S.V., Stanev G.A. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over on earthquake center // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989.V.57. P.110-114.
13. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Surotkin V.A., Naumova N.M.. Numerical modelling of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1991. V.53. №11/12. P.1113-1124.
14. Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.Kh. Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2003. V.65. P.1337-1347.
15. Pulinets S.A. and Boyarchuk K. Ionospheric Precursors of Earthquakes. Springer, Berlin, Germany. 2004. 315p.
16. Ruzhin Yu.Ya., Depueva A.Kh. Seismoprecursors in Space as Plasma and Wave Anomalies // J. Atmosph. Electr. 1996. V.16. №3. P.251-288.
17. Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I. Modification of the low-latitude ionosphere before December 26, 2004 Indonesian earthquake // Nat. Hazards and Earth System Sci. 2006. V.6. P.817-823.

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОТОКОВ НИЗКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

SPACE MONITORING OF LOW ENERGY ELECTRON FLUXES WITH THE PURPOSE OF EARTHQUAKE FORECAST

***В.М. Панков, О.Л. Вайсберг, Е.Н. Евланов, А.А. Гусев, В.Н. Смирнов,
Г.И. Пугачева, Н.С. Ерохин***

Институт космических исследований РАН

We give a detailed analysis of early performed space experiments directed to the search of earthquake precursors by satellite equipment. New suggestions of the space experiments devoted to global space monitoring of low energy electron fluxes at the satellite orbit with the purpose of elaboration of earthquake forecasting modern methods are described.

Введение

Одной из наиболее важных проблем современной геофизики является проблема прогноза землетрясений. Традиционный сейсмический мониторинг, существующий уже около 150 лет, пока не привел к выработке методов достоверного прогноза землетрясений. В то же время развитие космической геофизики, использующей космические аппараты (КА) для исследования разнообразных природных явлений в атмосфере и на поверхности Земли (цунами, циклоны, молнии, землетрясения, и др.), открывают перспективу для поиска в ближнем космосе физических эффектов, способных служить надежными

предвестниками землетрясений. Наземные обсерватории, как бы они хорошо ни были оснащены, дают лишь локальную информацию, тогда как спутниковые методы обеспечили бы глобальный обзор и выявление всех сейсмоактивных зон, а также региона возможного крупного землетрясения.

Более двадцати лет тому назад по данным спутника "Интеркосмос-19" был обнаружен эффект резкого возрастания интенсивности низкочастотных электромагнитных излучений в верхней ионосфере над зоной готовящегося и затем происходящего землетрясения с амплитудой 5 баллов и выше [5, 3]. Появление всплесков широкополосного электромагнитного низкочастотного излучения над эпицентрами крупных землетрясений за несколько часов до события был подтвержден наблюдениями и на других космических аппаратах [1, 6-8, 10-12]. Например, на КА "Космос-1809" детектировались электромагнитные сигналы с частотами 140 Hz и 450 Hz после М6+ землетрясения в Спитаке, Армения, в 1989 году, причем эти сигналы регистрировались в течение всего времени прохождения спутником области размерами $\pm 6^\circ$ широты и долготы от эпицентра землетрясения [13].

Данные, полученные с российских и зарубежных спутников, позволяют сделать вывод о том, что сейсмоионосферные электромагнитные шумы в широком диапазоне частот от 0.1 Гц до 20 кГц длительное время присутствуют в области над эпицентром готовящегося землетрясения, что в принципе, могло бы быть положено в основу разработки прогноза сейсмособытий. Установлено, что широтная протяженность зоны регистрации всплесков составляет $\pm 3^\circ$, а долготная $\pm 60^\circ$, то есть всплески наблюдаются в виде «шумового пояса», вытянутого вдоль геомагнитной широты эпицентра. До землетрясения наблюдается как магнитная, так и электрическая компоненты поля шумовых излучений; после землетрясения преобладает электрическая составляющая [4,9].

К настоящему времени возникла и развивается новая научная дисциплина «сейсмоэлектромагнетизм», занимающаяся анализом связи мощных сейсмических событий с электромагнитным излучением. Предполагается, что при разломе горных пород в эпицентре землетрясения (см. Рис.1), в районе площадью несколько десятков километров, на глубинах 5-80 км возникают акустические волны в УНЧ и КНЧ диапазонах. Они проникают через атмосферу в ионосферу (100-200 км), где приводят к появлению электромагнитных волн, которые затем распространяются вдоль силовых линий геомагнитного поля (изменяя при этом характеристики захваченной радиации) на высоты орбит спутников (400-1000 км), где и могут быть зарегистрированы соответствующей аппаратурой. Однако крайне ограниченный объем, имеющейся в настоящее время экспериментальной информации, не позволяет установить механизмы наблюдаемых всплесков электромагнитных излучений и разработать детальную теорию явления.

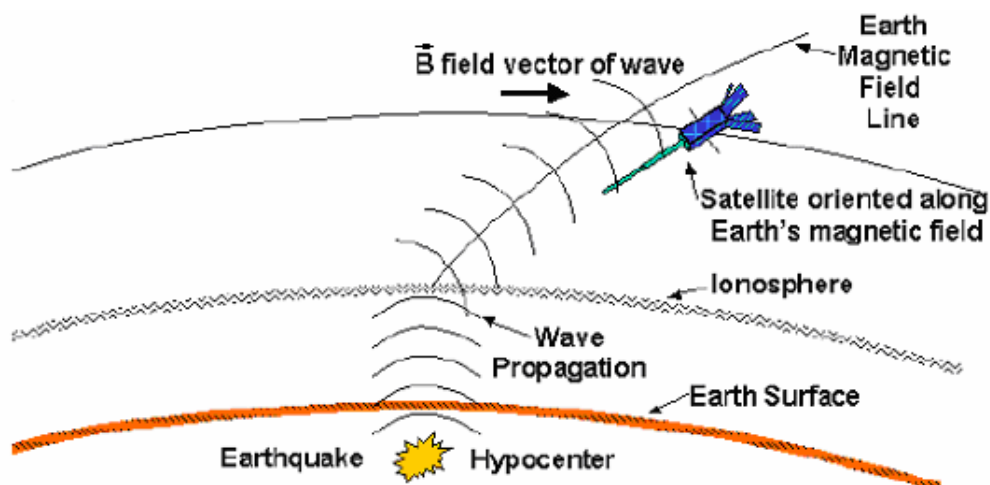


Рис.1. Сценарий распространения сейсмоэлектромагнитных волн.

В исследованиях сейсмoeлектромагнетизма и разработке методов спутникового сейсмического мониторинга участвуют практически все страны, где происходят сильные разрушительные землетрясения, а именно: Россия, Япония, Соединенные Штаты, Индия, Тайвань, Китай, Италия (см. сайт: www.ntsomz.ru/news/news_kosmos/vittori_8_feb_2005), Мексика (см. сайт: www.ntsomz.ru/news/news_kosmos/earth_8_jan_2005) и Франция.

1. Спутниковые эксперименты по разработке методов прогнозирования землетрясений

В настоящее время выполняется несколько спутниковых экспериментов, целью которых является исследование связи электромагнитных излучений с землетрясениями. В частности на борту американского микроспутника "Quakesat", запущенного 30 июня 2003 с космодрома Плесецк ракетоносителем "Рокот", установлена аппаратура для регистрации КНЧ/ОНЧ излучений, ассоциированных с землетрясением.

Первая возможность проверить технологию "Quakesat" представилась 22 декабря 2003, когда при пролётах над районом г.Сан Симеон, Калифорния, спутник начал регистрировать КНЧ сигналы, ассоциированные впоследствии с происшедшим там через месяц 6.5 бальным землетрясением. Французский спутник "Aureol-3" также регистрировал КНЧ, проходя над активными сейсмическими зонами [11].

29 июня 2005 г. с Байконура ракетой-носителем "Днепр" был запущен ещё один французский микроспутник "Demeter" (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions), для изучения ионосферных возмущений, связанных с естественными геофизическими явлениями, такими как землетрясения, цунами и др. и, в особенности, для исследования электромагнитных эффектов, предшествующих землетрясению, и их прогноза. Вес спутника 125 кг.

В рамках совместного проекта между Автономным Национальным Мексиканским Университетом (UNAM) и Московским государственным университетом предполагается запуск в 2008-2009 г.г. 10-ти килограммового спутника с аппаратурой для прогнозирования землетрясения по концентрации ионосферного радона. В программу исследований входит также измерение концентрации электронов в ионосфере и наблюдения за характеристиками электромагнитных полей, динамика которых может свидетельствовать о скором землетрясении. (CNews.ru http://www.ntsomz.ru/news/news_cosmos/earth_28_jan_2005)

На основе малых спутников в ИЗМИРАНе создаётся комплексная многофункциональная геокосмическая система "Вулкан" для прогноза и мониторинга природных и техногенных катастроф. Система позволит осуществлять глобальное наблюдение за поверхностью, атмосферой и ионосферой Земли и обнаруживать электромагнитные предвестники землетрясений, предсказывать координаты их эпицентров и время начала катастроф. Данная система создается в рамках федеральной космической программы России. Заказчиком является Росавиакосмос, а головным исполнителем космического сегмента – НИИ электромеханики. На ИЗМИРАН возложено научное руководство проектом, разработка и изготовление приборов. Ожидается, что система обеспечит краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный прогноз стихийных бедствий для служб по чрезвычайным ситуациям в России и других странах мира.

Система включает в себя:

- группировку малых КА, размещаемых на круговых орбитах с высотами (400–500) км и (900–1100) км, наклоном 82°;
- комплекс наземных геофизических обсерваторий и станций приема и обработки информации;
- ситуационный центра на базе ЦУП ИЗМИРАНа.

Система создаётся в несколько этапов. Первым из них был запуск в 2003 г. микроспутника «Компас-2», разработанного в ИЗМИРАНе совместно с Государственным ракетным центром "КБ им. академика В.П.Макеева". К сожалению, из-за технических

неполадок эксперимент не дал результатов. Следующие спутники планируется запускать с помощью РН "Рокот" или "Стрела" по два или три КА одновременно. Низкоорбитальная группировка будет состоять из 12 КА по три в каждой орбитальной плоскости. Высокоорбитальная группировка будет состоять из шести КА по три КА в двух плоскостях.

2. Экспериментальная методика мониторинга землетрясений из космоса

2.1. Мониторинг электромагнитных процессов в ионосфере и магнитосфере

Мониторинг предвестников землетрясений из космоса включает наблюдение целого ряда электромагнитных эффектов в ионосфере и магнитосфере Земли, таких как: электромагнитные волны низкой частоты, слабые флуктуации геомагнитного поля (регистрируемые, например, магнитометром на борту космического аппарата "Quakesat"), концентрация электронов в ионосфере, динамика потоков энергичных частиц радиационных поясов Земли. Необходимо отметить, что спутниковые исследования ионосферных фоновых электромагнитных излучений в звуковом диапазоне частот проводятся в нашей стране многие годы.

Для исследования дискретных сигналов и детального изучения спектра шумовых и квазишумовых излучений применяются широкополосные приемники. Как правило, эти приемники используются совместно с анализаторами спектра, дающими информацию об абсолютной интенсивности и пространственном распределении частот излучений. Однако, применение подобных методов в течение уже двух десятилетий пока не привело к существенному улучшению ситуации с выработкой методов прогноза сейсмической опасности. Такая ситуация обусловлена в основном трудностью идентификации именно сейсмоэлектромагнитных достаточно слабых сигналов на фоне имеющегося колоссального многообразия электромагнитных всплесков, обусловленных, в частности, динамикой магнитосферы.

2.2. Исследование связи динамики потоков низкоэнергичных электронов в магнитосфере с сейсмической активностью

В отличие от описанного выше метода, для поиска сейсмоэлектромагнитных эффектов, мы предлагаем использовать наблюдение за потоками достаточно низкоэнергичных (0.1–20) кэВ электронов. Как было показано Ю.Гальпериным [2] на основе данных спутника "Ореол-3", за несколько часов до начала землетрясения над его эпицентром наблюдаются одновременные всплески интенсивности низкочастотных (0.01–20) кГц излучений и потоков электронов с энергиями $E > 40$ кэВ и $E > 100$ кэВ. Эта одновременность объясняется тем, что электромагнитные излучения естественного и искусственного происхождения, взаимодействуя с электронами РПЗ и ионосферными электронами (ускорение электростатическим полем волны и рассеяние магнитной компонентой), ускоряют их, вызывая изменения их спектров, а также рассеивают их, изменяя их пичч-угловое распределение, что, в свою очередь, приводит к высыпаниям электронов.

Таким образом, функция распределения электронов может играть роль своеобразного детектора электромагнитного излучения. Его преимуществом является большее (по сравнению с электромагнитным излучением) время жизни захваченных электронов, позволяющее в течение некоторого времени сохранять в их энергетическом и пичч-угловом распределениях "отпечаток" взаимодействия с электромагнитным излучением. Вследствие этого вариации потоков низкоэнергичных электронов могут более надёжно детектироваться и служить эффективным предвестником землетрясений.

Для изучения связанной с сейсмоактивностью динамики распределений низкоэнергичных электронов, предлагается использовать два электростатических спектрометра – приборы "КАМЕРА-Э" и "АСЭ-Е" с сильно отличающимися геометрическими факторами, с целью обеспечить максимальный динамический диапазон

измерений потоков электронов, Это необходимо вследствие существующей неопределенности в величине потоков и угловых распределений электронов, ассоциированных с землетрясениями.

Прибор КАМЕРА-Э позволяет измерять энергетические распределения в диапазоне энергий (0.01-15) кэВ с достаточно высокой точностью до 7%, и угловые распределения в телесном угле 2π с разрешением до $5^\circ \times 5^\circ$ при высокой скорости опроса, что необходимо для получения распределений за короткое (несколько секунд) время нахождения КА над эпицентром события. Геометрический фактор прибора в $3 \cdot 10^{-3}$ см²стер достаточен для регистрации электронов, высыпавшихся из радиационных поясов, достигающих интенсивности $\sim (10^7-10^8)$ (см²стер с)⁻¹ в максимуме пояса, и $\sim (10^5-10^6)$ (см²стер с)⁻¹ у подножия силовых линий в ионосфере. Таким образом, скорость счёта при регистрации высыпаний составит (10^3-10^5) сек⁻¹. Подобные характеристики прибора являются уникальными, не имеющими аналогов среди аппаратуры, уже установленной на "LEO" для обнаружения связи с землетрясениями.

Прибор "АСЭ-Е²" регистрирует потоки электронов примерно в том же диапазоне энергий (0.1–20) кэВ и с энергетическим разрешением 0.5 кэВ. При этом его угловое разрешение существенно ниже, чем у предыдущего прибора (регистрируются все электроны попадающие в конус между 35° и 65°). Однако преимуществом прибора является большой геометрический фактор (100 см² стер.), позволяющий зарегистрировать даже очень небольшие потоки электронов, связанные с сейсмоактивностью и "невидимые" спектрометром "АСЭ-Е" вследствие его небольшого геометрического фактора. Предполагается, что таким образом приборы способны зарегистрировать потоки электронов высыпавшихся под воздействием низкочастотного излучения как естественного, так и искусственного происхождения и/или резонансно ускоренные этим излучением. Нашей задачей является установить наличие связи между появлением таких потоков и мощными землетрясениями. По сравнению с приборами, регистрирующими непосредственно электромагнитное излучение, прибор, регистрирующий частицы, имеет преимущество поскольку "видит" эпицентр землетрясения, находясь не только непосредственно над ним, но и на соседних меридианах к востоку от эпицентра, куда дрейфуют электроны со скоростью $V_D = 0.136 LE$ град/сек (E – энергия электрона в МэВ). Например, поток 7-кэВ электронов, возникший над эпицентром землетрясения, будет наблюдаться через 1,5 часа на меридиане, отстоящем от меридиана эпицентра на $+15^\circ$, и через 3 часа на меридиане $+30^\circ$ и т.д. Линейная зависимость скорости дрейфа электронов от их энергии в принципе позволяет определить меридиан M_0 их генерации, т.е. меридиан эпицентра события. Например, долготы меридианов, пересекаемых "LEO" при двух последовательных оборотах КА, составляют M_1 и M_1+15° при периоде в 90 мин. Тогда скорости дрейфа V_1 и V_2 электронов, возникших на меридиане M_0 и регистрируемых при двух последовательных проходах, связаны очевидным соотношением: $(M_1 - M_0)/V_1 = (M_1+15^\circ - M_0)/V_2 - 90 \text{ мин}$, из которого однозначно определяется широта события M_0 . Этот эффект полностью аналогичен наблюдаемому на геостационарных КА явлению дисперсных структур, используемого для определения места и времени инъекции частиц. Поскольку реальные распределения отличны от моноэнергетических, то V_1 и V_2 будут соответствовать минимальным энергиям регистрируемых спектров.

Дополнительно к этому, по номеру L оболочки, на которой была зарегистрирована особенность в функции распределении, возможно определение широты эпицентра. Естественно, что подобная методика должна быть промоделирована математически (например, определены линии равного поля на заданных L -оболочках на высоте КА и т.п.) с учётом реальных форм генерируемых спектров и проверена на событиях, произошедших во время функционирования приборов на орбите. Этот пример демонстрирует возможность использования вариаций электронной популяции для прогноза землетрясений. Основная же задача предлагаемого эксперимента заключается собственно в выявлении тех вариаций потоков электронов, которые могут быть пригодны для

прогноза. В настоящее время проведена проработка и обоснование принципов работы и основных характеристик приборов для описанного выше современного космического эксперимента, сроков их изготовления.

Необходимо подчеркнуть, что такие высокоточные приборы, как "КАМЕРА-Э", и "АСЭ-Е" впервые предлагаются для подобных исследований. Прибор "КАМЕРА-Э" будет использован также в эксперименте "РЕЗОНАНС" по изучению взаимодействия антропогенного электромагнитного излучения с плазмой. Как показывает опыт, решение проблемы выявления предвестников землетрясений оказывается весьма сложным. Применение для её решения современных, ранее неиспользованных, методов и экспериментальной аппаратуры, описанных выше, с учетом накопленных данных наблюдений позволит существенно продвинуться в нашем понимании механизмов сейсмoeлектромагнетизма и предсказания землетрясений.

Список литературы

1. Биличенко С.И., Инчин А.С., Ким Э.Ф. и др. ULF пульсации магнитного поля в ионосфере, ассоциируемые с землетрясениями // ДАН СССР. 1990. Т.311. № 5. С.1077-1081.
2. Гальперин Ю.И., Гладышев В.А., Ларкина В.И. и др. Высыпание энергичных захваченных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения // Космические исследования. 1992. Т.30. № 1. С.89-106.
3. Ларкина В.И., Наливайко А.В., Гершензон Н.И. и др. Наблюдения на спутнике "Интеркосмос-19" ОНЧ излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия. 1983. Т. 23. № 5. С. 842-845.
4. Ларкина В.И., Мигулин В.В. и др. Некоторые особенности возбуждения низкочастотных излучений в верхней ионосфере над районами землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т.28. № 5. С. 812-817.
5. Мигулин В.В., Ларкина В.И., Молчанов О.А. и др. Обнаружение эффектов воздействия землетрясений на ОНЧ-КНЧ шумы во внешней ионосфере. Препринт № 25 (390).—М.: ИЗМИРАН. 1982. 28 с.
6. Fraser A.C., Smith R. et. al. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake // Geophysical Research Letters. 1990. V.17. No.9. P.1465-1468.
7. Hendersen T.R., Sonwalkwer V.S., Helliwell R.A. et al. Search for ELF/VLF Emissions Inducted by Earthquakes as Observed in the Ionosphere by the DE-2 Satellite // Journal of Geophysical Research. 1993. V.98. № A6. P.9503-9514.
8. Larkina V.I., Migulin V.V., Mogilevsky M.M. et al. Earthquake Effects in the Ionosphere according to the Intercosmos 19 and Aureol 3 Satellite Data, Results of the ARCAD 3 Project and of the Recent Programmes in Magnetospheric Physics. // Proceeding of International Conf., Toulouse, May 1984 /Ed. By CNES, CEPADUES-EDITIOS; P.685-699. 1985.
9. Larkina V.I., Migulin V.V., Molchanov O.A. et al. Some Statistical Results on Very Low Frequency Radio Wave Emissions in the Upper Ionosphere over Earthquake Zones // Phys. Earth. Planet. Inter. 1989. V.57. P.100-109.
10. Molchanov O.A., Mazhaeva O.A., Golyavin A.N. and M.Hayakawa. Observation by Intercosmos-24 satellite of ELF-VLF electromagnetic emissions associated with earthquakes // Ann. Geophysics. 1993. V.11. P.431-440.
11. Parrot M. Statistical study of ELF/VLF emissions recorded by a low-altitude satellite during seismic events // Journal of Geophysical Research. 1994. V.99. No.A12. P.23,339-23,347.
12. Rodger C.J., Thomson N.R., Dowden R.L. A Search for ELF/VLF Activity Associated with Earthquakes using ISIS Satellite Data // J. Geophys. Res. 1996. V.101. № A6. P.13369-13378.
13. Serebryakova O.N. et. al. Electromagnetic ELF radiation from earthquake regions as observed by low-altitude satellites // Geophysical Research Letters. 1992. V.19. No.2. P.91-94.