

УДК 550.388.2

ВЛИЯНИЕ ОСВЕЩЕННОСТИ ТРАСС НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ СДВ-ДИАПАЗОНА

© 2023 г. Е. Н. Козакова^{1, 2, *}, И. А. Ряховский^{1, **}, Ю. В. Поклад^{1, ***},
Б. Г. Гаврилов^{1, ****}, В. М. Ермак^{1, *****}, Н. С. Ачкасов^{1, *****}

¹Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН (ИДГ РАН), Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (МФТИ), Долгопрудный, Россия

*e-mail: ekaterinamakh20@gmail.com

**e-mail: ryakhovskiy88@yandex.ru

***e-mail: poklad@mail.ru

****e-mail: boris.gavrilov34@gmail.com

*****e-mail: ermakvladimir@mail.ru

*****e-mail: nsachkasov@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 30.09.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Обсуждается влияние освещенности трассы на амплитуду сверхдлинноволновых радиосигналов при прохождении солнечного терминатора. На основе многолетних измерений (с 2014 по 2020 г.) показано, что в зимний период резкое падение амплитуды сигнала на среднеширотных трассах происходит уже при освещении 15% длины трассы. Анализ вариаций амплитуды сверхдлинноволновых сигналов также позволил оценить высоту их отражения от верхней стенки неосвещенной части волновода h_N (D – область ионосферы) и выявить сезонные и годовые вариации этой величины. Экспериментально обнаружен тренд увеличения h_N примерно на 4 км за семь лет, вызванный спадом солнечной активности в этот период.

DOI: 10.31857/S0016794022100297, EDN: DMCDNZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитное излучение очень низкочастотного диапазона (ОНЧ, 3–30 кГц) распространяется в волноводе Земля–ионосфера на расстояния в десятки тысяч километров с ослаблением в несколько дБ [Cummer, 1997]. В [Wait and Spies, 1964; Mitra, 1974] показано, что гелиогеофизические процессы (солнечные вспышки, магнитные бури, протонные и электронные высыпания, положение терминатора) оказывают существенное влияние на профиль электронной концентрации в нижней ионосфере, что приводит к значительным изменениям амплитуды и фазы сигналов сверхдлинноволнового (СДВ) диапазона (верхняя граница волновода находится в D -области ионосферы). Наблюдаются устойчивые суточные и сезонные вариации и их зависимость от солнечной активности.

В суточных вариациях амплитуды ОНЧ-сигналов наблюдается выраженные минимумы во время прохождения утреннего и вечернего солнечного терминатора через трассу распространения сигнала [Samanes et al., 2015]. Время появления

наблюдаемых минимумов и их количество зависит от широты трассы, ее длины и ориентации по отношению к линии терминатора и определяется интерференцией различных мод распространения радиосигнала в изменяющемся волноводе [Meara, 1973; Lynn, 2010].

Исследованию влияния положений солнечного терминатора на трассе, определяющих появление минимумов амплитуды сигналов, посвящено значительное количество работ. В [Samanes et al., 2015; Šulić et al., 2015; Chand and Kumar, 2017] показана возможность использования амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ-станций для оценки модального интерференционного расстояния D_{MS} (расстояния между положением терминатора в моменты наблюдения минимумов сигнала). Šulić et al., [2015], основываясь на измерениях параметров ОНЧ-сигналов на среднеширотных европейских трассах пришли к заключению, что появление амплитудных минимумов может наблюдаться, когда линия утреннего терминатора достигает высоты 95 км. Если это происходит в середине трассы, создаются условия для появления первого минимума амплитуды и перехода фа-

зового уровня сигнала от значения, характерного для ночного времени, к уровню, типичному для дневных условий. Crombie [1964] показал, что на трассе запад–восток во время восхода солнца наблюдался глубокий минимум амплитуды сигнала, когда линия терминатора находилась близко к передатчику. Эти наблюдения противоречат данным Walker [1965], где на основе результатов изучения параметров сигналов на экваториальных трассах показано, что минимум сигнала, связанный с утренним терминатором, наблюдается, когда линия тени находится почти над приемником, в то время как минимум, связанный с вечерним терминатором, продолжается в течение приблизительно 2 ч после того, как линия тени прошла над излучателем. Вопрос о влиянии положения терминатора и соотношения длины освещенного солнцем участка трассы к длине неосвещенного волновода на время появления минимумов амплитуды сигнала для конкретных трасс является важным с точки зрения прогнозирования условий распространения неискаженного ОНЧ-радиосигнала. В настоящей работе делается попытка прояснить вопрос об изменении амплитуды ОНЧ-сигналов во время прохождения утреннего терминатора на среднеширотных трассах существенно разной длины с использованием результатов семилетних наблюдений в геофизической обс. ИДГ РАН Михнево.

Использование амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ-станций для оценки модального интерференционного расстояния D_{MS} дает возможность также оценить высоту неосвещенной части волновода h_N [Crombie, 1964; Crombie 1966] – параметр, в значительной степени определяющий условия распространения ОНЧ-радиосигналов. В работах [Samanes et al., 2015; Chand and Kumar, 2017] этот вопрос рассматривался для экваториальных и субэкваториальных трасс, где взаимная ориентация пути распространения радиосигнала и линии тени для утреннего и вечернего терминатора не подвержена существенным сезонным вариациям. Использование ОНЧ-излучения от молниевых разрядов позволило [Nap and Sumner, 2010] оценить высоту неосвещенной части волновода для среднеширотной ионосферы. Среднее значение этой величины за июль и август 2005 г. составило 84.9 ± 1.1 км. В [Šulić et al., 2016] подробно рассмотрено воздействие различных геофизических факторов на амплитудные и фазовые характеристики ОНЧ-/ОНЧ-радиосигналов, полученные в результате мониторинга на среднеширотных европейских трассах. Однако влияние изменения положения и ориентации линии солнечного терминатора на параметры радиосигналов в работе не исследовалось. Большой объем экспериментальных данных по вариациям амплитудно-фазовых характеристик сигналов ОНЧ-диапазона, зарегистрированных в ГФО Мих-

нево позволил сделать соответствующие оценки для среднеширотных трасс.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

В ГФО Михнево (54.9° N, 37.7° E) ведется непрерывная регистрация амплитудно-фазовых характеристик электромагнитных сигналов от СДВ-станций, расположенных по всему миру [Gavrilov et al., 2019]. Прием сигналов осуществляется с использованием рамочных антенн “Плутон”, обладающих чувствительностью 0.4–0.5 фТл/√Гц в диапазоне частот от 0.8 до 50 кГц [Ryakhovskii, 2021].

Для анализа динамики высоты неосвещенной части волновода нами использованы данные регистрации амплитуды сигналов от СДВ-передатчиков NAA и GBZ с 2014 по 2020 года. Передатчик GBZ расположен в Великобритании (54.91° N, 3.28° W) и работает на частоте 19.6 кГц, передатчик NAA расположен в США (44.65° N, 67.28° W) и работает на частоте 24 кГц. Схема расположения передатчиков GBZ и NAA и приемника в ГФО Михнево показана на рис. 1. Протяженность трассы от передатчиков NAA и GBZ до обс. Михнево составляет 6914 км и 2590 км соответственно.

В работах [Samanes et al., 2015; Šulić et al., 2015; Chand, Kumar, 2017] подробно исследуются вариации амплитуды сигнала после ее изменения, связанного с прохождением терминатора. Измерения в ГФО Михнево обеспечили значительный объем экспериментальных данных по вариациям параметров СДВ-сигналов на среднеширотных трассах и позволили определить сам момент резкого падения амплитуды радиосигнала и отвечающие ему положение и ориентацию терминатора, исследовать динамику изменения моментов времени, соответствующих минимумам амплитуды сигналов t_1, t_2, t_3 , и значение интерференционного расстояния D_{MS} для среднеширотной трассы.

На рисунке 2 показан пример суточного хода изменения амплитуды сигнала от передатчика GBZ. Начиная с момента времени t_0 (вертикальная пунктирная линия), наблюдается резкое снижение амплитуды, связанное с изменением освещенности нижней ионосферы при прохождении через трассу утреннего терминатора. На рис. 3 показаны кривые зависимости момента времени t_0 (черной кривой показаны медианные значения) от дня года за период с 2014 по 2020 г.

Для исследования вопроса о том, изменение освещенности какой части трассы является определяющим для искажения сигнала, был рассчитан параметр $K_o = L_{cb}/L_T$, представляющий собой отношение длины освещенной части трассы L_{cb} к длине участка трассы, находящейся в тени L_T . За-

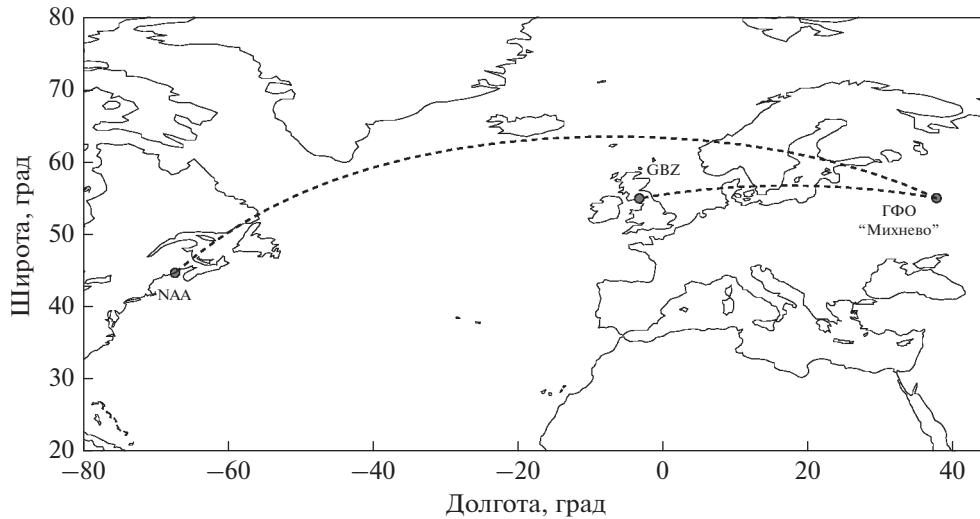


Рис. 1. Схема расположения СДВ-станций GBZ, NAA и ГФО Михнево. Пунктирными линиями обозначены трассы распространения сигнала.

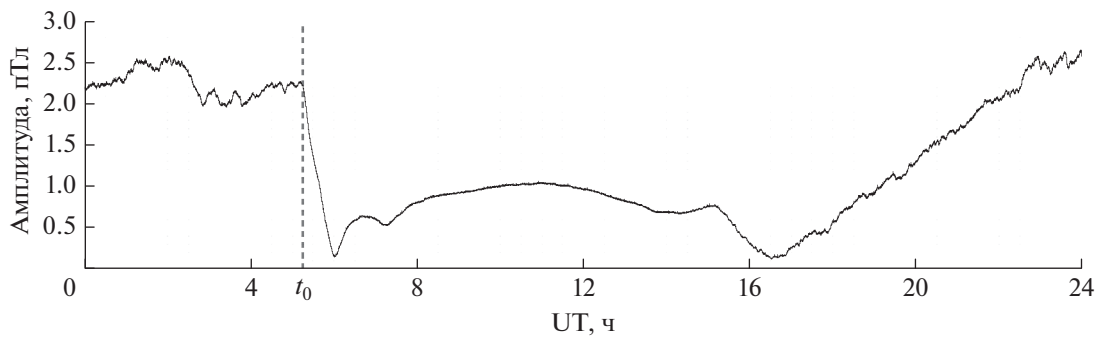


Рис. 2. Пример суточного хода амплитуды сигнала от ст. GBZ 1 января 2015 г., t_0 — момент времени, начиная с которого наблюдается резкое снижение амплитуды сигнала (вертикальная пунктирная линия).

висимость параметра K_0 от дня года для всего периода наблюдений для трассы GBZ–“Михнево” показана на рис. 4а. Различие результатов для зимнего и летнего периодов обусловлено изменением ориентации терминатора по отношению к трассе распространения сигнала (рис. 4б, 4в) — ситуация характерная именно для среднеширотных трасс. Из рис. 4 видно, что резкое падение амплитуды сигнала на среднеширотной трассе GBZ–Михнево в зимнее время происходит уже при освещении 15% длины трассы, в летний период значение величины K_0 может достигать 46%.

Как было показано в работах [Crombie, 1964; Crombie 1966] данные по изменению амплитуды сигналов СДВ-станций, расположенных на достаточном удалении от приемника, могут быть использованы для оценки высоты отражения радиосигнала на неосвещенной части волновода Земля–ионосфера. Непосредственное измерение

ночного профиля электронной концентрации в D – E областях ионосферы представляет собой сложную экспериментальную задачу, и возможность независимой оценки этого параметра по данным изменения амплитуды ОНЧ-радиосигнала представляется крайне важной.

На рисунке 5а показан типичный суточный ход изменения амплитуды сигнала от станции NAA. Положение линии терминатора на трассе NAA–Михнево в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 схематически представлено на рис. 5б. Ступенчатое изменение высоты волновода при прохождении утреннего терминатора вызвано повышением электронной концентрации на освещенной части трассы.

В [Chand, Kumar, 2017; Samanes, 2015] показано, что для оценки модального интерференционного расстояния D_{MS} необходимо наличие двух или более минимумов в амплитуде сигнала. Для

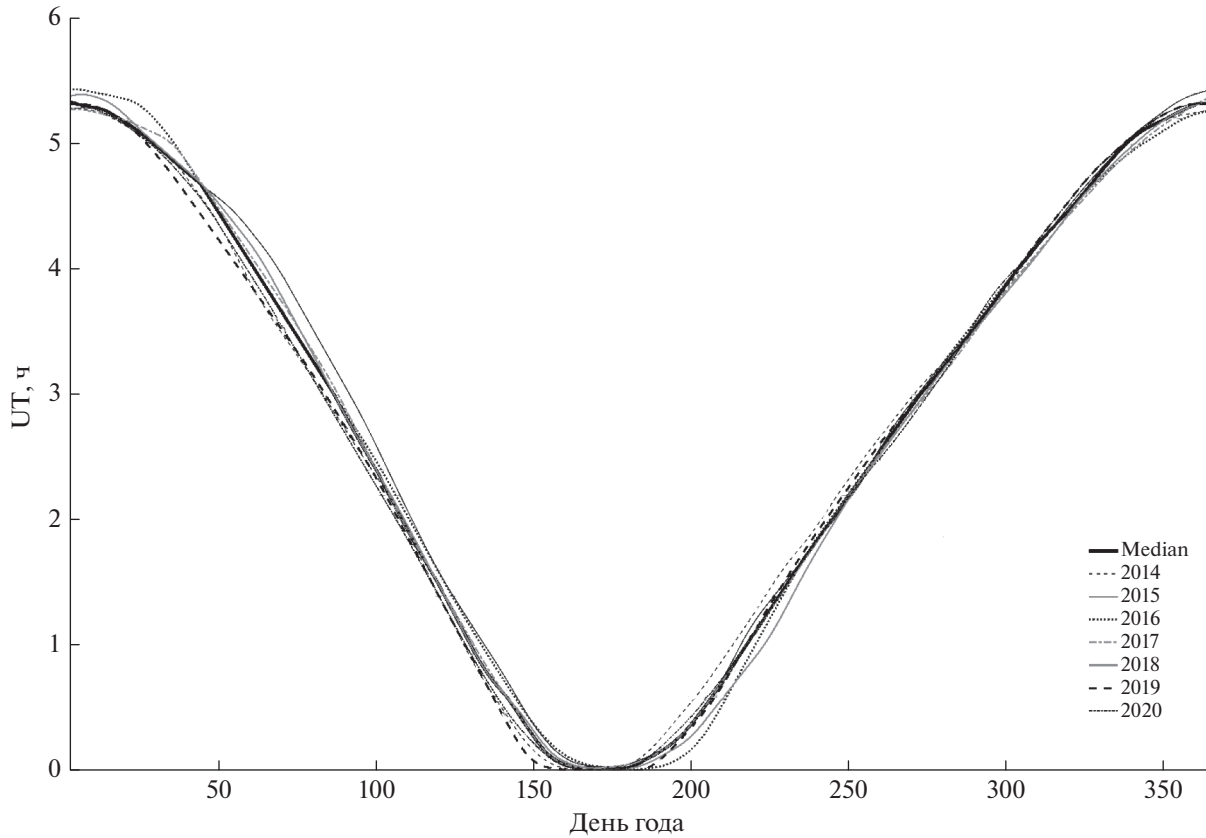


Рис. 3. Зависимости момента времени t_0 от дня года за период с 2014 по 2020 г.

оценки значения D_{MS} в [Samanes et al., 2015] используются следующие соотношения:

$$\begin{cases} D_{MS} = \frac{D_{12} + D_{23}}{2} \\ D_{12} = d_1 - d_2 \\ D_{23} = d_2 - d_3, \end{cases} \quad (1)$$

где d_i — длина неосвещенной части трассы в моменты времени t_i .

Из рисунка 6 видно, что время появления минимума амплитуды сигнала имеет очевидную сезонную зависимость, что связано с периодичностью изменения ориентации и времени прохождения терминатора в течение года.

Значительное различие между первым и вторым Δt_{12} и вторым и третьим Δt_{23} интервалами времени обусловлено неравномерной скоростью распространения линии терминатора вдоль среднеширотных трасс. На экваториальных и субэкваториальных трассах, где скорость терминатора вдоль трассы равномерна, временные интервалы между минимумами примерно одинаковы [Samanes, 2017; Chand, Kumar, 2016; Samanes, 2015].

Среднее значение модального интерференционного расстояния D_{MS} для трассы NAA–Мих-

нево соответствует величине 2000 км. В работе [Chand and Kumar, 2016] для субэкваториальной трассы NLK (24.8 кГц, 48.203° N, 121.917° W) – Suva (18.149°S, 178.446° E) среднее значение D_{MS} составило 2513 ± 113 км. Отличие наших результатов от данных [Chand and Kumar, 2016] обусловлено разным положением трасс и частот передатчиков.

Соотношение, связывающее модальное интерференционное расстояние D_{MS} с высотой неосвещенной части волновода h_N , впервые было получено в работе [Crombie, 1966]:

$$D_{MS} = \frac{4h_N^2}{\lambda}, \quad (2)$$

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

С использованием этого выражения, были рассчитаны годовые вариации h_N на трассе NAA–“Михнево” (рис. 7). На нижней панели рис. 7 показано изменение потока солнечного излучения в линии Лайман- α с 2014 по 2020 г., рассчитанного по данным (<https://lasp.colorado.edu/lisird/>). Наблюдается периодическое изменение высоты неосвещенной части волновода, связанное с сезонным изменением естественной освещенности

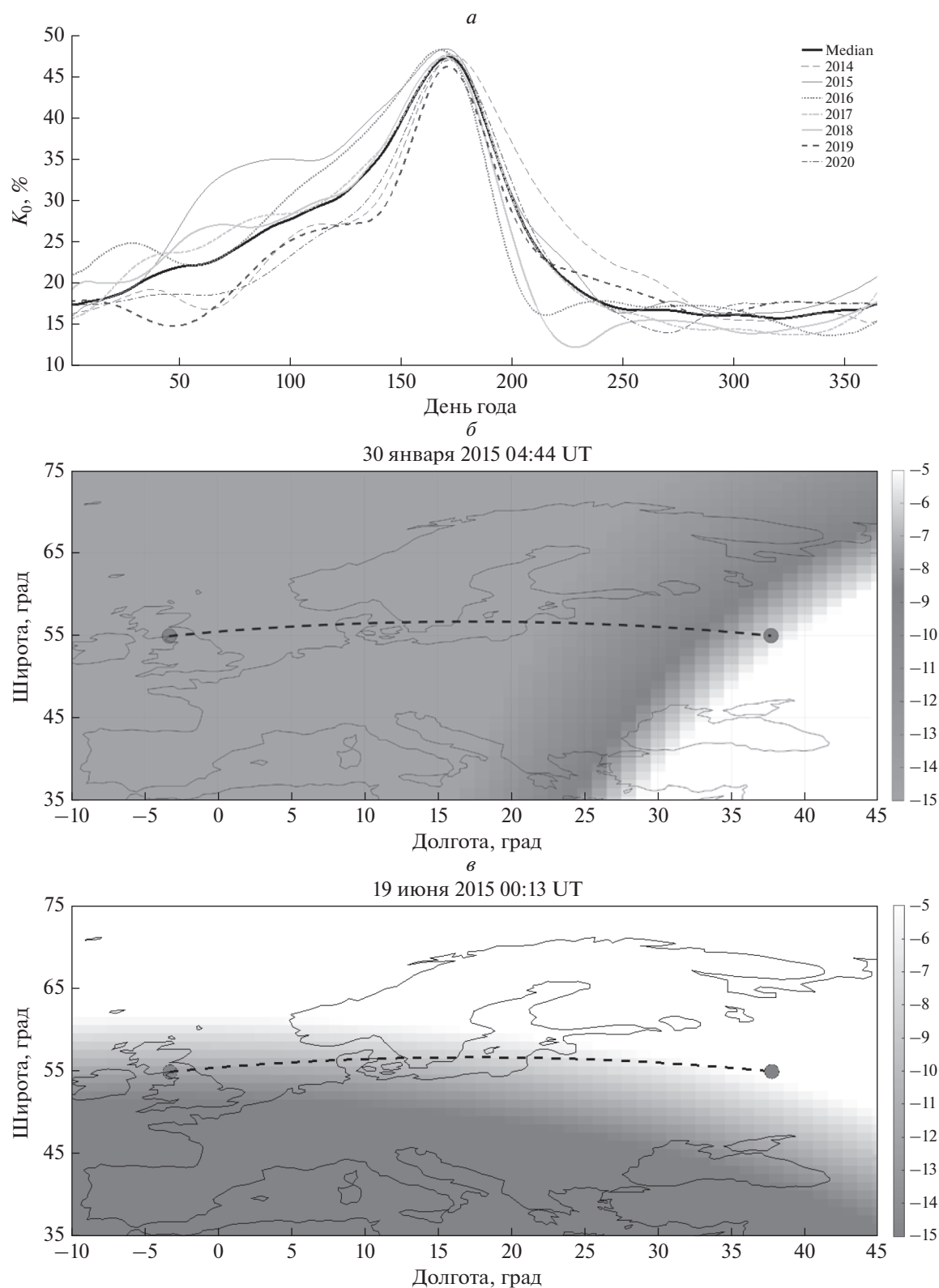


Рис. 4. Параметр освещенности на трассе GBZ– Михнево. Вариации параметра K_0 трассы GBZ на высоте 70 км в момент времени t_0 , начиная с которого наблюдается резкое снижение амплитуды сигнала (*a*). Положение утреннего терминатора 30 января 2015 г. ($t_0 = 04:44$ UT) (*б*). Положение утреннего терминатора 26 июня 2015 г. ($t_0 = 00:13$ UT) (*в*).

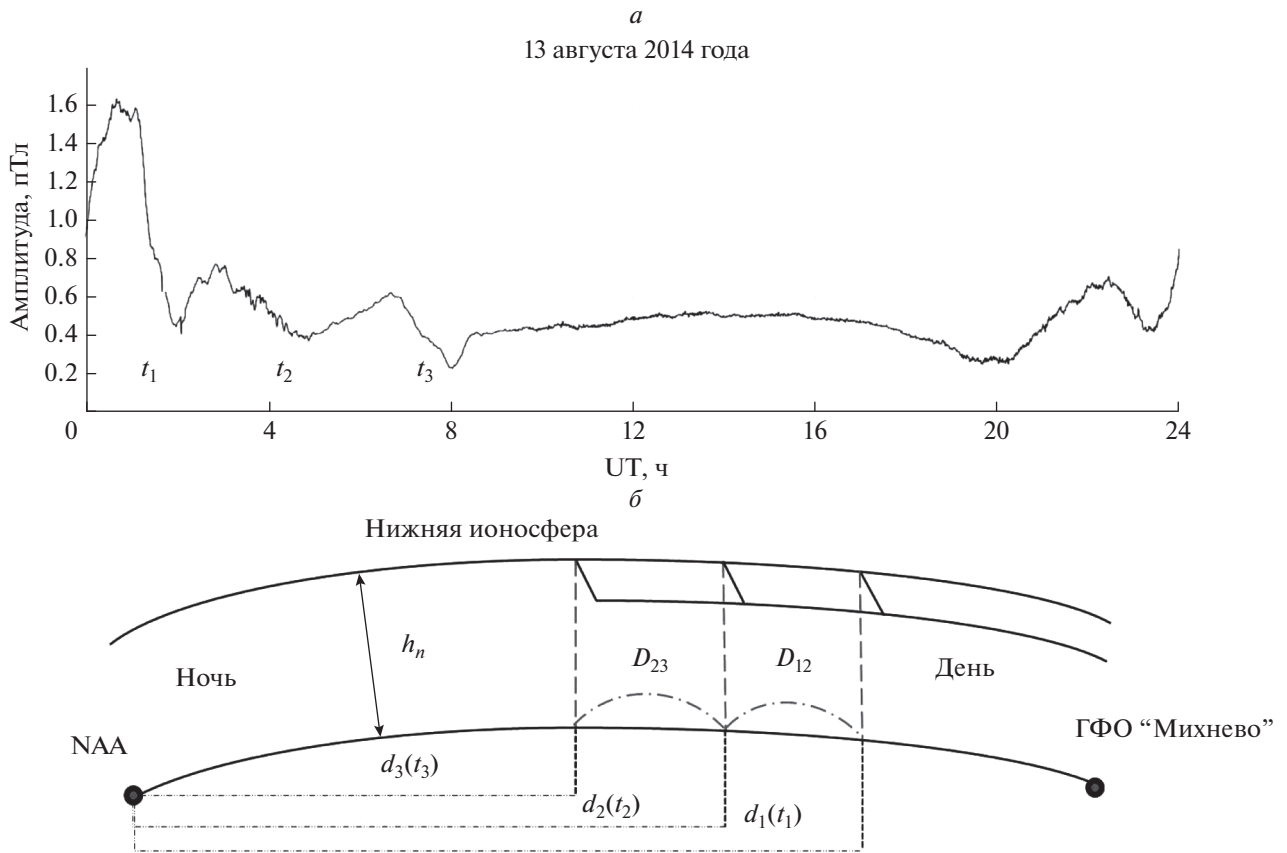


Рис. 5. Связь амплитудных характеристик сигнала на трассе NAA – Михнево с положением утреннего терминатора. Пример суточного хода амплитуды сигнала (*a*). Схема положения утреннего терминатора в моменты времени t_1, t_2, t_3 (*б*).

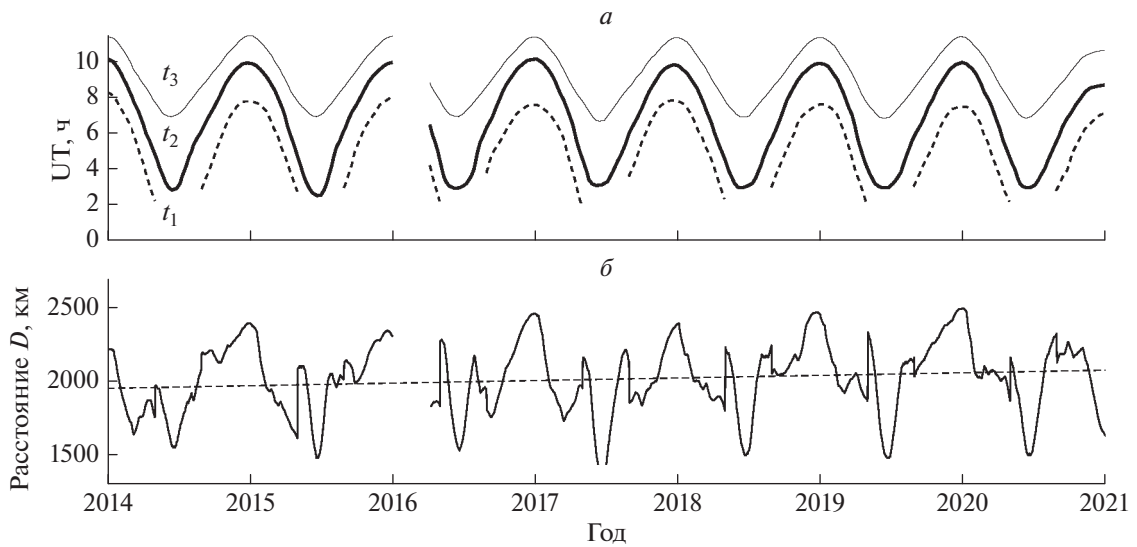


Рис. 6. Связь модального интерференционного расстояния на трассе NAA–Михнево с временем наблюдения минимумов сигналов с 2014 по 2020 г. Время появления минимумов сигналов $t_1, t_2,$ и t_3 (*a*). Модальное интерференционное расстояние D_{MS} (*б*).

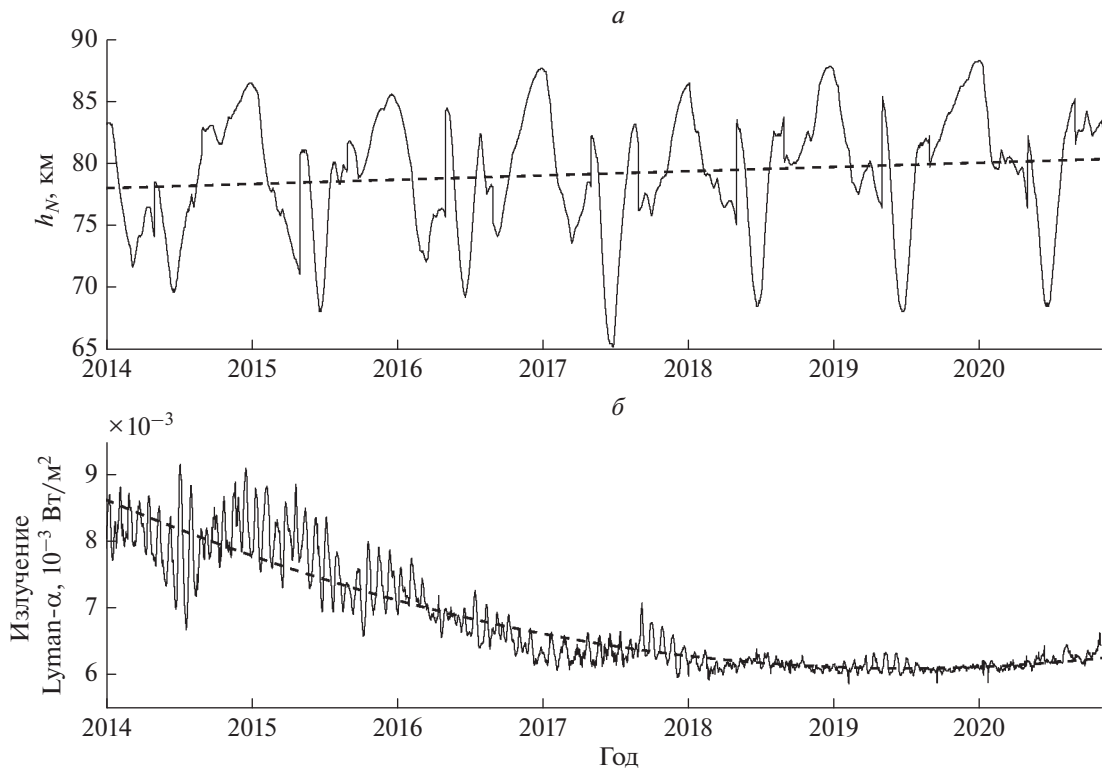


Рис. 7. Связь высоты неосвещенной части волновода с 11-летним циклом солнечной активности. Вариации высоты неосвещенной части волновода h_N для трассы NAA–Михнево (а). Поток солнечного излучения в линии Lyman- α (б).

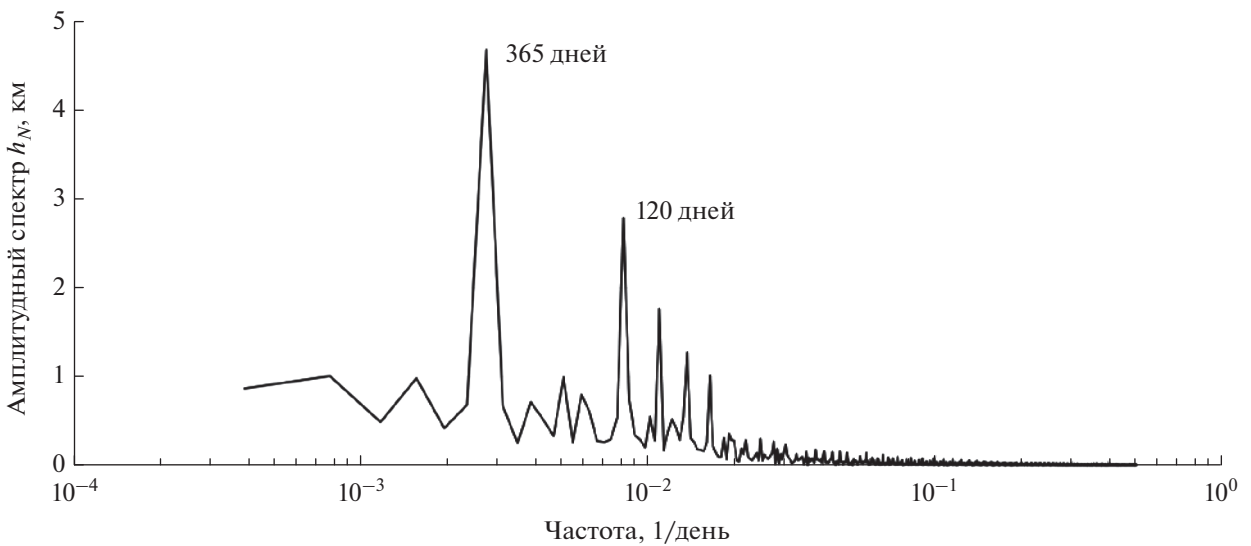


Рис. 8. Амплитудный спектр значений высоты неосвещенного волновода.

Земли, и общий тренд увеличения h_N примерно на 4 км за семь лет. Тренд, по-видимому, связан с изменением профиля электронной концентрации в нижней ионосфере, вызванным спадом солнечной активности в этот период.

Спектральный анализ вариаций высоты неосвещенной части волновода за период с 2014 по 2020 года позволил выявить характерные периодичности — ярко выраженные пики с периодом 365, 120 дней и более низких частот (рис. 8). В [Sa-

manes, 2017] и ссылках к этой работе показано, что спектральный анализ временной эволюции высоты отражения радиосигналов демонстрирует очевидную периодичность этого параметра. Доминируют годовые и полугодовые периоды. В то же время в работах [Takahashi et al., 1995; Huang et al., 2006] указывается на наблюдение осцилляций интенсивности и температуры свечения в ионосфере и на других частотах, в том числе близких к наблюдаемому в наших экспериментах периоду 120 дней. Вопрос о природе наблюдаемых пиков вариаций высоты отражения требует специального рассмотрения, которым будет посвящены дальнейшие исследования.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что анализ изменения параметров радиосигналов КНЧ–НЧ диапазонов, распространяющихся в волноводе ионосферы, является эффективным инструментом исследования влияния различных гелиогеофизических факторов (солнечные вспышки, магнитные бури, протонные и электронные высыпания, положение терминатора) на состояние и динамику нижней ионосферы [Wait and Spies, 1964; Mitra, 1974]. Изучение вариаций параметров сигнала при изменении состояния верхней стенки волновода, связанным с прохождением по трассе распространения солнечного терминатора, является одним из методов, позволяющих прогнозировать и учитывать суточные вариации условий распространения радиосигналов.

Изменения амплитуды и фазы ОНЧ-радиосигналов и пространственно-временное распределение минимумов амплитуды на экваториальных и субэкваториальных трассах достаточно подробно исследованы [Crombie, 1964; Crombie, 1966; Walker, 1965; Maurya et al., 2014; Desanka et al., 2010]. Изучению этих процессов на среднеширотных трассах уделялось гораздо меньше внимания. Анализ вариаций параметров ОНЧ-сигналов на среднеширотных трассах выявил их существенное отличие от вариаций сигналов на низкоширотных трассах, что связано с различной динамикой и ориентацией солнечного терминатора на разных широтах. Проведение таких исследований обеспечивалось наличием уникальных данных по измерению и анализу характеристик ОНЧ-радиосигналов, непрерывно наблюдаемых в ГФО Михнево с 2011 г.

Важный аспект проведенных исследований связан с определением влияния на параметры сигналов ориентации солнечного терминатора и соотношения длин освещенного и неосвещенного участков трассы. Анализ результатов измерений показал, что для среднеширотных трасс момент резкого снижения амплитуды сигнала в зимний период отмечается уже при освещенно-

сти ~15% длины трассы. Этот параметр испытывает значительные сезонные вариации, характерные именно для среднеширотных трасс и связанные с изменением взаимной ориентации линии терминатора и трассы распространения радиосигнала в течение года.

Важным приложением таких исследований является возможность использования данных по изменению амплитуды сигналов СДВ-станций и расстояния между положением терминатора в моменты наблюдения минимумов сигнала (модального интерференционного расстояния D_{MS}) для оценки высоты отражения радиосигнала на неосвещенной части волновода. Для оценки значения D_{MS} мы использовали методику [Samanes et al., 2015]. По данным за период с 2014 по 2020 года определено среднее значение модального интерференционного расстояния для среднеширотной трассы NAA–ГФО Михнево $D_{MS} \sim 2000$ км, что существенно отличается от результатов, полученных для экваториальных и субэкваториальных трасс [Chand and Kumar, 2016]. Также как и в случае высоты отражения сигнала от неосвещенной части ионосферы, разница в значениях D_{MS} для среднеширотных и экваториальных трасс обусловлена разной динамикой терминатора и его ориентации по отношению к трассе распространения радиосигнала.

Исследования динамики изменения высоты отражения радиосигнала показали, что величина h_N испытывает значительные сезонные вариации с характерными периодами в 365 и 120 дней. Медианное значение этой величины за период наблюдения составило 79.2 км, что на 5–7 км ниже значений h_N (84.9 ± 1.1 км), полученных [Han and Sumner, 2010]. Различия в полученных значениях h_N могут быть обусловлены более длительным периодом наших наблюдений. Обнаружен общий тренд увеличения среднегодовой высоты неосвещенного волновода примерно на 4 км за семь лет наблюдений, связанный с изменением профиля электронной концентрации в нижней ионосфере в результате снижения солнечной активности за этот период [Samanes, 2017].

Полученные данные имеют существенное практическое значение с точки зрения прогнозирования условий неискаженной передачи и приема сигналов ОНЧ-диапазона, используемых в связных, информационных и навигационных системах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по проекту № 122032900175-6 в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Chand A.E., Kumar S.* VLF modal interference distance for a west-east propagation path to Fiji // 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC). P. 1306–1309. 2016.
<https://doi.org/10.1109/URSIAP-RASC.2016.7601184>
- *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.* V. 52. P. 1004–1015. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2016RS006221>
- *Crombie D.D.* Periodic fading of VLF signals received over long paths during sunrise and sunset // *Radio Sci.* V. 68 D(1). P. 27–34. 1964.
<https://doi.org/10.6028/JRES.068D.012>
- *Crombie D.D.* Further Observations of Sunrise and Sunset Fading of Very-Low-Frequency Signals // *Radio Sci.* V. 1 (New Series). № 1. P. 47–51. 1966.
<https://doi.org/10.1002/rds19661147>
- *Cummer S.A.* Lightning and Ionospheric Remote Sensing Using VLF/ELF Radio Atmospherics // Department of Electrical Engineering, Stanford University, Source DAI-B 58/09, p. 5001, 137 pages, 1997.
- *Desanka Š., Nina A., Vladimir S.* Numerical Simulations Of The Effect Of Localised Ionospheric Perturbations On Subionospheric VLF Propagation // *Publ. Astron. Obs. Belgrade.* № 89. P. 391–395. 2010.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1405.3783>
- *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.* V. 59. № 5. P. 587–592. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016793219050049>
- *Han F., Cummer S.A.* Midlatitude nighttime D region ionosphere variability on hourly to monthly time scales // *J. Geophys. Res.* V. 115. A09323. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015437>
- *Huang F.T., Mayr H.G., Reber C.A., Russell J.M., Mlynczak M., Mengel J.G.* Stratospheric and mesospheric temperature variations for the quasi-biennial and semianual (QBO and SAO) oscillations based on measurements from SABER (TIMED) and MLS (UARS) // *Ann. Geophys.* V. 24. P. 2131–2149. 2006.
<https://doi.org/10.5194/angeo-24-2131-2006>
- *Lynn K.J.W.* VLF Waveguide Propagation: The Basics, Ionospheric Systems Research // AIP Conference Proceedings. V. 1286. Issue 1. P. 3–41. 2010.
<https://doi.org/10.1063/1.3512893>
- *Maurya Ajeet K., Singh R., Kumar S. et al.* Waves-like signatures in the D-region ionosphere generated by solar flares // URSI GASS, 2014.
<https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929796>
- *Meara L.A.* VLF modal interference effects observed on transequatorial paths // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics.* V. 35. P. 305–315. 1973.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(73\)90096-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90096-2)
- *Mitra A.P.* Ionospheric effects of solar flares // D. Reidel, Norwell, MA. Springer. 1974.
<https://doi.org/10.1007/978-94-010-2231-6>
- *Ryakhovskii I.A., Gavrilov B.G., Poklad Y.V. et al.* The state and dynamics of the ionosphere from synchronous records of ULF/VLF and HF/VHF radio signals at geophysical observatory “Mikhnevo” // *Izv. Phys. Solid Earth.* V. 57. P. 718–730. 2021.
<https://doi.org/10.1134/S1069351321050177>
- *Samanes J.E., Raulin J.-P., Macotela E.L. et al.* Estimating the VLF modal interference distance using the South America VLF Network (SAVNET) // *Radio Sci.* V. 50. P. 122–129. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014RS005582>
- *Samanes J., Jean-Pierre R., Cao J., Magalhães A.* Night-time lower ionosphere height estimation from the VLF modal interference distance // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* V. 167. P. 39–47. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.009>
- *Šulić D.M., Srećković, V.A., Mihajlov A.A.* A study of VLF signals variations associated with the changes of ionization level in the D-region in consequence of solar conditions // *Advances in Space Research.* V. 57(4). P. 1029–1043. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.025>
- *Takahashi H., Clemesha B.R., Batista P.P.* Predominant semi-annual oscillation of the upper mesospheric airglow intensities and temperatures in the equatorial region // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. P. 407–414. 1995.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)E0006-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)E0006-9)
- *Wait J.R., Spies K.P.* Characteristics of the Earth–Ionosphere Waveguide for VLF Radio Waves // *Natl. Bur. Std. Note.* № 300. 1964.
- *Walker D.* Phase steps and amplitude fading of VLF signals at dawn and dusk // *Radio Science.* V. 69D. № 11. P. 1435–1443. 1965.
<https://doi.org/10.6028/jres.069d.155>