

УДК: 621 396 96: 551.5

DOI: 10.26907/rwp29.2025.488-491

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ УКВ РАДИОВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

В. А. Светличный¹, О. В. Смирнова²

¹ Военный учебно-научный центр Военно-Морского Флота «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», 197045, г. Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, д. 17/1

E-mail: vunc-vmf@mil.ru

² Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», 107207, г. Москва, ш. Щелковское, д. 77

E-mail: o.smirnova@cyclone-nw.ru

Аннотация. В докладе приведены результаты исследования влияния радиометеорологических условий на характеристики распространения радиоволн в арктическом регионе. Для моделирования характеристик распространения радиоволн применялся метод нормальных волн. Показаны особенности и причины формирования тропосферных волноводов в арктическом регионе, а также их характеристики в зависимости от суточного и сезонного цикла.

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

THE MODELLING AND ANALYSING OF RADIO WAVE PROPAGATION CHARACTERISTICS IN INHOMOGENEOUS MEDIUM ABOVE SEA SURFACE FOR THE ARCTIC REGION

V. A. Svetlichniy, O. V. Smirnova

Abstract. This paper presents the results of study on the influence of radio-meteorological conditions on the characteristics of the radio wave propagation over the sea surface in the Arctic region. Mode theory is used for to model the radio wave propagation characteristics. The features and causes of tropospheric ducts in the Arctic region formation are shown as well as their characteristics depending on the daily and seasonal cycles.

Keywords: radio wave propagation, tropospheric duct, mode theory

Введение

Распространение УКВ радиоволн над морской поверхностью от излучателя до приемной антенны зависит от радиометеорологических характеристик среды, через которую проходит радиосигнал. Так, на распространение радиоволн влияют изменения температуры воздуха, относительной влажности воздуха, атмосферного давления, колебания суточных и сезонных циклов. Взаимосвязь данных параметров можно описать сводным показателем – модифицированным индексом преломления среды. Вид модифицированного индекса преломления среды позволяет оценить условия и особенности распространения радиоволн над морем в неоднородной тропосфере.

На сегодняшний день проведено множество исследований, посвященных моделированию характеристик тропосферных волноводов. В [1] используется региональная система оперативного прогнозирования атмосферы (NORAPS) для моделирования погодных условий в прибрежных районах залива у Южной Калифорнии. Авторы обнаружили, что циркуляция ветра с моря на сушу изменяет структуру атмосферного пограничного слоя, что приводит к образованию слоисто-кучевых облаков в его верхней части. Эти изменения также приводят к значительным суточным колебаниям радиометеорологических параметров.

Хаак и Берк [2] использовали мезомасштабную систему прогнозирования океан-атмосфера (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System – COAMPS) для прогноза динамики радиометеорологических параметров у побережья Калифорнии. Они обнаружили, что по мере уменьшения высоты атмосферного пограничного слоя, приповерхностные волноводы становятся мощнее, при этом приподнятые волноводы, наоборот, становятся более слабыми.

Большинство работ сосредоточено на исследовании особенностей формирования тропосферных волноводов для высоких широт. Известно, что радиометеорологические условия в полярных регионах значительно отличаются от других регионов. Арктический регион, в основном, круглый год покрыт льдом, который препятствует теплообмену между океаном и атмосферой, характеризуется холодным климатом, сильными штормами в холодное время года и морскими бризами в теплое время года. Температура воздуха в Арктике растет в два раза быстрее среднего мирового значения [3], а морской лед тает ускоренными темпами, при этом многолетний ледяной покров сократился практически на треть [4]. В будущем эти изменения, несомненно, скажутся и на условиях формирования тропосферных волноводов.

Целью работы является исследование причин формирования тропосферных волноводов в арктическом регионе, их характеристик, а также оценка влияния радиометеорологических условий на характеристики распространения радиоволн УКВ диапазона на протяженных загоризонтных трассах.

Тропосферные волноводы в арктическом регионе

Распространение радиоволн над морской поверхностью, как известно, зависит от пространственного изменения индекса преломления среды. Эмпирическое выражение, описывающее зависимость показателя преломления от радиометеорологических параметров [5]:

$$N(z) = (n - 1) \cdot 10^6 = \frac{77.6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right), \quad (1)$$

где T – температура воздуха, в Кельвинах; P – атмосферное давление, в кПа; e – давление водяного пара, в кПа. Для учета кривизны Земли в параболическом приближении используется модифицированный индекс преломления $M(z) = N(z) + z/a$, где a – радиус Земли.

Формированию тропосферных волноводов над морем в арктическом регионе способствуют следующие условия [6-7]:

- 1) сильные температурные инверсии вследствие ночного радиационного выхолаживания внутри приземного слоя тропосферы над сушей;
- 2) резкое изменение влажности воздуха с высотой, а также наличие открытых участков воды на фоне ледового покрытия (полюньи, трещины во льду);
- 3) сильные колебания атмосферного давления, связанные с циклонической активностью и взаимодействием холодных арктических масс с теплыми воздушными массами средних широт;
- 4) наличие сильных ветров, которые способствуют перемешиванию слоев воздуха разной температуры;
- 5) наличие ледяного покрова, который отражает солнечное излучение и препятствует испарению;
- 6) экстремальные изменения солнечной радиации, наличие полярного дня и полярной ночи.

Наиболее часто тропосферные волноводы возникают в трех регионах: в регионе, расположенном между северным побережьем Гренландии и севером залива Баффина, вдоль северного побережья России, преимущественно в Баренцевом, Карском, Восточно-Сибирском морях, и в Норвежском море. Формирование волноводов в арктическом регионе наиболее характерно для зимнего периода времени. Аномалии в этот период связаны с влиянием постоянных центров атмосферной активности, атмосферной циркуляцией и сезонными изменениями в мезомасштабных климатических системах в средних и высоких широтах и полярных регионах. Температура воздуха над морем ниже из-за ледового покрытия, которое препятствует обмену теплым воздухом между атмосферой и океаном. С началом теплого сезона постепенно усиливается центр высокого давления над Гренландией, который является основной причиной формирования тропосферных волноводов в данном регионе. Кроме этого, наблюдается блокирование атмосферной активности над азиатским континентом, откуда переносятся большие объемы влаги и тепла в Арктику.

Согласно исследованиям [7], в 60-80% случаев высота волновода в арктическом регионе составляет до 100 м и только в 20-30% случаев захват электромагнитной энергии происходит на высотах 100-200 м. Волноводы высотой более 200 м встречаются только в 5% случаев.

Волноводы в арктическом регионе достаточно слабые. Значения M -дефицита более 10 N -ед. встречается довольно редко и в основном в зимний период. Среднее значение M -дефицита для тропосферных волноводов составляет 3 N -ед. для всех сезонов за исключением зимнего периода. Среднегодовые значения M -дефицита для приподнятых волноводов составляют от 1.7 (± 2.0) N -ед. до 2.5 (± 2.9) N -ед., для приповерхностных волноводов значения колеблются от 2.1 (± 2.3) N -ед. до 4.5 (± 4.5) N -ед. [7].

Моделирование характеристик распространения радиоволн

Исследование характеристик распространения радиоволн в неоднородной среде проводится на основе метода нормальных волн (МНВ). В качестве вертикального профиля индекса преломления среды выбрана трилинейная модель $N(z)$, позволяющая описывать как приповерхностные, так и приподнятые волноводы. Для моделирования используется разработанный авторами программный комплекс, а также метод нахождения постоянных распространения нормальных волн для кусочно-линейных профилей $N(z)$ [8].

В качестве исходных данных для численного моделирования использовались метеорологические данные прогностической системы WRF (Weather Research&Forecasting) [9]. Было проанализировано более 150000 записей за период с 2000 по 2023 год. Профили индекса преломления фиксировались для отсчетов времени: 0:00, 3:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00 и 21:00 для точки в Баренцевом море с координатами 70.224449 с.ш., 32.140589 в.д. На рисунке 1 представлены усредненные сезонные и суточные профили индекса преломления среды.

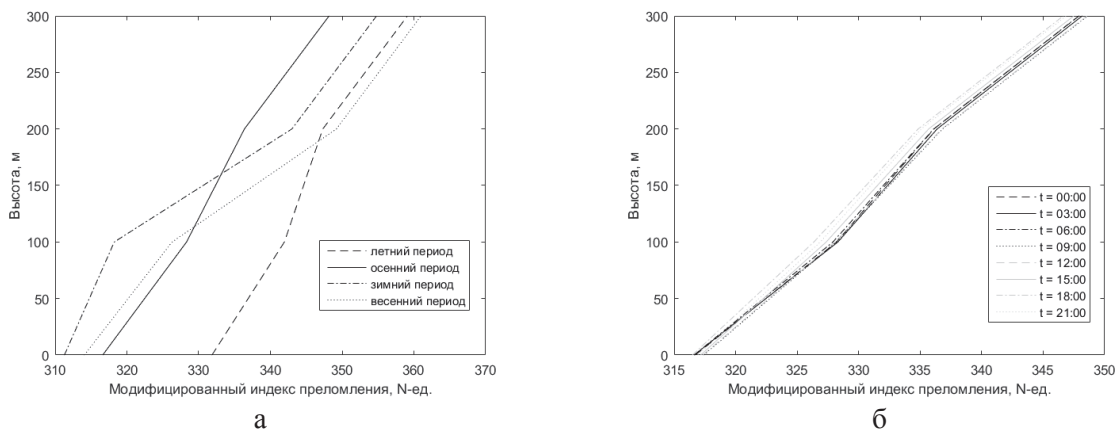


Рис. 1. Вид усредненного сезонного (а) и суточного (б) хода индекса преломления среды

Для примера на рисунке 2 приведен спектр нормальных волн для следующих исходных данных: для следующих параметров среды $N(0)=331.3643$, $N(100)=326.0981$, $N(200)=316.6415$ N -ед., сезон лето, время 09:00 (рис. 2а) и $N(0)=332.0048$, $N(100)=326.2701$, $N(200)=315.542$ N -ед., сезон лето, время 15:00 (рис. 2б), длина волны 3 см, поляризация поля – горизонтальная, параметры морской среды $\varepsilon=80$, $\sigma=3$ См/м. По оси абсцисс откладывается вещественная часть корней t_s характеристического уравнения, по оси ординат – мнимая часть. Кружками показано положение точек вертикальной ветви для однородной тропосферы.

Дистанционные зависимости функции ослабления на разных высотах расположения точки наблюдения с учетом суточного и сезонного хода параметров индекса преломления среды позволяют проследить за изменениями характеристик распространения радиоволн как в области волновода, так в вышележащем неоднородном слое тропосферы (рис. 3). Видно, что захват поля в волновод отсутствует, поле убывает по мере роста дальности, но изменение величины затухания поля в волноводе весьма чувствительно к сезонному (рис. 3а) и суточному ходу (рис. 3б) индекса преломления среды. Это объясняется особенностями формирования структуры поля и отсутствием в спектре нормальных волн так называемых волн шепчущей галереи. Следует отметить, что в данных расчетах не учитываются потери за счет рассеяния на нерегулярных неоднородностях тропосферы.

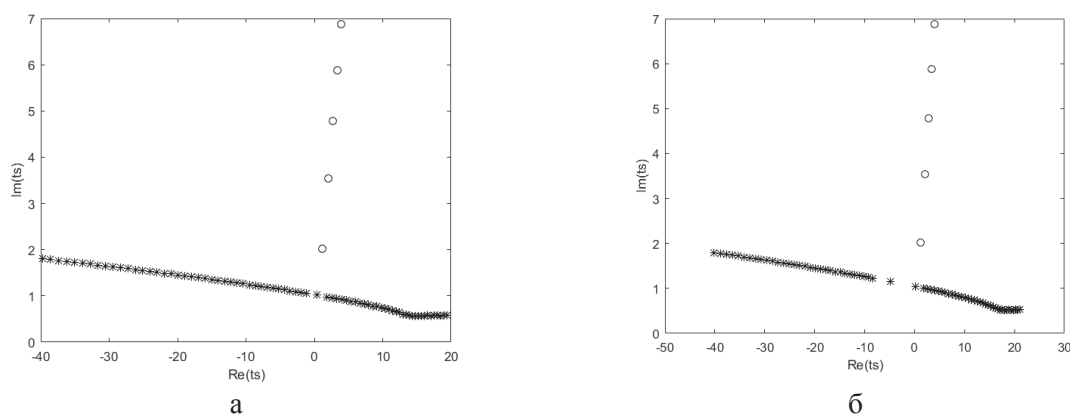


Рис. 2. Спектр нормальных волн для летнего периода, время 09:00 (а) и 15:00 (б)

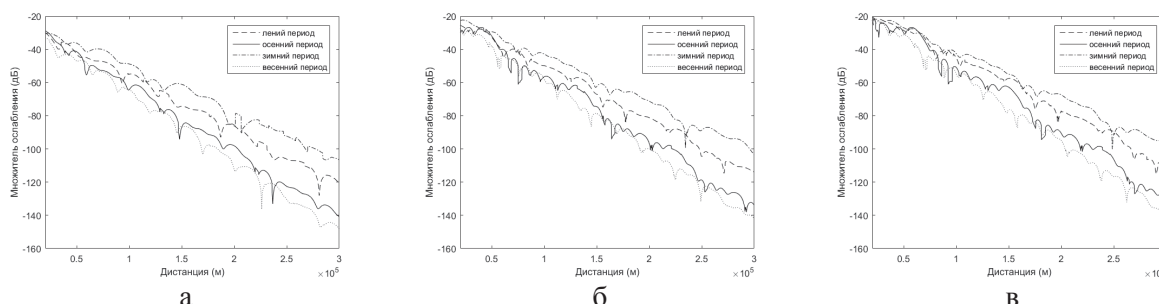


Рис. 3. Дистанционные зависимости функции ослабления для высоты расположения источника 25 м и высот точки наблюдения 20 м (а), 120 м (б) и 250 м (в)

Заключение

Анализ характеристик распространения радиоволн на основе усредненного за несколько лет сезонного хода индекса преломления среды показал, что от месяца к месяцу уровень сигнала значительно изменяется. Так в холодный период года энергетический выигрыш на дистанции 300 км, длине волны 3 см по сравнению с теплым периодом составляет более 40 дБ. Суточный ход уровня сигнала выражен не так существенно. Амплитуда колебаний составляет 1-10 дБ. Для суточного хода характерны с максимумы в дневные часы и минимумы в ночное и вечернее время.

Список литературы

1. Burk S.D., Thompson W.T. Mesoscale modeling of summertime refractive conditions in the Southern California Bight // J. Appl. Meteorol. – 1997. – 36. – P. 22–31.
2. Haack T., Burk S.D. Summertime marine refractivity conditions along coastal California // J. Appl. Meteorol. Climatol. – 2001. – 40. – P. 673–687.
3. Overland J., Dunlea E., Box J.E., Corell R., Forsius M., Kattsov V., Olsen M.S., Pawlak J., Reiersen L.O., Wang M. The urgency of Arctic change // Polar Sci. – 2019. – 21. – P. 6–13.
4. Kwok R. Arctic Sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: Losses and coupled variability (1958–2018) // Environ. Res. Lett. – 2018. – V. 13. – N. 10, 105005.
5. Бин Б.Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1971.
6. Lopez P. A 5-yr 40-km-Resolution Global Climatology of Superrefraction for Ground-Based Weather Radars // J. Appl. Meteor. Climatol. – 2009. – V. 48. – P. 89–110.
7. Qin T., Su B., Chen L., Yang J., Sun H., Ma J., Yu W. Arctic Atmospheric Ducting Characteristics and Their Connections with Arctic Oscillation and Sea Ice // J. Atmosphere. – 2022. – V. 13, 2119.
8. Светличный В.А., Смирнова О.В. Исследование характеристик распространения ультракоротких радиоволн в приводном волноводе // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63. – № 7. – С. 682–690.
9. Weather Research Forecasting Model (WF). – URL: <https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf> (дата обращения 29.04.2025).