

**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.wdccc1/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 турбулиизация 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 турбулиизацию 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 турбулиизация 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

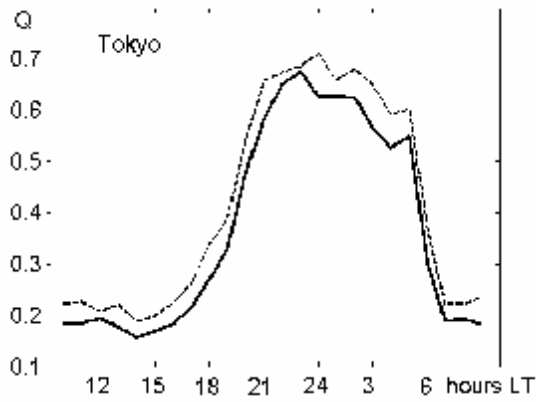


Рис.1. Суточный ход коэффициента полупрозрачности Q при высокой (сплошная линия) и низкой (пунктир) солнечной активности

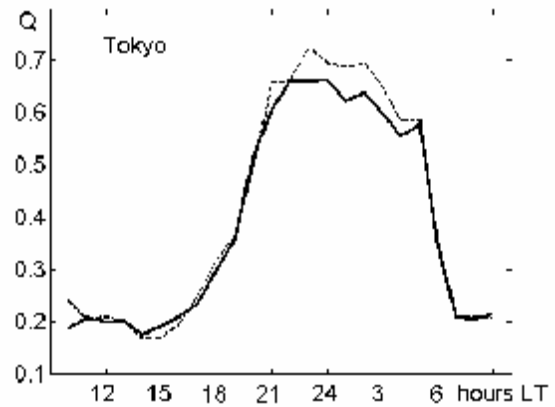


Рис.2. Суточный ход коэффициента полупрозрачности Q при высокой (сплошная линия) и низкой (пунктир) магнитной возмущенности.

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 $fbE_s < (2.5 \div 3)$ МГц, однако, в максимуме солнечного цикла E_s -spread чаще наблюдается при более низких значениях плотности спорадического слоя $fbE_s < (1.5 \div 2)$ 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 турбулизовать 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.

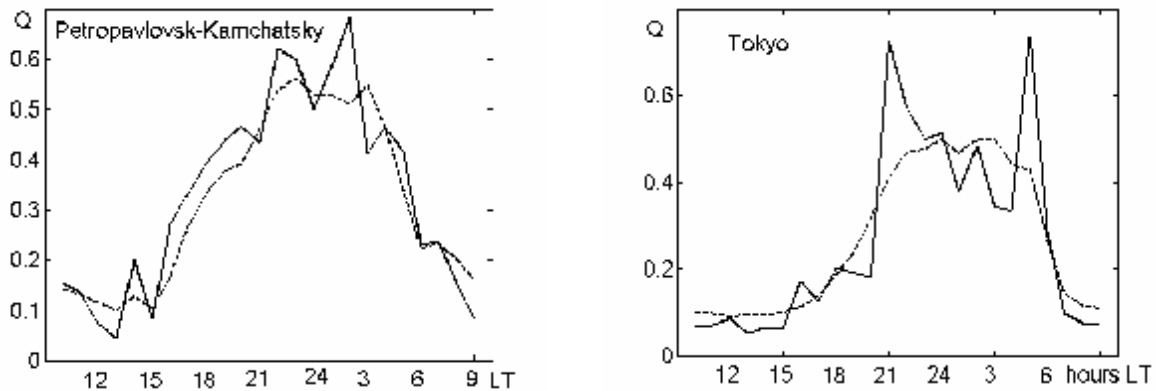


Рис. 3 Результаты наложения эпох для коэффициента полупрозрачности Q . Сплошная линия – «сейсмоактивные» (-2,-1,0) дни, пунктир – фоновые дни.

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., Игнатъев 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 Аэрномия. 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 Аэрномия. 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 аэрномия. 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.