

Особенности распространения УКВ-СВЧ радиоволн в неоднородной тропосфере с N-профилем в виде двух прилегающих волноводных структур

О. В. Смирнова¹, В. А. Светличный²

¹АО «ЦНИИ «Циклон»

² Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота

«Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова»

E-mail oksanasmirnova@yandex.ru

Аннотация. Проанализированы закономерности формирования и распространения УКВ-СВЧ радиоволн в неоднородной тропосфере над морем с N-профилем в виде двух прилегающих волноводных структур. Моделирование характеристик распространения радиоволн проводилось на основе метода нормальных волн.

Ключевые слова: распространение радиоволн; тропосферный волновод; метод нормальных волн

I. ВВЕДЕНИЕ

Трилинейная модель вертикального профиля индекса преломления тропосферы $N(z)$ схематично описывает как приподнятые, так и приводные тропосферные волноводы (исключая волновод испарения). Данная модель тропосферы позволяет описать также и другие виды слоистых профилей $N(z)$ в виде двух прилегающих волноводных структур. Наиболее часто подобные радиометеорологические условия встречаются в полярных регионах. Так, при использовании данных информационной метеорологической системы ZyGrib [6], был получен вертикальный профиль индекса преломления (рис. 1) для Антарктиды, в котором четко выделяется две области высот: приводный волновод в интервале $0 < z < 592$ м и слой $592 < z < 1181$ м с $N'(z) > 0$, выше которого градиент индекса преломления $N'(z) = -31$ N-ед./км был несколько ниже стандартного. Другим примером является Баренцево море, климатические условия которого определяются соседством с теплым Норвежским морем и холодными районами Арктического бассейна. Через Баренцево море проходят траектории подавляющего числа теплых североатлантических циклонов, идущих на восток и северо-восток в глубину арктической области. Часто этот перенос теплых воздушных масс прерывается мощным вторжением гребней полярного антициклона, сопровождающимся проникновением холодных арктических масс далеко на юг. При определенных условиях возможны ситуации, когда в области, прилегающей к морской поверхности, температура и влажность воздуха понижаются с ростом высоты, а выше находится холодный воздух, температура которого уменьшается с высотой, в результате чего вертикальный профиль индекса преломления приобретает вид, аналогичный показанному на рис. 1.

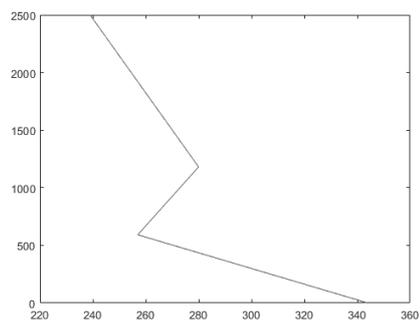


Рис. 1. N-профиль в виде двух прилегающих волноводных структур

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЛЯ ПРОФИЛЯ В ВИДЕ ДВУХ ПРИЛЕГАЮЩИХ ПОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР

В рамках трилинейной модели существование двух подобных волноводных структур с непрерывным профилем $N(z)$ обусловлено слабыми отражениями радиоволн от границ слоев, где производная $N(z)$ терпит разрыв. Спектр нормальных волн весьма чувствителен к наличию даже слабых отклонений M-профиля от стандартного $M(z) = N_0 + z/a_g$. Для примера на рис. 2 приведен график спектра для следующих параметров: $N(0) = 315$, $N(100) = 316$, $N(150) = 314$ N-ед., длина волны 30 см, поляризация поля — вертикальная, параметры морской среды $\varepsilon = 80$, $\sigma = 3$ См/м. Спектр содержит, наряду с вертикальной ветвью, две горизонтальные ветви. Это влияет на характеристики распространения радиоволн: наличие в спектре двух наименее затухающих нормальных волн с близкими мнимыми частями постоянных распространения изменяет интерференционную структуру поля. Отметим также плавный переход от нижней горизонтальной ветви спектра к вертикальной, что наблюдается и при расчетах с использованием модели $N(z)$ в виде «ступеньки» при очень малых отличиях тропосферы от однородной.

Еще более четко наличие двух горизонтальных ветвей спектра для данного вида N-профиля и значений длины радиоволны 0.03, 0.05, 0.1, 0.2 и 0.3 м демонстрируют рис. 3. Параметры тропосферы: $N(0) = 340$, $N(50) = 328$, $N(150) = 340$, выше индекс преломления убывает со скоростью 39 N-ед./км; $\varepsilon = 80$,

$\sigma = 3$ См/м, поляризация поля – вертикальная. Все четыре спектра, рассматриваемые справа налево, в начальной части имеют две горизонтальные ветви, которые затем постепенно сливаются в единую горизонтальную ветвь. Значения приведенного индекса преломления в опорных точках равны $M(0) = 340$, $M(50) = 336$, $M(150) = 364$ N-ед., то есть радиометеорологические условия соответствуют наличию приводного волновода, над которым расположен слой тропосферы, M -градиент которого (28 N-ед./км) соответствует условиям пониженной рефракции, то есть больше, чем в вышележащей тропосфере (11.8 N-ед./км).

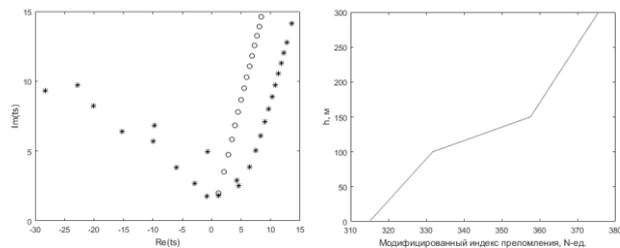


Рис. 2. Пример спектра нормальных волн со сложной структурой горизонтальной части (слева) для M -профиля, близкого к стандартному (справа). Кружочками показаны точки спектра для однородной тропосферы

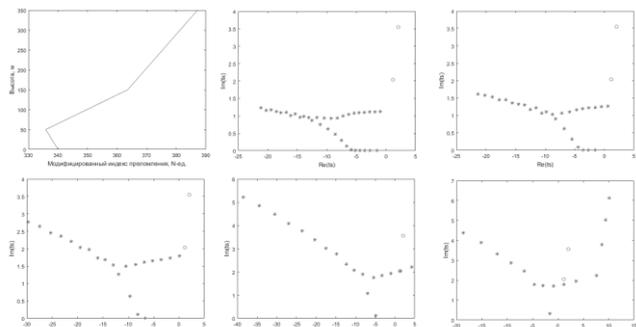


Рис. 3. M -профиль и спектры нормальных волн для значений длины радиоволны для 3, 5, 10, 20 и 30 см. Кружочками показаны точки спектра для однородной тропосферы

Проанализируем характеристики распространения радиоволн в таких радиометеорологических условиях. На рис. 4 приведены примеры высотных разрезов функции ослабления поля для длины радиоволны 0.03 м и высоты расположения источника 10 м для нескольких значений дальности, а на рис. 5 представлены рассчитанные дистанционные зависимости функции ослабления поля для той же длины радиоволны и разных значений высот источника и точки наблюдения. Вертикальные разрезы демонстрируют захват поля в приводный волновод. Уровень поля выше волноводной области немонотонно изменяется в зависимости от высоты и, в целом, намного ниже, чем в волноводе, причем с ростом высоты после достижения минимума имеет место рост уровня поля из-за дифракционного просачивания энергии сверху, из освещенной области.

Дистанционные зависимости функции ослабления на разных высотах расположения точки наблюдения позволяют более детально проследить за изменениями характеристик распространения радиоволн как в области волновода, так и в вышележащем неоднородном слое тропосферы, в том числе и при изменении высоты расположения источника (рис. 5). Видно, что поле на

больших загоризонтных расстояниях формируется двумя – тремя наименее затухающими нормальными волнами, причем при расположении источника в приводном волноводе на высоте 10 м уровень поля в нем остается высоким на всех загоризонтных дальностях. Здесь следует учесть наличие в спектре не менее пяти слабо затухающих нормальных волн. При этом в вышележащем неоднородном слое тропосферы уровень поля ниже, но также в среднем остается постоянным. Это может объясняться как структурой поля слабозатухающих нормальных волн, так и некоторой подпиткой поля в неоднородном слое из-за дифракционного просачивания его из волновода.

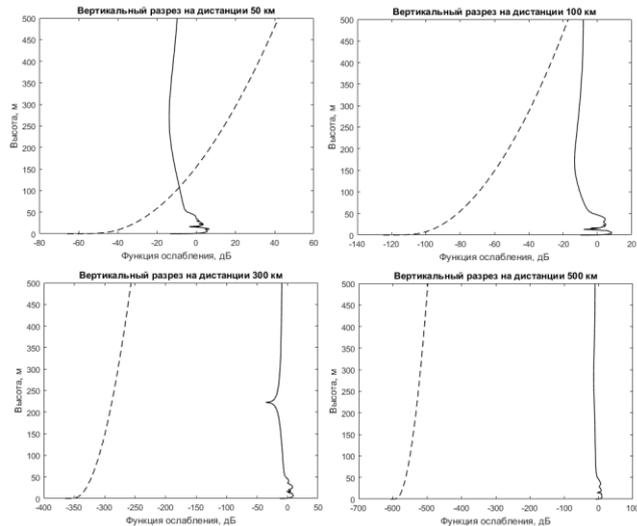


Рис. 4. Вертикальные разрезы функции ослабления поля для высоты расположения источника 10 м на дальностях 50, 100, 300 и 500 км. Пунктиром показаны вертикальные разрезы функции ослабления для однородной тропосферы

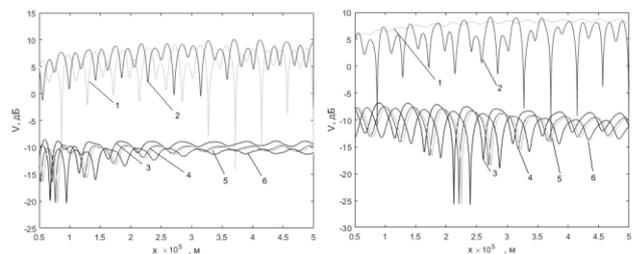


Рис. 5. Дистанционные зависимости функции ослабления для высоты расположения источника 10 м, 25 м и высот точки наблюдения $z = 10$ м (кривая 1), 25 м (кривая 2), 100 м (кривая 3), 175 м (кривая 4), 220 м (кривая 5), 400 м (кривая 6)

При расположении источника в неоднородном слое выше волновода, он по-прежнему «запитывается», хотя и несколько хуже, тогда как уровень поля в верхнем неоднородном слое $50 < z < 150$ м и выше него заметно снижается с ростом расстояния, и тем быстрее, чем выше расположен источник.

Эти закономерности, в целом, остаются в силе и для радиоволн с длиной 0.05 и 0.1 м (рис. 6–7), но при этом количество слабо затухающих нормальных волн в спектре уменьшается, уровень поля в волноводе снижается, и оно приобретает одно-двухмодовый характер на больших дальностях. Характерно, что при увеличении высоты расположения источника уровни поля в волноводе $0 < z < 50$ м и выше него сближаются, по крайней мере, на начальном участке загоризонтных дальностей. В области $z > 50$ м поле сохраняет

двухмодовый характер на всех дальностях, и уровень его снижается по мере роста дальности.

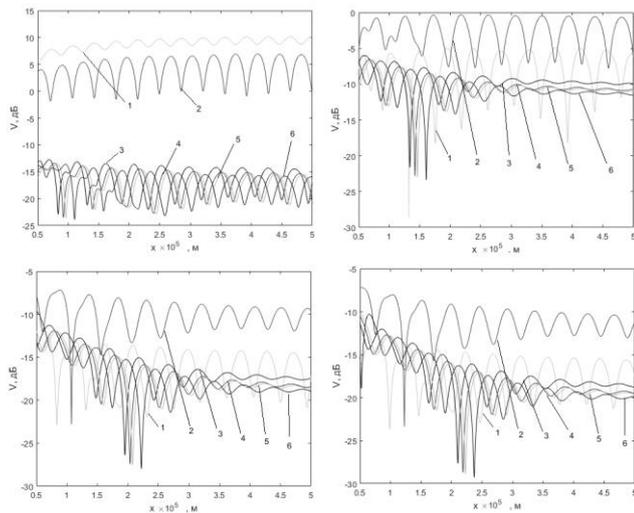


Рис. 6. Дистанционные зависимости функции ослабления на длине волны 0,05 м для высот расположения источника 10, 45, 100 и 250 м и высот точки наблюдения $z=10$ м (кривая 1), 25 м (кривая 2), 100 м (кривая 3), 175 м (кривая 4), 220 м (кривая 5), 400 м (кривая 6)

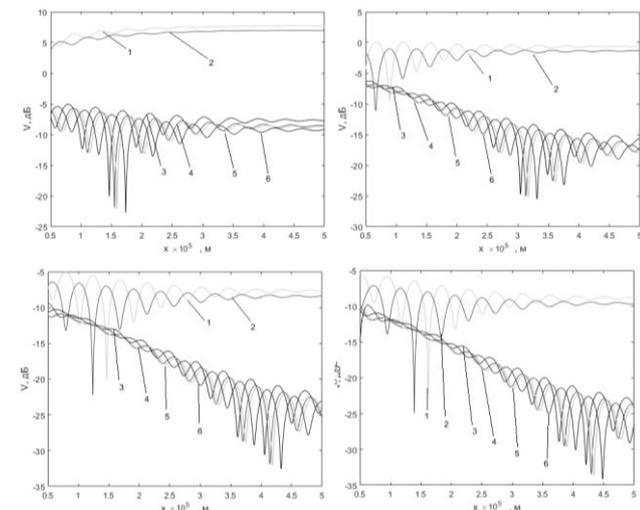


Рис. 7. Дистанционные зависимости функции ослабления на длине волны 0,1 м для высот расположения источника 10, 45, 100 и 250 м и высот точки наблюдения $z=10$ м (кривая 1), 25 м (кривая 2), 100 м (кривая 3), 175 м (кривая 4), 220 м (кривая 5), 400 м (кривая 6)

В отличие от этого, поле радиоволн с длиной 0.2 и 0.3 м имеет одномодовый характер и монотонно убывает во всей загоризонтной области (рис. 8). Уровень поля монотонно снижается с ростом высоты точки наблюдения, то есть М-дефицит приводного волновода, равный 4 М-ед, уже недостаточен для захвата поля, и все аномальные эффекты, связанные с различными видами дистанционных зависимостей функции ослабления в интервалах высот $0 < z < 50$ м и $z > 50$ м, исчезают.

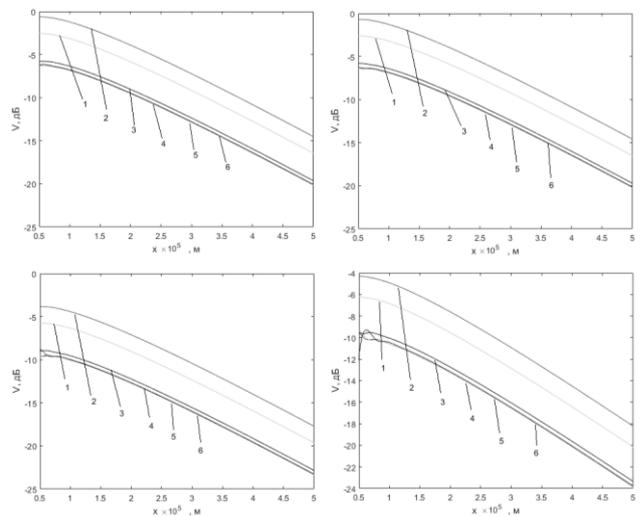


Рис. 8. Дистанционные зависимости функции ослабления на длине волны 0.2 м для высот расположения источника 10, 100 и 250 м и высот точки наблюдения $z=10$ м (кривая 1), 25 м (кривая 2), 100 м (кривая 3), 175 м (кривая 4), 220 м (кривая 5), 400 м (кривая 6)

Характер дистанционных зависимостей функции ослабления поля на разных высотах довольно необычный, отличающийся от того, который получается для обычных приподнятых волноводов. Для объяснения этих отличий можно было бы предположить, что верхнему слою (50–150 м) соответствует верхняя же горизонтальная ветвь корней (с большими мнимыми частями), из-за чего поле в нем убывает по мере роста дальности. Аналогично, нижнему волноводу (0–50 м) соответствует нижняя горизонтальная ветвь, первые корни которой имеют очень малые мнимые части. Поэтому средний уровень функции ослабления здесь остается практически постоянным на всей дистанции. Однако мнимые части корней верхней ветви слишком велики, что не соответствует уменьшению среднего уровня функции ослабления в верхнем слое на интервале дальностей 500 км всего на 10 дБ. Более того, при вычислении функции ослабления поля

$$V(x; y, y_0) = 2\sqrt{i\pi x} \sum_{s=1}^{\infty} \Lambda_s \exp(it_s x) f_s(y) f_s(y_0) \quad (1)$$

используется весь спектр нормальных волн, начиная с наименее затухающих волн нижней ветви (y первых четырех корней t_s мнимые части имеют величину 0.00655 – 0.00656), поэтому даже такое уменьшение уровня трудно объяснить.

Не проясняют особенности формирования поля и графики модулей высотных множителей нормальных волн (рис. 9), которые существенно отличаются от высотных множителей для приподнятого или приводного волновода и имеют огромный динамический диапазон изменения (до 600 дБ!), тогда как приведенные в [4] – не более 35 дБ в соответствующих интервалах высоты.

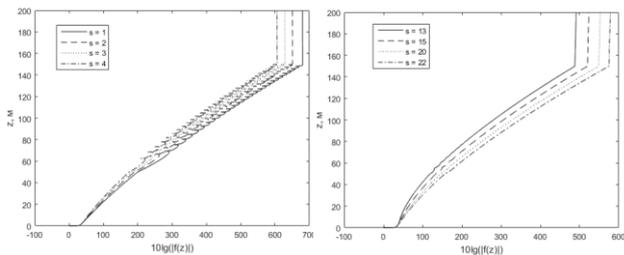


Рис. 9. Графики модулей высотных множителей $f_s(z)$ нормальных волн для радиоволн с длиной 0.03 м: слева – для модов нижней горизонтальной ветви с малым затуханием, справа для модов верхней горизонтальной ветви

Объяснение особенностей формирования поля источника для данной модели М-профиля было получено только после анализа величин всех сомножителей и их произведений для каждой нормальной волны в формуле (1) для функции ослабления поля. Заметим, что множители Λ_s не зависят от высот расположения источника и точки наблюдения. Оказалось, что в формировании дистанционных и высотных зависимостей функции ослабления поля есть своеобразная «внутренняя логика», отраженная в значениях массивов комплексных постоянных распространения t_s , параметров Λ_s и вида высотных множителей для данного М-профиля и длины радиоволны, в результате чего основной вклад в функцию ослабления при разных значениях высот источника, точки наблюдения и дальностей от источника вносят различные группы нормальных волн. При этом для источника и точки наблюдения, находящихся в пределах интервала высот 0 ... 220 м основной вклад дают нормальные волны с небольшими номерами. На рис. 10–11 приведены диаграммы модулей произведений сомножителей $\Lambda_s \exp(it_s x) f_s(y) f_s(y_0)$ под знаком суммы в (1) для нормальных волн, вносящих основной вклад в функцию ослабления в этой области значений x , z_0 и z . По оси абсцисс отложены номера модов. При этом корни t_5 , t_6 имеют уже несколько большие мнимые части, вследствие чего уровень функции ослабления для $z = 100$, 200 м заметно убывает с ростом дальности. Видно, что весь указанный интервал высот «обслуживают» моды нижней горизонтальной ветви. Верхняя горизонтальная ветвь «вступает в действие» лишь при достаточно больших значениях высот z_0 и z , что иллюстрирует рис. 11.

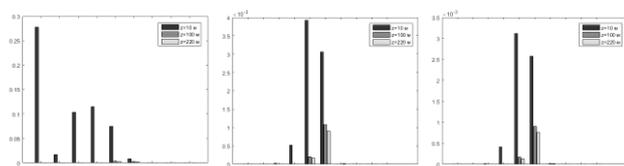


Рис. 10. Относительные вклады нормальных волн при небольших $z_0 = 10, 100$ и 220 м и z для дальности 400 км

Таким образом, в формировании пространственной структуры поля согласованным образом участвуют все массивы значений параметров t_s , Λ_s и функций $f_s(y)$, $f_s(y_0)$, и при ее анализе недостаточно знать только значения точек спектра и вид высотных множителей.

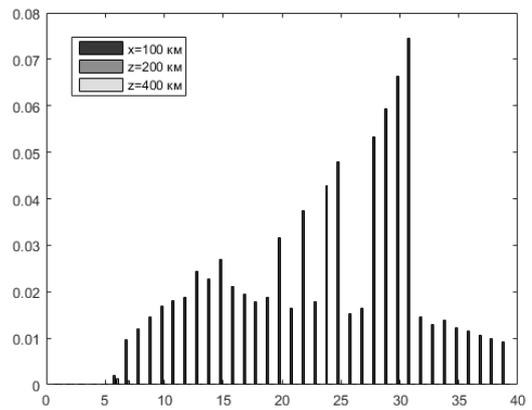


Рис. 11. Относительные вклады различных модов при $z_0 = z = 1$ км на дальностях 100, 200 и 400 км

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кусочно-линейная аппроксимация М-профиля, использованная в данной работе, обладает тем недостатком, что при этом в профиле возникают точки разрыва производной $M'(z)$ в местах стыковки различных участков, приводящие к ложным слабым отражениям волн на этих высотах. Достоинством ее в рамках метода нормальных волн является возможность аналитического решения граничной задачи с последующим получением расчетных формул для функции ослабления, характеристического уравнения для постоянных распространения и спектра нормальных волн. Метод нормальных волн, несмотря на присущие ему ограничения, позволяет выполнять анализ закономерностей формирования поля, которые было бы трудно понять при численном пошаговом решении волнового параболического уравнения. Однако последний позволяет до некоторой степени прояснить вопрос об устойчивости полученных дистанционных зависимостей функции ослабления поля к изменениям профиля, приводящим к устранению разрывов производной функции $N(z)$. Скругление углов для трилинейной модели М-профиля

$$M(z) = N(z) + \frac{z}{a} = \begin{cases} N(0) + g_0 z, & 0 \leq z \leq h_1; \\ N(h_1) + g_1(z - h_1), & h_1 \leq z \leq h_2; \\ N(h_2) + g_2(z - h_2), & z > h_2; \end{cases} \quad (2)$$

можно обеспечить введением переходных слоев в окрестности точек $z = h_{1,2}$

$$M_i(z) = N(h_i) + \left[g_{i-1} + \frac{g_i - g_{i-1}}{2} \left(1 + th \frac{z - h_i}{\Delta z_i} \right) \right] (z - h_i), \quad (3)$$

$$h_i - \Delta h_i < z < h_i + \Delta h_i$$

со специально подобранными параметрами. При этом значения индекса преломления в точках $z = h_{1,2}$ остаются прежними. В ходе исследования сначала было выполнено сравнение расчетных дистанционных зависимостей для исходного трилинейного М-профиля, полученных как методом нормальных волн, так и численным пошаговым методом решения волнового параболического уравнения, показавшее хорошее их соответствие. Затем расчеты выполнялись пошаговым численным методом для сглаженного профиля с

различными значениями параметров Δh_i . Величина Δz_i выбиралась из условия $|\Delta M| < 0.02$ М-ед. в точках стыковки. Анализ результатов показал, что скругление углов в М-профиле начинает сказываться на дистанционных зависимостях только при достаточно больших значениях $\Delta h_i \geq 5$ м. При этом общий характер кривых, их взаимное расположение и дистанционные зависимости остаются прежними и при заметно больших значениях полутолщины переходных слоев. В заключении следует отметить, что трилинейная модель вертикального профиля индекса преломления пригодна для исследования закономерностей распространения СВЧ радиоволн в слоисто-неоднородной тропосфере, несмотря на присущие ей особенности, не обеспечивающие достаточную гладкость М-профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Marcus S. W. A model to calculate em fields in tropospheric duct environments at frequencies through SYF // Radio Science / 1982. V. 17. № 5. P. 895.
- [2] Baumgartner G.B. XWVG: A waveguide program for trilinear tropospheric ducts. San Diego, CA: NCCOSC RDT&E Div. tech. doc. #610, 1982.
- [3] Светличный В.А., Смирнова О.В. Исследование характеристик распространения ультракоротких радиоволн в неоднородной тропосфере для трилинейной модели индекса преломления. Теоретическая часть // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 3. С. 225–233.
- [4] Светличный В.А., Смирнова О.В. Исследование характеристик распространения ультракоротких радиоволн в неоднородной тропосфере для трилинейной модели индекса преломления. Результаты моделирования // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 3. С. 234–243.
- [5] Светличный В.А., Смирнова О.В. Некоторые виды спектров нормальных волн в слоисто-неоднородной тропосфере в рамках трилинейной модели профиля индекса преломления // Труды XXVII Всероссийской открытой конференции РРВ-21. Калининград, 2021 г., ч. 3, с. 346–351.
- [6] zyGrib: grib file, weather data, visualization [Электронный ресурс], URL: <https://www.zygrib.org/>