

УДК 550.385

ИОНОСФЕРНЫЙ МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ НЧ УЗКОПОЛОСЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПЕРЕД И ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ДРУГИХ ИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

И.Ю. Сергеев, В.М. Сорокин, А.К. Яценко

IONOSPHERIC GENERATION MECHANISM OF THE LF NARROW-BAND ELECTROMAGNETIC RADIATION ON THE EARTH SURFACE BEFORE AND DURING EARTHQUAKES AND OTHER INTENSIVE PROCESSES

I.Yu. Sergeev, V.M. Sorokin and A.K. Yaschenko

В работе предложена теоретическая модель возмущения ионосферы при землетрясениях и других интенсивных процессах. Данная модель позволяет объяснить целый ряд предвестников землетрясений. В том числе она описывает появление узкополосного НЧ электромагнитного возмущения, наблюдаемого на поверхности Земли во время интенсивных процессов. Механизм основан на формировании периодических неоднородностей ионосферной проводимости интенсивными акустогравитационными волнами (АГВ), вызванными различными причинами, зависящими от типа процесса. Перед землетрясениями усиление АГВ связано с ее неустойчивостью, возникающей из-за возрастания постоянного электрического поля. При пролете ракет АГВ возбуждается непосредственно самой ракетой. Взаимодействие электромагнитного шума с такой структурой генерирует в ионосфере электромагнитные гиротропные волны, поле которых может наблюдаться на земной поверхности. Представленные вычисления показывают, что при старте ракет формируемый на земле спектр имеет в диапазоне 1–20 Гц до 6 линий. В работе проведено сравнение основных количественных характеристик теоретической модели с экспериментальными данными, наблюдаемыми при землетрясениях и пролете ракет, показывающее справедливость представленного механизма.

A new theoretical model of the ionospheric disturbances accompanied earthquakes and other intensive processes is presented. The model explain a set of earthquake precursors. Also it explains generation mechanism of the LF narrow-band electromagnetic radiation on the Earth surface during intensive processes. This mechanism is based on a periodic structure formation of ionospheric conductivity due to intensive acoustic-gravity waves (AGW) induced by different reasons depending on type of the process. Before earthquakes AGW is caused by instability stimulated by DC electric field enhancement. During rocket flights AGW is formed by rocket itself. Interaction of the electromagnetic noise with such structure leads to electromagnetic gyrotropic waves in the ionosphere. Their radiation can be observed on the Earth's surface. The presented calculations show that during rocket flights electromagnetic spectrum has up to 6 spectral lines in the range 1–20 Hz. The comparison of key values of the theoretical model with ground-based data obtained at rocket flights and earthquakes confirms validity of the mechanism presented in this report.

1. Введение

Экспериментальные данные, полученные в последнее время, свидетельствуют, что землетрясения могут сопровождаться следующими 3-мя явлениями:

- возрастанием в ионосфере в зоне над очагом готовящегося землетрясения постоянного электрического поля;

- возмущением в ионосфере над эпицентром электронной концентрации, причем возмущение носит периодический по пространству характер;

- и повышением уровня УНЧ электромагнитных волн на земной поверхности вблизи готовящегося эпицентра.

Эти явления возникают от нескольких часов до двух недель перед землетрясением и сопровождают его.

Возрастание постоянного электрического поля над зоной готовящегося землетрясения впервые было обнаружено в работе [1]. На рис. 1 представлены данные спутника «Интеркосмос–Болгария 1300». Спутник пересекает магнитную трубку, проходящую через зону будущего землетрясения, в Южном полушарии, затем в Северном. При каждом пересечении наблюдался всплеск электрического поля с амплитудой порядка 5–8 мВ/м [1].

Указанное выше возмущение электронной концентрации, как правило, происходит в слое E или F. В последнем случае это сказывается на величине полного электронного содержания (ПЭС). Периоди-

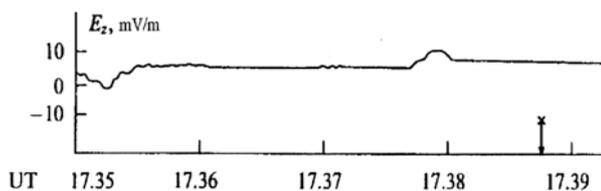


Рис. 1. График зависимости от времени постоянного электрического поля, измеряемого спутником «Интеркосмос–Болгария 1300» 12.01.1982 г., при пересечении им магнитной трубки, проходящей через зону будущего землетрясения. Стрелкой на графике отмечен момент пролета спутника над эпицентром. Диаметр зоны, в которой наблюдался всплеск поля, – порядка 300 км. Землетрясение произошло в 17:50:26 UT.

ческое возмущением ПЭС над эпицентром было, например, зарегистрировано во время землетрясения вблизи о. Суматра 26.12.2004 г. [2] см. рис. 2.

Также во многих работах на земной поверхности вблизи готовящегося землетрясения наблюдалось повышение уровня УНЧ электромагнитных волн [3–5]. Последние исследования показывают, что спектр этих волн часто является линейчатым, содержащим несколько узких спектральных линий в диапазоне от 0.1 до 20 Гц.

Подобные явления наблюдались и при других активных процессах, таких как тайфуны [6], извержения вулканов, полеты ракеты (увеличения электри-

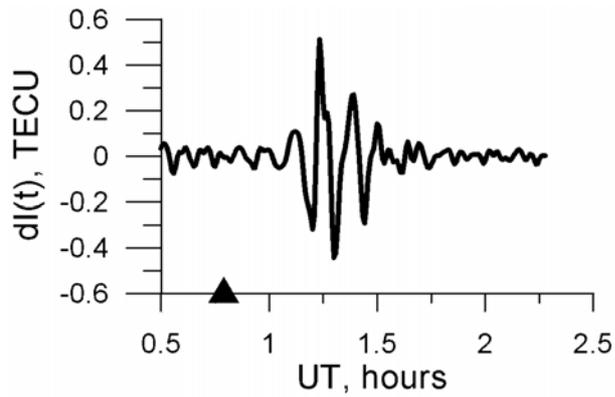


Рис. 2. График зависимости полного электронного содержания ионосферы от времени, измеренный с помощью GPS-приемников во время землетрясения вблизи о. Су-матра 26.12.2004 г.

ческого поля не зафиксировано). В частности, в работе [7] приведены данные измерения зависимости от времени ПЭС, полученные во время запусков ракет с космодрома Байконур (см. рис. 3, а). Из рисунка видно, что возмущение ПЭС носит периодический характер. В работе [8] приводятся данные измерения электромагнитного возмущения на поверхности Земли, сопровождающего запуски и посадки космических кораблей типа «Шаттл», полученные сетью электромагнитных обсерваторий на территории США. На рис. 4, а приведен спектр электромагнитного возмущения, зарегистрированного 20.01.1990 г. во время посадки космического корабля «Колумбия» [8].

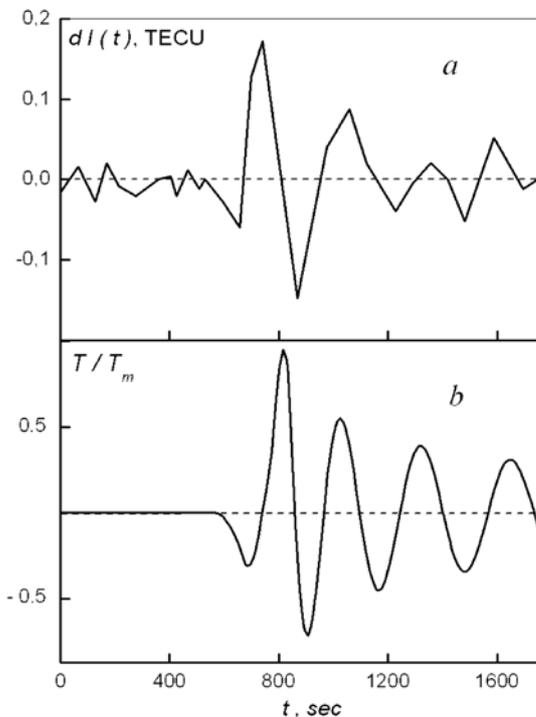


Рис. 3. Пример записи зависимости от времени полного электронного содержания в районе космодрома Байконур во время запуска ракеты-носителя «Протон» 17.04.2000 г. [8] (а). (По оси абсцисс отложено время от момента старта. По оси ординат отложены TECU. Одна единица равна 10^{-16} м^{-2} .) Результаты теоретического расчета возмущения полного электронного содержания, нормированного на единицу (б).

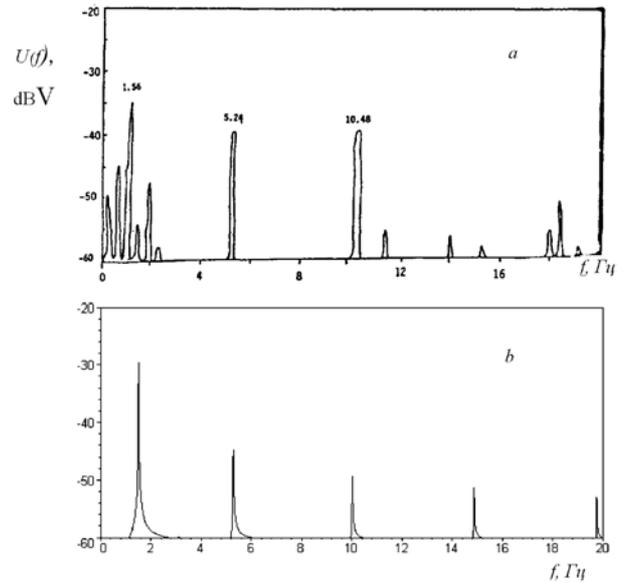


Рис. 4. Спектр электромагнитного возмущения, зарегистрированного во время посадки космического корабля «Колумбия» 20.01.1990 г. [9] (а). (На графике отмечены значения частот максимумов спектральных линий. Уровень нуля dB на шкале соответствует чувствительности 10^{-5} Гц). Результаты теоретического расчета электромагнитного возмущения на поверхности Земли при возникновении в ионосфере квазипериодического возмущения электронной концентрации (б). Расчет проведен при следующих значениях: $B_0=7.9 \times 10^{-9}$ Гц, $A_0=0.20$, $\sigma_{H0}=2 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$, $l=3.03 \times 10^6 \text{ см}$, $\Sigma_P=5 \times 10^{10} \text{ см/с}$, $\alpha=\pi/8$, $k_0=4.5 \times 10^{-7} \text{ см}^{-1}$.

Авторы настоящей статьи полагают, что периодическое возмущение электронной концентрации ионосферы и УНЧ электромагнитные волны на поверхности Земли непосредственно связаны друг с другом. В частности, представленные здесь расчеты показывают, что взаимодействие фонового электромагнитного шума с периодическим возмущением ионосферной проводимости приводит к возникновению на поверхности Земли линейчатого спектра электромагнитных колебаний в УНЧ-области. В качестве примера в настоящей работе рассчитаны электромагнитные спектры, возникающие при пролете ракет. В работе также представлен альтернативный механизм образования периодического возмущения электронной концентрации ионосферы перед землетрясением и во время его, который в отличие от механизма, основанного на ВГВ, объясняет увеличение электрического поля в ионосфере.

2. Альтернативный механизм образования периодического возмущения электронной концентрации перед и во время землетрясений

Согласно экспериментальным данным, перед землетрясениями наблюдается усиление выброса из Земли в атмосферу почвенных газов, которые силами вязкости увлекают вверх заряженные аэрозоли. Такое движение образует вертикальный электрический ток. Проведенные расчеты показывают, что ток вызывает на высоте ионосферы возрастание горизонтальной компоненты электрического поля на 15 мВ/м, что согласуется с данными эксперимента [1]. При этом стоит отметить, что, как показано в работе [9], вертикальная компонента электрического поля на поверхно-

сти Земли не превышает величину $E_{zm} = 90$ В/м. Механизм ограничения электрического поля на поверхности Земли рассмотрен в [9]. Он основан на существовании обратной связи между возмущением вертикальной компоненты электрического поля и сторонними токами на поверхности Земли, вызывающими это возмущение. Такая связь обусловлена наличием потенциального барьера на границе земля–атмосфера. При пересечении этой границы движущейся вверх заряженной аэрозолью поверхность земли заряжается противоположным по знаку зарядом, что и создает указанный барьер.

Расчеты показывают, что рост электрического поля в ионосфере приводит к неустойчивости малых случайных АГВ [5, 10]. Эта неустойчивость связана с преобразованием джоулева тепла токов в энергию волны, что тем самым приводит к росту ее амплитуды. При этом фазовая скорость волны падает. Таким образом, рост амплитуды АГВ приводит к периодическому возмущению электронной концентрации и, следовательно, проводимости.

3. Квазипериодическое возмущение ПЭС, возникающее при движении ракеты-носителя

Как показано в работе [11], полет ракеты-носителя на активном участке горизонтальной траектории сопровождается генерацией АГВ. Ее распространение в F-слое приводит к возмущению полного электронного содержания в ионосфере. На рис. 3, *a* приведен экспериментальный график возмущения ПЭС во время запуска ракеты-носителя с космодрома Байконур [7], а на рис. 3, *b* теоретический график [11]. Хорошее совпадение теоретического и экспериментального графика свидетельствует о справедливости предложенного метода.

4. Расчет электромагнитных волн на поверхности Земли, возникающих из-за образования в ионосфере периодических неоднородностей электронной концентрации

Рассмотрим ионосферу с геомагнитным полем. Проводимость в такой среде является тензорной величиной с педерсеновскими и холловскими компонентами σ_P , σ_H [12]. Для частот ω , удовлетворяющих неравенству $\omega \ll 4\pi\sigma_P, H \approx 10^{-7} \text{ с}^{-1}$, электромагнитное поле описывается уравнениями [11, 13–16]. Данная система уравнений с помощью метода, представленного в [17], решается аналитически. Однако мы не будем приводить решение из-за его громоздкости. Рассмотрим только результат. На рис. 4, *b* представлен спектр электромагнитного возмущения, рассчитанный по данной формуле. Здесь же он сравнивается с экспериментальным графиком, полученным во время посадки космического корабля «Колумбия» [7]. Видно, что все основные параметры совпадают с экспериментальными данными.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МНТЦ (грант № 2990).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chmyrev V.M., Isaev N.V., Bilichenko S.V., Staney G.A. Observation by space-borne detectors of electric fields and hydromagnetic waves in the ionosphere over an earthquake center // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1989. V. 57. P. 110.
- Astafyeva E.I., Afraimovich E.L. Long-distance propagation of traveling ionospheric disturbances caused by the great Sumatra-Andaman earthquake on 26 December 2004 // *Earth, Planets and Space.* 2006. V. 58. P. 1025–1031.
- Fraser-Smith A.C., Bernardi A., McGill P.R., et al. Low-frequency magnetic field measurements near epicenter of the M_S 7.1 Loma Prieta earthquake // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. P. 1465.
- Alperovich L.S., Zheludev V.A. Long-period geomagnetic precursors of the Loma-Rieta earthquake discovered by wavelet method // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* / Ed. M. Hayakawa. Tokyo: TERRAPUB, 1999. P. 123.
- Sergeev I.Yu., Sorokin V.M. Ionospheric Generation Mechanism of the Low-Frequency Narrow-Band Electromagnetic Radiation due to Background Noise of Natural Origin before Earthquakes // *Proceedings of XXVIIIth General Assembly of URSI, New Delhi, India, October 23–29, 2005.*
- Исаев Н.В., Сорокин В.М., Чмырев В.М. Серебрякова О.Н. Электрические поля в ионосфере связанные с морскими штормами и тайфунами // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2002. Т. 42, № 5. С. 670.
- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П., Плотников А.В. Регистрация ионосферных откликов на ударно – акустические волны, генерируемые при запусках ракет – носителей // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2002. Т. 42, № 6. С. 790–797.
- Rauscher E.A., Van Bise W.L. The relationship of extremely low frequency electromagnetic and magnetic fields associated with seismic and volcanic natural activity and artificial ionospheric disturbances // *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes.* Ed. M. Hayakawa. Tokyo: TERRAPUB, 1999. P. 459–487.
- Sorokin V.M., Chmyrev V.M., Yaschenko A.K. Theoretical model of DC electric field formation in the ionosphere stimulated by seismic activity // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. V. 67. P. 1259–1268.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М. Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2002. Т. 42, № 6. С. 821–830.
- Сергеев И.Ю., Сорокин В.М., Ященко А.К. Возмущение ионосферы и электромагнитного поля на поверхности Земли при полете ракеты // *Электронный журнал «Исследовано в России».* 2005. № 219. С. 2263–2277. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/219.pdf>.
- Сергеев И.Ю., Сорокин В.М., Ященко А.К. Низкочастотное излучение осесимметричного тока в ионосферной плазме // *Известия вузов. Радиофизика.* 2000. Т. 43, № 8. С. 688–695.
- Сергеев И.Ю., Сорокин В.М., Ященко А.К. Генерация ультранизкочастотных колебаний магнитного поля горизонтальными неоднородностями ионосферной проводимости // *Труды XII Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению волн, Москва, 19–23 декабря.* 2001. Т. II. С. 452–453.
- Сергеев И.Ю., Сорокин В.М. Формирование в ионосфере спектра УНЧ-колебаний геомагнитного поля в результате сейсмической активности // *Сборник трудов пятой Российской конференции по атмосферному электричеству, Владимир, 21–26 сентября.* 2003. Т. II. С. 95–98.
- Сергеев И.Ю., Сорокин В.М. Генерация узкополосного спектра электромагнитных возмущений при полете ракеты // *Электронный журнал «Исследовано в России».* 2004. N 243. С. 2604–2611. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/243.pdf>.
- Сергеев И.Ю., Сорокин В.М. Механизм формирования узкополосного спектра низкочастотного электро-

магнитного возмущения, регистрируемого на поверхности Земли во время запусков космических аппаратов // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 4. С. 520–525.

17. Сергеев И.Ю. Изучение распространения гиротропных волн в ионосфере, представляющей собой композицию двух слоев с проводимостями Педерсена и Холла, имеющих прямоугольный профиль с горизонтально-направленным магнитным полем // Электронный журнал «Исследовано в России». 2006. (в печати).

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, fje@mail.ru