

Расчет спектров сигналов атмосфериков, распространяющихся в волноводе «земля–ионосфера», над сейсмоактивными регионами

В.В. Аргунов

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск
argunovVv@mail.ru

Аннотация. Для дистанционного мониторинга за параметрами нижней ионосферы над сейсмоактивными регионами широко применяют ОНЧ сигналы от радиостанций. Результаты указывают на появления ионосферных возмущений над эпицентром землетрясений, как во время литосферного возмущения, так и до него (предвестник). Для повышения достоверности предложено использование импульсных ОНЧ сигналов от грозовых разрядов-атмосфериков. Возмущение в нижней ионосфере, вызванное литосферными процессами, в основном выражается в виде повышения концентрации электронов и высоты волновода «земля–ионосфера». Изменение параметров ионосферы приводит к изменению условия распространения сигнала в волноводе. В работе проведено модельное рассмотрение амплитудно-спектральных вариаций низкочастотных сигналов, распространяющихся в волноводе «земля–ионосфера», при возникновении сейсмических возмущений на верхней стенке волновода – в нижней ионосфере. По результатам сопоставления с экспериментальными данными наблюдений ОНЧ сигналов рассмотрены возможные характеристики сейсмических возмущений в нижней ионосфере, обуславливающие наблюдаемые амплитудные вариации сигналов. Установлено, что вариации амплитуды сигналов, проходящих над землетрясениями, будут обусловлены изменением крутизны профиля электронной концентрации и, в меньшей степени, изменением высоты волновода. В то же время в ночных условиях интерференция модовых составляющих сигналов для случая условно малых поперечных размеров возмущения может приводить к дополнительным вариациям амплитуды сигнала при изменении размеров возмущения.

Ключевые слова: землетрясение, ионосфера, распространение радиоволн, грозовой разряд, волновод.

Calculation of Atmospheric Spectra Signals Propagation on the Earth-Ionosphere Wave-Guide over Seismoactive Regions

V.V. Argunov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk
argunovVv@mail.ru

Abstract. For remote monitoring of parameters of the bottom ionosphere over seismoactive regions the VLF- signals from radio stations are widely used. It is witnessed that there are ionospheric disturbances over the epicenter of earthquakes both during lithospheric disturbances and before it (precursor). For reliability the use of pulse VLF- signals from lightning discharges – atmospherics is suggested. The disturbance in the bottom ionosphere, caused by lithospheric processes, is mainly expressed in the form of increase of the electron concentration and height of the «earth–ionosphere» wave guide. The change of parameters of the ionosphere leads to changes of a condition of propagation of a signal in the wave guide. Modelling consideration of amplitude-spectral variations of the low-frequency signals extending in the earth–ionosphere wave guide at occurrence of seismic disturbances on the top wall of wave guide (the lower ionosphere) is carried out. By the results of a comparison with experimental data of VLF-signal observation, possible characteristics of seismic disturbances in the lower ionosphere causing observable amplitude variations of signals are considered. It is established that the variations in the amplitude of the signals passing over the earthquakes will be due to a change in the steepness of the electron concentration profile and, to a lesser extent, the change in the height of the waveguide.

Key words: earthquake, ionosphere, propagation of radio-waves, lightning discharge, wave guide.

Введение

Изучение литосферно-ионосферных связей является одним из направлений исследований сейсмических процессов в земной коре. В ряде работ по исследованию ионосферных возмущений над областями сильных землетрясений показано, что ионосфера весьма чувствительна к сейсмическим воздействиям [1]. Поиск предвестников землетрясений является одним из основных научных проблем данных исследований. Для увеличения достоверности получаемых результатов по поискам предвестников землетрясения необходимо изучить процессы при подготовке и протекании литосферных процессов и их влияние на окружающую среду. В данной работе представлены результаты модельного рассмотрения амплитудно-спектральных вариаций низкочастотных сигналов, распространяющихся в волноводе «земля–ионосфера». В наших ранее представленных работах [2, 3] мы использовали электромагнитные сигналы от грозových разрядов для дистанционного мониторинга за нижней ионосферой.

Методика

Для модельного рассмотрения типа сейсмических возмущений в нижней ионосфере и степени их проявления в низкочастотных радиосигналах использована методика расчета радиотрасс данных сигналов в волноводе «земля–ионосфера», приведенная в [4]. Данная методика за счет введения экспоненциальных высотных профилей ионизации позволяет в относительно простой форме изучать возможные вариации электронной концентрации, обусловленные внешними причинами: солнечной и геомагнитной активностью, литосферными и вулканическими процессами. Более подробное описание методики моделирования с помощью уравнения Вейта представлено в [4, 5].

Параметры сейсмического возмущения в ионосфере задавались через его высоту (высота волновода), крутизну профиля электронной концентрации, поперечные размеры области возмущения и его расположения на трассе относительно источника сигналов (грозových очагов) и пункта их приема. Минимальное расстояние от пункта приема сигналов до сейсмического возмущения принималось равным 1000 км, а

максимальная дальность до источника сигналов – обычно 6000 км (в эксперименте до 12000 км). Исходные модельные значения высоты волновода и крутизны профиля электронной концентрации задавались по данным, приведенным в [6–8]. В дневных условиях высота волновода h лежит в пределах от 60 до 75 км, а параметр β – от 0,25 до 0,33 км⁻¹. В ночных условиях типичные значения высоты волновода от 80 до 95 км, а параметра β – от 0,3 до 0,7 км⁻¹. Спектр сигнала рассчитывался до 12 кГц (в соответствии с характеристиками приемной аппаратуры). Для целей сопоставления с экспериментальными данными вычислялась среднеквадратичная амплитуда сигнала в указанной полосе частот.

Результаты

Для более приближенных к эксперименту расчетов спектральных вариаций сигналов локализуем рассмотрение введением на трассе локализованного участка с возмущением в нижней ионосфере. Основное внимание будет уделено вопросу, как сказываются пространственные размеры возмущения (в ночных условиях – через интерференционные эффекты модовых составляющих сигнала) на величину среднеквадратичной амплитуды принимаемого сигнала. На рис. 1 представлена схема расположения области возмущения с размерами Δd относительно пункта регистрации и источника грозového сигнала. Примем, что локализованный участок (Δd) может иметь протяженность вдоль трассы в пределах от 500 до 1500 км и располагаться на дальности $d_1 = 2000$ км от источника грозového сигнала и дальности $d_3 = 2000$ км до пункта регистрации. Данная схема соответствует экспериментальной возможности уверенного выделения сейсмоионосферных эффектов в сигналах от грозových разрядов [2].

В ночных условиях интерференция мод сигнала значительно меняет спектр сигнала в зависимости от размеров возмущенной области. Если в ходе развития возмущения его размеры будут меняться, то это фактически исключает возможность отслеживания появления возмущения по данным регистрации сигнала атмосфериков на одной определенной частоте. Данное обстоятельство определяет необходимость использования среднеквадратичной амплитуды по всему спектру сигнала. На рис. 2, а приведены резуль-

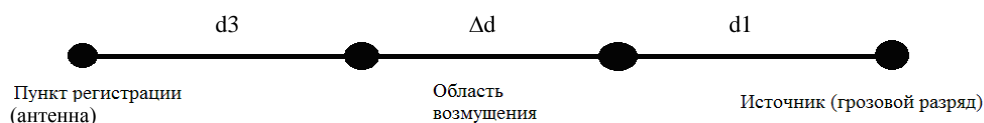


Рис. 1. Схема расположения области возмущения относительно пункта регистрации и источника грозového разряда

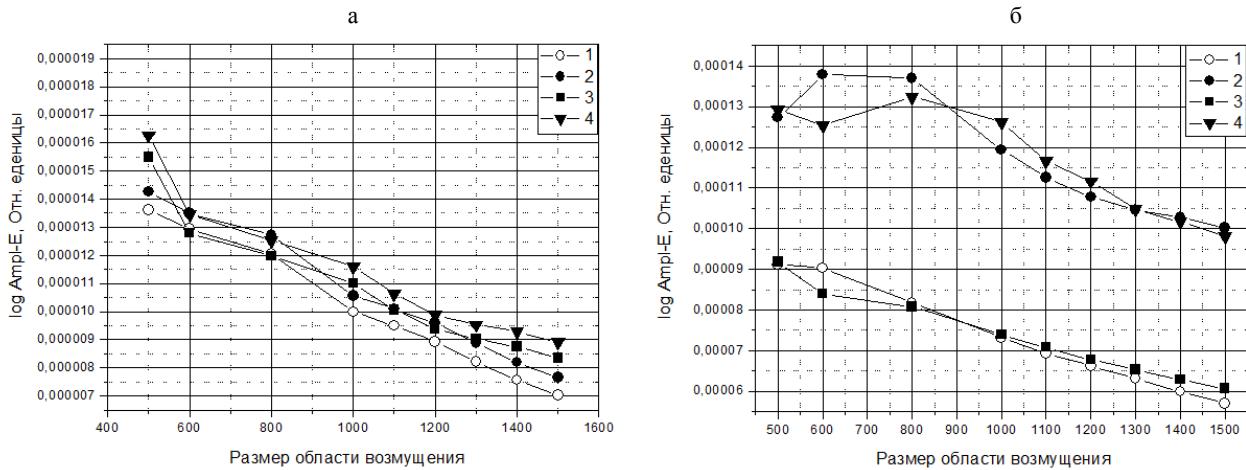


Рис. 2. Зависимость значений среднеквадратичной амплитуды электромагнитного сигнала в ночных (а) и дневных (б) условиях от размеров возмущенной области

таты расчета зависимости среднеквадратичной амплитуды сигнала в высокочастотной части спектра (от 4 до 12 кГц) в зависимости от размеров возмущенной области при следующих параметрах:

- 1) $\beta=0,3 \text{ км}^{-1}$, $h=82 \text{ км}$ (на всей трассе),
- 2) $\beta=0,5 \text{ км}^{-1}$, $h=82 \text{ км}$ (возмущенный участок),
- 3) $\beta=0,3 \text{ км}^{-1}$, $h=90 \text{ км}$ (возмущенный участок),
- 4) $\beta=0,5 \text{ км}^{-1}$, $h=90 \text{ км}$ (возмущенный участок).

На невозмущенных участках трассы $\beta=0,3 \text{ км}^{-1}$ и $h=82$.

При большей крутизне профиля электронной концентрации (параметр $\beta = 0,5 \text{ км}^{-1}$) амплитуда естественно больше (кривые 2, 4). Изменение высоты волновода по сравнению с изменением параметра β сказывается в существенно меньшей степени. С увеличением размеров возмущенной области амплитуда принимаемого сигнала в целом падает, что просто отражает факт роста затухания сигнала за счет увеличения длины трассы. В то же время при большем значении параметра β имеется диапазон условно малых размеров области возмущения, внутри которого амплитуда остается приблизительно одинаковой (диапазон размеров от 500 до 1000 км).

На рис. 2, б представлен график зависимости среднеквадратичной амплитуды высокочастотной части спектров от размеров возмущения (при соответствующем удлинении трассы) для дневных условий.

На невозмущенных участках трассы параметр $\beta=0,286 \text{ км}^{-1}$ и высота $h=65 \text{ км}$:

- 1) $\beta=0,286 \text{ км}^{-1}$, $h=65 \text{ км}$ (на всей трассе),
- 2) $\beta=0,31 \text{ км}^{-1}$, $h=65 \text{ км}$ (возмущенный участок),
- 3) $\beta=0,286 \text{ км}^{-1}$, $h=72 \text{ км}$ (возмущенный участок),
- 4) $\beta=0,31 \text{ км}^{-1}$, $h=72 \text{ км}$ (возмущенный участок).

Как видно из графиков, в дневных условиях, в отличие от ночных, во всем диапазоне возможных поперечных размеров возмущения происходит падение амплитуды сигнала с увеличением его размера – отсутствует диапазон размеров области возмущения, внутри которого амплитуда остается приблизительно одинаковой. Данное различие связано с отсутствием в дневных условиях модовой интерференции. Наибольшее значение среднеквадратичной амплитуды сигнала наблюдается при сочетании наибольшего значения крутизны электронной концентрации ($0,31 \text{ км}^{-1}$) и высоты волновода (72 км). Естественно, дневные значения амплитуды на порядок ниже ночных значений из-за большего затухания сигнала при наличии дневного слоя D.

Выводы

Таким образом, результаты расчетов среднеквадратичной амплитуды сигналов при наличии сейсмических возмущений в нижней ионосфере применительно к реальным условиям нашего эксперимента показывают, что изменение поперечных размеров возмущения в ходе его развития при неизменном положении источников сигналов не будет сказываться на вариациях дневной амплитуды. Все вариации амплитуды сигналов будут обусловлены изменением крутизны профиля электронной концентрации и, в меньшей степени, изменением высоты волновода. В то же время в ночных условиях интерференция модовых составляющих сигналов для случая условно малых поперечных размеров возмущения может приводить к дополнительным вариациям амплитуды сигнала при изменении размеров возмущения.

Работа поддержана РФФИ, проекты № 15-45-05005 р восток а, 15-45-05135 р восток а и частично РНФ (проект 14-19-01079).

Литература

1. *Hayakawa M., Molchanov O.A.* ed. (2002): *Seismo Electromagnetics; Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*. Tokyo, Terra Sci. Publ. 478 p.
2. *Mullayarov V.A., Abzaletdinova L.M., Argunov V.V. and Korsakov A.A.* Variations in the parameters of thunderstorm electromagnetic signals on paths over earthquake regions // *Geomagnetism and Aeronomy*. 51. P. 825–834.
3. *Mullayarov V.A., Druzhin G.I., Argunov V.V., Abzaletdinova L.M., Mel'nikov A.N.* Variations of VLF radio signals and atmospherics during the deep earthquake with M=8.2 occurred on 24 May 2013 near Kamchatka peninsula // *Natural Science*. 6 (3). P. 144–149.
4. *Porrat D., Bannister P.R., Fraser-Smith A.C.* Modal phenomena in the natural electromagnetic spectrum below 5 kHz // *Radio Science*. 2001. V. 36, № 3. P. 409–506.
5. *Wait J.R.* *Electromagnetic Waves in Stratified Media* // Pergamon Press. 1962. Reprinted, 1996, IEEE Press.
6. *Peter R. Bannister.* Further examples of seasonal variations of ELS radio propagation parameters // *Radio Science*, 34(1): P. 199–208, January–February 1999.
7. *Detlev Borgmann.* Theoretical and experimental coverage analysis of a VLF transmitter // In *ELF/VLF/LF Radio Propagation and Systems Aspects AGARD-CP-529*. 1993. P. 6-1 – 6-5.
8. *Peter R. Bannister.* *Radio Science*. 1985. P. 977–984.

Поступила в редакцию 22.05.2017