

ОЦЕНКА ВЫСОТЫ НОЧНОЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ОНЧ-НАБЛЮДЕНИЙ В ГФО «МИХНЕВО»

Е.Н. Козакова, И.А. Ряховский

Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия
katyam98@yandex.ru

ESTIMATION OF THE NIGHT LOWER IONOSPHERE'S HEIGHT ACCORDING TO VLF OBSERVATIONS IN THE GEOPHYSICAL OBSERVATORY "MIKHNEVO"

E.N. Kozakova, I.A. Ryakhovskiy

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, Russia
katyam98@yandex.ru

Аннотация. Любые процессы, вызывающие изменение профиля электронной концентрации в нижней ионосфере, приводят к значительным вариациям амплитудно-фазовых характеристик электромагнитных сигналов, распространяющихся в волноводе Земля–ионосфера. Таким образом, электромагнитное излучение ОНЧ-диапазона (3–30 кГц) является эффективным инструментом для исследования состояния и динамики нижней ионосферы. В работе использовались экспериментальные данные амплитудных измерений, полученные в ГФО «Михнево» (54.9° N, 37.7° E) в 2014–2020 гг. от СДВ станции NAA, которые позволили оценить высоту неосвещенного волновода Земля — нижняя ионосфера, а также выделить сезонные и годовые вариации.

Ключевые слова: D-область ионосферы, терминатор, СДВ сигналы, интерференционные минимумы.

Abstract. Any processes that cause a change in the electron concentration profile in the lower ionosphere lead to significant variations in the amplitude-phase characteristics of electromagnetic signals propagating in the Earth-ionosphere waveguide. Thus, electromagnetic radiation of the VLF range (3–30 kHz) is an effective tool for studying the state and dynamics of the lower ionosphere. In this work, we used experimental data of amplitude measurements obtained in the geophysical observatory "Mikhnevo" (54.9° N, 37.7° E) in 2014–2020 from the station NAA, which allowed us to estimate the height of the unilluminated waveguide Earth – lower ionosphere, as well as to identify seasonal and annual variations.

Keywords: ionospheric D-region, terminator, VLF signals, interference minima.

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное излучение ОНЧ-диапазона (3–30 кГц) распространяется в волноводе Земля–ионосфера на большие расстояния с очень малым ослаблением [Cummer, 1997]. Гелиогеофизические процессы (солнечные вспышки, протонные и электронные выбросы, терминатор) оказывают существенное влияние на амплитудно-фазовые характеристики сигналов СДВ-диапазона [Desanka et al., 2010].

В геофизической обсерватории «Михнево» (54.9° N, 37.7° E) более семи лет ведется непрерывный мониторинг амплитудно-фазовых характеристик сигналов КНЧ/ОНЧ-диапазона [Gavrilov et al., 2019a]. Большой объем экспериментальных данных позволяет оценить динамику изменений высоты отражения радиосигналов ОНЧ-диапазона от неосвещенной части нижней ионосферы в различных гелиогеофизических условиях.

Для исследования состояния нижней ионосферы использовались амплитудные характеристики сигнала от станции NAA за период с 2014 по 2020 год (рис. 1).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 показан пример суточного хода амплитуды сигнала от станции NAA, принятого в ГФО «Михнево» 15 августа 2015 г. На графике видны три отчетливых минимума амплитуды сигнала (t_1 , t_2 , t_3), наличие которых обусловлено изменением конфигурации волновода (модовой интерференцией), вызванным прохождением утреннего терминатора через трассу распространения сигнала [Crombie, 1966].

Используя несколько минимумов амплитуды сигнала ОНЧ-диапазона, можно оценить интерференционное расстояние (D) волновода (Рис. 3) с помощью следующих соотношений [Lynn, 2010; Samanes et al., 2015]:

$$\begin{cases} D = \frac{D_{12} + D_{23}}{2} \\ D_{12} = d_1(t_1) - d_2(t_2) \\ D_{23} = d_2(t_2) - d_3(t_3) \end{cases}$$

где ($d_i(t_i)$) — это расстояние от положения терминатора на трассе распространения сигнала до передатчика в моменты времени (t_1 , t_2 , t_3).

В свою очередь, величина D напрямую связана с высотой неосвещенной части волновода

$$D = \frac{4h_n^2}{\lambda},$$

где h_n — высота неосвещенного волновода, км; λ — длина волны, км.

Ниже представлен график изменения высоты неосвещенного волновода h_n в течение 2014–2020 гг., рассчитанной для трассы NAA—ГФО «Михнево» (рис. 4).

Максимальные значения высоты h_n наблюдались в зимнее время, а минимальные — в летнее. Виден отчетливый сезонный ход, связанный с естественной освещенностью Земли, также наблюдается возрастающий тренд увеличения среднегодовой высоты неосвещенного волновода. За период наблюдений с 2014 по 2020 г. на трассе NAA—«Михнево» сред-

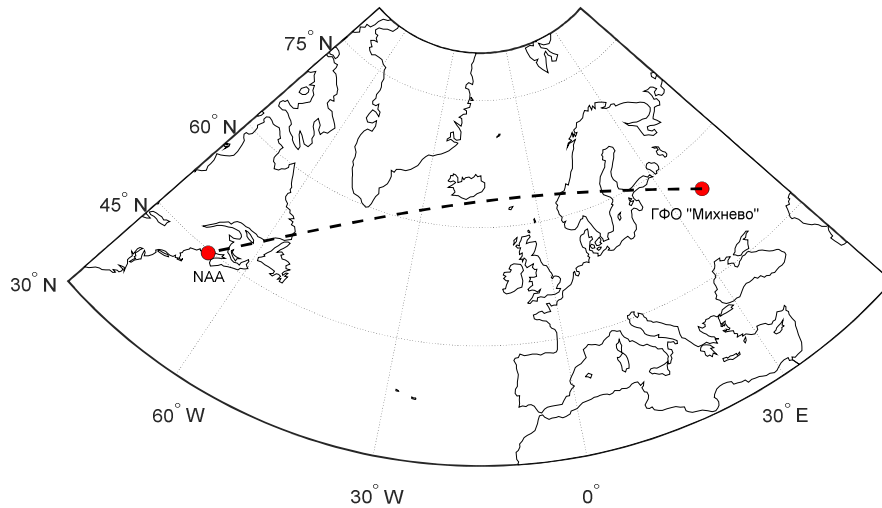


Рис. 1. Схема расположения СДВ станции NAA и геофизической обсерватории «Михнево»

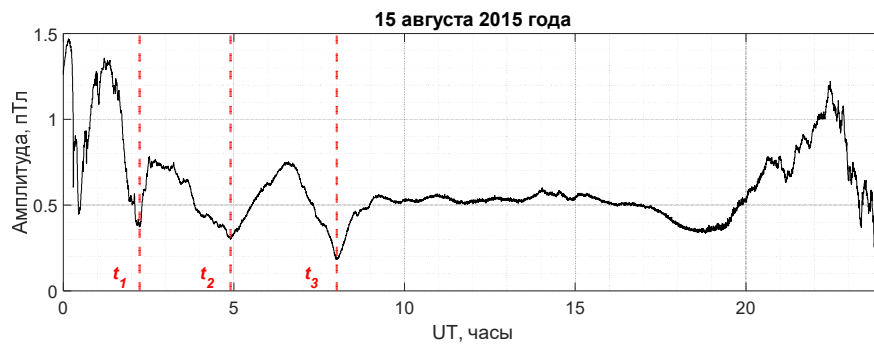


Рис. 2. Амплитуда сигнала от станции NAA, зарегистрированная в ГФО «Михнево» 15.08.2015

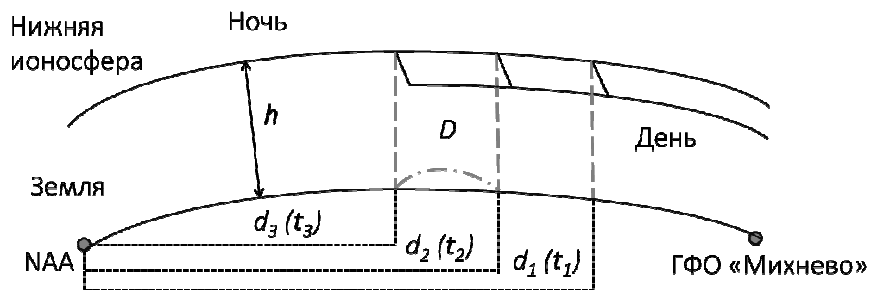


Рис. 3. Схема волновода Земля—ионосфера в моменты t_1, t_2, t_3

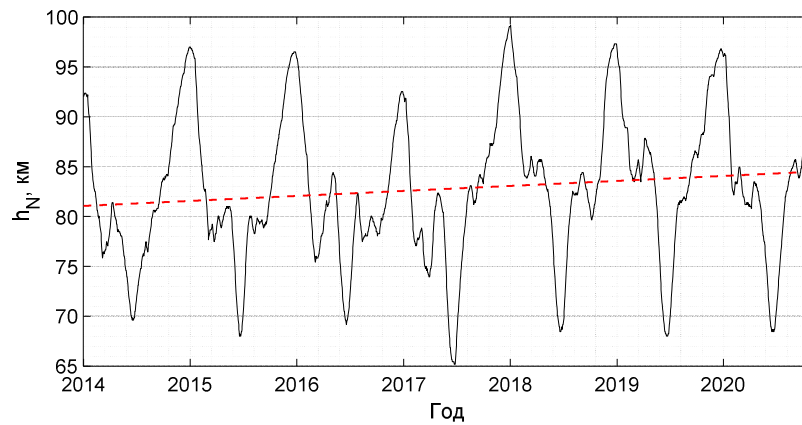


Рис. 4. Изменение высоты неосвещенного волновода в течение 2014–2020 гг. для трассы NAA—ГФО «Михнево»

нее значение высоты неосвещенного волновода h_n составило 81.1 км. Полученные результаты согласуются со значениями, полученными в [Chand, Kumar, 2017; Crombie, 1966].

Спектральный анализ позволил выделить ярко выраженные годовые вариации, а также 120-дневные вариации, предположительно связанные с периодичностью положения терминатора относительно трассы распространения сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большой объем экспериментальных данных позволил оценить высоту неосвещенного волновода на трассе НАА-ГФО «Михнево» и выделить возрастающий тренд увеличения среднегодовой высоты неосвещенного волновода. Высота неосвещенного волновода для трассы распространения сигнала НАА-ГФО «Михнево» изменялась в широком диапазоне. Спектральный анализ позволил выделить ярко выраженные годовые и 120-дневные вариации.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Chand A.E., Kumar S. VLF modal interference distance and nighttime D region VLF reflection height for west-east and east-west propagation paths to Fiji. *Radio Sci.* 2017. Vol. 52. P. 1004–1015. DOI: [10.1002/2016RS006221](https://doi.org/10.1002/2016RS006221).

Crombie D.D. Further Observations of Sunrise and Sunset Fading of Very-Low-Frequency Signals. *Radio Sci.* 1966. Vol. 1. (New Series), no. 1. P. 47–51.

Cummer St. A. Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics. *Stanford VLF Group*. 1997. 152.

Desanka Š., Nina A., Vladimir S. Numerical Simulations Of The Effect Of Localised Ionospheric Perturbations On Subionospheric VLF Propagation. *Publ. Astron. Obs. Belgrade*, 2010. No. 89. P. 391–395.

Gavrilov B.G., Ermak V.M., Poklad Y.V., et al. Estimate of variations in the parameters of the midlatitude lower ionosphere caused by the solar flare of September 10, 2017. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019a. Vol. 59. DOI: [10.1134/S0016793219050049](https://doi.org/10.1134/S0016793219050049).

Lynn K.J.W. VLF Waveguide Propagation. The Basics, Ionospheric Systems Research, 16 Heritage Dr., Noosaville 4566, Australia, 2010. DOI: [10.1063/1.3512893](https://doi.org/10.1063/1.3512893).

Samanes J.E., Raulin J.-P., Macotela E.L., Guevara Day W.R. Estimating the VLF modal interference distance using the South America VLF Network (SAVNET). *Radio Sci.* 2015. Vol. 50. P. 122–129. DOI: [10.1002/2014RS005582](https://doi.org/10.1002/2014RS005582).