

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

© 2022 Ю. Л. Чупринская, В. Н. Фролов

Воронежский институт высоких технологий (Воронеж, Россия)

*Статья посвящена описанию особенностей распространения декаметровых волн в ионосфере. Даны описание модельных профилей. Проведен анализ характеристик различных слоев. Приведены траекторные разновидности радиоволн в ионосфере: скачковая, рикошетирующая, скользящая. Показана возможность помимо применения математических моделей, глобальных моделей.*

*Ключевые слова:* ионосфера, модельный профиль, декаметровый диапазон, радиоволна.

Основные характеристики распространения декаметровых волн (ДКВ) в ионосфере: отражение, рефракция, слияние, рассеяние и замирание данных радиоволн в ионосфере [1, 2]

Волны могут отражаться для достаточно широкого интервала частот:  $f = 3\text{--}30$  МГц. Рис. 1 демонстрирует влияние разных слоев, при этом длина одного скачка может превышать 2500 км.

Электромагнитные волны, совершая скачки, осуществляют распространение на далекие расстояния за счет очень большого волновода. Он образуется Землей и ионосферой. Внутри него, большей частью днем, наблюдаются поглощающие эффекты [1, 2]. Заштрихованная зона относится к высотам 70–130 км ионосферы.

Можно столкнуться с замиранием при распространении электромагнитных волн декаметрового диапазона. При этом в точку приема приходит ряд волн, идущих по разнообразным путям. Для того чтобы фаза волны в спектре ДКВ поменялась на 180 градусов, изменение длины пути не превосходит длины волны [5, 6].

Характеристики ионосферы довольно сложным образом зависят от значений высот. Как выяснили исследователи характеристики высотных профилей сосредоточения электронов, ионов и температуры, значительно изменяются как с течением суток, так

и с долготой и широтой, находятся в зависимости от сезона. Оказывают свое влияние также и геомагнитная и солнечная активность.

Не всегда можно в произвольных случаях применять обычные математические функции для оценок электронной концентрации в зависимости от высоты. Однако, математические модели ионосферы могут эффективным образом использоваться тогда, когда требуется теоретическое рассмотрение, оценка по лучевым [7, 8], фазовым и групповым путям.

Аналитические выражения в ионосфере по высотным зависимостям электронной концентрации вполне могут быть использованы.

Особенности модельных профилей, относящихся к электронным концентрациям по разным аппроксимациям, иллюстрирует рисунок 2.

Линейный слой.

В довольно небольших промежутках высот, за исключением высоты максимума электронной сосредоточенности, вид электронной концентрации возможно аппроксимировать на базе линейной функции (рис. 2, а):

$$N - N_0 = a \cdot (h - h_0), \quad (1)$$

где  $a$  – градиент, описывающий электронную концентрацию;  $N_0$  – концентрация электронов, характеризующая опорную высоту  $h_0$  [9, 10].

Параболический слой.

Такой вид аппроксимация зачастую применяется с целью отображения высотного профиля электронной концентрации, ко-

Чупринская Юлия Леонидовна – Воронежский институт высоких технологий, студент, [ccchuprinsk40981@mail.ru](mailto:ccchuprinsk40981@mail.ru).

Фролов Вадим Николаевич – Воронежский институт высоких технологий, профессор, [fffrolov5004@yandex.ru](mailto:fffrolov5004@yandex.ru).

торый лежит ниже, чем максимум слоя F<sub>2</sub> в ионосфере (рис. 2, б).

Вид параболического распределения такой:

$$N = N_m \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h_m - h}{y_m} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где N<sub>m</sub> – значение максимальной концентрации электронов слоя F<sub>2</sub>, относящейся к высоте h<sub>m</sub>; y<sub>m</sub> – является полутолщиной слоя F<sub>2</sub>.

#### Косинусный слой.

Параболический слой характерен тем, что есть разрыв градиента по электронной концентрации по верхней и нижней границам слоев.

Формула для косинусного слоя такая

$$N = \frac{1}{2} \cdot N_m \cdot \left( 1 + \cos \left( \pi \cdot \frac{h - h_m}{y_m} \right) \right), \quad (3)$$

где h<sub>m</sub>, y<sub>m</sub> – значение высоты максимума и полутолщине слоя.

#### Экспонентный слой.

Применение аппроксимации для электронной концепции высотного профиля с поддержкой экспоненциальной связи рассматривают с целью отображения верхней доли F – сфере, находящееся больше высоты максимума электронной концентрации, а кроме того, с целью отображения нижней доли области E (рис. 2, г).

Когда надо описать верхнюю часть F области:

$$N = N_m \cdot e^{-(h-h_m)/2H} \quad (4)$$

где N<sub>m</sub> – является максимальной электронной концентрацией слоя E, относящейся к высоте h<sub>m</sub>.

#### Квазипараболический слой.

Такой вид слоя используется, если принимать во внимание кривизну Земли. Для параболического слоя труднее проводить операции интегрирования.

Но присутствие малого изменения профиля параболического слоя можно учесть. Тогда интегрирование проводится более легким образом. Квазипараболический слой обладает типом:

$$N = N_m \cdot \left[ 1 - \left( \frac{h_m - h}{y_m} \cdot \left( \frac{h_0 + R_E}{h + R_E} \right)^2 \right) \right], \quad (5)$$

где R<sub>E</sub> – радиус Земли; h<sub>0</sub> – высота слоя.

Помимо математических моделей, с целью осуществления анализа распространения радиоволн применяются также глобальные модели [11, 12].

Они связаны с массовыми полуэмпирическими моделями ионосферы, так как они применяются как эмпирические сведения, так и аналитические зависимости. На их основе есть возможности определения высотных профилей характеристик ионосферы и параметры ионосферных слоев для каждой точки Земли.

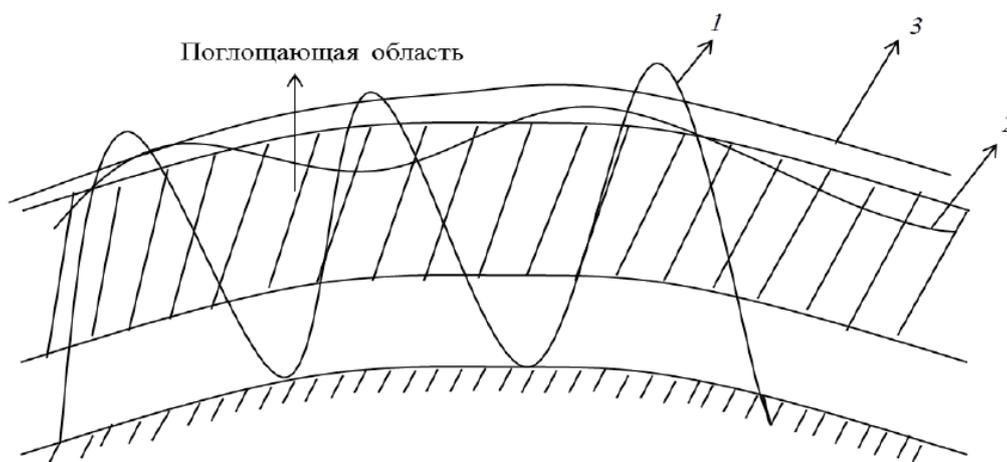


Рисунок 1. Траекторные разновидности радиоволн в ионосфере:  
1 – скачковая, 2 – рикошетирующая, 3 – скользящая

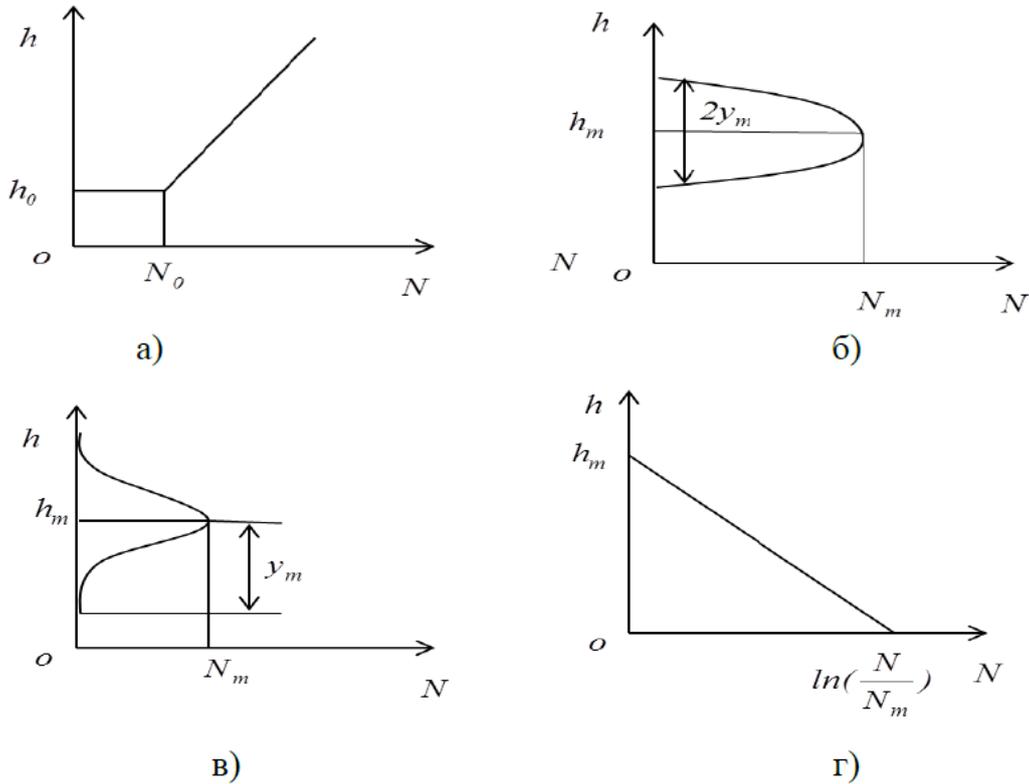


Рисунок 2. Описание модельных профилей электронной концентрации: а – линейного, б – параболического; в – косинусного; г – экспоненциального

Выводы. Приведены основные аналитические соотношения, которые применяются в ходе распространения дециметровых волн. Результаты работы могут быть полезны при разработке современных систем связи.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Львович И. Я. Построение алгоритма оценки средних характеристик рассеяния полых структур / И. Я. Львович, Я. Е. Львович, А. П. Преображенский // Телекоммуникации. – 2014. – № 6. – С. 2-5.

2. Преображенский А. П. О применении расчетно-экспериментального подхода при исследовании распространения волн wi-fi внутри помещения / А. П. Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2014. – № 12. – С. 71-72.

3. Преображенский А. П. Импедансные граничные условия в задаче рассеяния электромагнитных волн на полости с радиопоглощающими покрытиями / А. П. Преображенский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11. – № 2-3. – С. 61-63.

4. Lvovich I. Ya. Modeling of information processing in the internet of things at agricul-

tural enterprises / I. Ya. Lvovich, Ya. E. Lvovich, A. P. Preobrazhenskiy, Yu. P. Preobrazhenskiy, O. N. Choporov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2019. – С. 32029.

5. Преображенский Ю. П. Проблемы компьютерного моделирования физических процессов / Ю. П. Преображенский // Современные инновации в науке и технике. сборник научных трудов 9-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2019. – С. 276-279.

6. Преображенский Ю. П. Возможности построения компьютерных моделей физических процессов / Ю. П. Преображенский // Современные инновации в науке и технике. сборник научных трудов 9-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2019. – С. 279-282.

7. Львович Я. Е. Об особенностях моделирования беспроводных сенсорных сетей / Я. Е. Львович, П. В. Карлин, Ю. П. Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2021. – № 4 (39). – С. 20-23.

8. Lvovich I. Ya. Analysis of integral characteristics in the iot system // I. Ya. Lvovich, Ya. E. Lvovich, A. P. Preobrazhenskiy, Yu. P. Preobrazhenskiy, O. N. Choporov IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – 2020. – С. 12020.

9. Lvovich I. Modeling the processes of predicting the characteristics of faults in information systems / I. Lvovich, Ya. Lvovich, A. Preobrazhenskiy, Yu. Preobrazhenskiy, O. Choporov // CEUR Workshop Proceedings. Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems" (ITIDMS-II-2021). Aachen, Germany. – 2021. – С. 7-16.

10. Lvovich I. Managing developing internet of things systems based on classification and predictive models and algorithms / I. Lvovich, Ya. Lvovich, A. Preobrazhenskiy, Yu. Preobrazhenskiy, O. Choporov // International Seminar on Electron Devices Design and Production, SED 2021 – Proceedings. – 2021. – С. 9444493.

11. Машков В. Г. Предварительная оценка вероятности принятия правильного решения в автоматизированных системах управления / В. Г. Машков, В. А. Малышев, Ю. В. Никитенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9. – № 3 (34). – С. 12-13.

12. Борзова А. С. Особенности построения системы принятия решений при многовариантной оптимизации структуры цифрового управления логистическим процессом в организационной системе на основе имитационного моделирования / А. С. Борзова, В. В. Муха // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9. – № 3 (34). – С. 15-16.

## ANALYSIS OF MOTION MODELS IN ELECTRONIC-MECHANICAL SYSTEMS

© 2022 Yu. L. Chuprinskaya, V. N. Frolov

*Voronezh Institute of High Technologies (Voronezh, Russia)*

*The paper is devoted to the description of the features of the propagation of decameter waves in the ionosphere. The description of model profiles is given. The analysis of the characteristics of different layers was carried out. Trajectory varieties of radio waves in the ionosphere are given: jump, ricochet, gliding. The possibility is shown in addition to the use of mathematical models, global models.*

*Keywords: system, electronics, mechanics, modeling.*