

УДК 681.396

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.025](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.025)

Исследование коэффициента преломления морской воды при реализации подводной радиосвязи

Т.В. Аветисян^{1✉}, Я.Е. Львович², А.П. Преображенский², Ю.П. Преображенский²

¹Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж,
Российская Федерация

²Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. Подводная радиосвязь необходима для обмена информацией с различными объектами, которые находятся под водой, в том числе и на большой глубине. Кроме того, в связи с возникновением радиоокеанографии появились возможности для того, чтобы осуществлять дистанционный мониторинг по большим акваториям в Мировом океане. Эффективность радиолокационных измерений будет сильно зависеть от учета различных процессов, которые влияют на взаимодействие радиоволн с морской поверхностью. Для этого необходимо разрабатывать различные модели. В данной работе рассматривается задача распространения электромагнитной волны через границу двух сред: воздуха и морской воды. Представлена модель отражения и преломления электромагнитной волны. Изучены разные случаи поляризации. Проведен анализ свойств воды, которая входит в состав морей и океанов. Показано, каким образом диэлектрическая проницаемость воды зависит от таких характеристик, как соленость и температура. Приведены значения солености Атлантического, Тихого и Индийского океанов. Рассматривался случай падения сверхдлинной волны на границу воздуха и воды. Были проведены расчеты коэффициентов преломления электромагнитной волны в зависимости от угла ее первоначального распространения при заданных значениях солености и температуры.

Ключевые слова: распространение радиоволн, связь, коэффициент преломления, электродинамика.

Для цитирования: Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П. Исследование коэффициента преломления морской воды при реализации подводной радиосвязи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1385> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.025

Researching the refractive index of seawater for underwater radio communication

T.V. Avetisyan^{1✉}, Ya.E. Lvovich², A.P. Preobrazhenskiy², Yu.P. Preobrazhenskiy²

¹College of Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

²Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. Underwater radio communication is necessary for the exchange of information with various objects that are under water, especially at great depth. In addition, the development of radio oceanography has made it possible to carry out remote monitoring over large areas of the World Ocean. The effectiveness of radar measurements will be greatly influenced if various processes that affect the interaction of radio waves with the sea surface is accounted for. To achieve this, it is necessary to develop various models. This paper examines the problem of electromagnetic wave propagation through the interface of two media: air and sea water. Models of reflection and refraction of an electromagnetic wave are presented. Different cases of polarization are considered. Properties of water found in seas and oceans are analyzed. It is shown how the dielectric permittivity of water depends on such characteristics as salinity and temperature. The salinity values of the Atlantic, Pacific and Indian Oceans are given. The case of an ultra-long wave falling on the boundary between air and water was regarded. The refractive

coefficients of the electromagnetic wave were calculated depending on the angle of its initial propagation at given values of salinity and temperature.

Keywords: radio wave propagation, communication, refractive index, electrostatics.

For citation: Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P. Researching the refractive index of seawater for underwater radio communication. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1385> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.025 (In Russ.).

Введение

На основе использования радиоволн возникают возможности для того, чтобы проводить передачу энергии по пространству. Для этого создаются различные устройства, позволяющие излучать сигналы электромагнитных колебаний, которые будут распространяться через различные среды [1-3]. Вследствие того, что изменяется электрическое поле, будут осуществляться процессы генерации радиоволн. Среди основных характеристик электромагнитных волн можно отметить такие, как частота, длина волны, а также мощность энергии, которая будет переноситься из одной точки пространства в другую [4, 5]. Для связи с подводными аппаратами необходимо применять сверхдлинные волны. Требуется проводить подбор параметров передачи электромагнитных волн, позволяющих обеспечить минимизацию возможных потерь.

Целью данной работы является исследование коэффициентов преломления электромагнитной волны при распространении через слой морской воды.

Модель распространения электромагнитной волны через границу, разделяющую воздух и воду

Пусть электромагнитная волна распространяется к границе, которая будет разделять воздух и водную преграду, являющейся плоской [6]. Среды характеризуются разными параметрами ($\epsilon_a, \mu_a, \sigma$). Тогда будет возникать преломленная и отраженная волна (Рисунок 1).

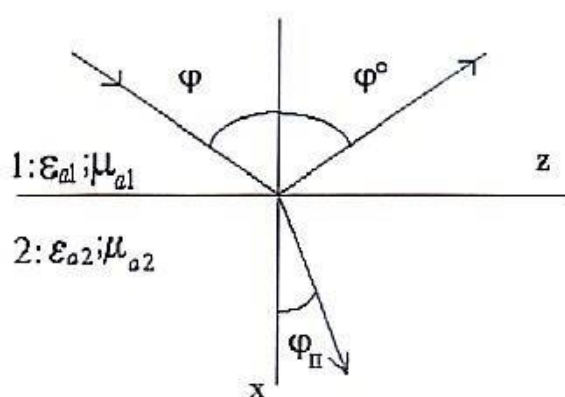


Рисунок 1 – Иллюстрация распространения электромагнитной волны на границе воздуха и воды
 Figure 1 – Electromagnetic wave propagation at the air-water boundary

В этих волнах амплитуды будут являться комплексными. Вводятся коэффициенты отражения и преломления. На их основе можно осуществить связь

указанных амплитуд и комплексной амплитуды, которая будет относиться к падающей

$$R^E = \frac{E^{omp}}{E^{nad}}, R^H = \frac{H^{omp}}{H^{nad}}$$

волне с использованием следующих выражений:

$$T^E = \frac{E^{np}}{E^{nad}}, T^H = \frac{H^{np}}{H^{nad}}$$

В случае, когда границе, разделяющей воздух и водную среду, будет перпендикулярен вектор Пойнтинга, который относится к падающей волне, мы имеем

выражение: $R^E = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}}, T^E = \frac{2Z_{c2}}{Z_{c2} + Z_{c1}}$.

Здесь $Z_{c1} = \sqrt{\frac{\mu_{a1}}{\epsilon_{a1}}}$ рассматривается в виде характеристического сопротивления воздушной среды, в которой происходит распространение падающей волны.

Если электромагнитная волна падает на границу, разделяющую воздух и водную преграду под определенным углом, то будет достаточно простое решение только при средах, которые не обладают потерями для задачи, связанной с определением коэффициентов рассеяния.

Если будет выполняться условие $tg\delta \ll 1$, тогда можно говорить о справедливости приведенных соотношений.

Первый и второй законы Снеллиуса позволяют связать между собой углы падения φ , отражения φ_0 и преломления φ_n : $\frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_n} = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}}$, при этом падающая волна будет

соответствовать среде, в которой индекс 1. То, как будут ориентированы векторы электромагнитного поля, оказывает влияние на значения коэффициентов отражения и преломления. При этом учитывается ориентация таких векторов по отношению к плоскости падения. Это плоскость, которая будет проходить через нормаль к границе раздела. Должен быть задан соответствующий угол падения. В случае, когда такой плоскости будет параллелен вектор E , то справедливы выражения:

$$R_{//}^E = \frac{Z_{c1} \cos \varphi - Z_{c2} \cos \varphi_n}{Z_{c1} \cos \varphi + Z_{c2} \cos \varphi_n}, \quad (1)$$

$$T_{//}^E = \frac{2Z_{c2} \cos \varphi}{Z_{c1} \cos \varphi + Z_{c2} \cos \varphi_n}. \quad (2)$$

Когда вектор E будет перпендикулярен плоскости падения, будут справедливыми выражения:

$$R_{\perp}^E = \frac{Z_{c2} \cos \varphi - Z_{c1} \cos \varphi_n}{Z_{c2} \cos \varphi + Z_{c1} \cos \varphi_n}, \quad (3)$$

$$T_{\perp}^E = \frac{2Z_{c2} \cos \varphi}{Z_{c2} \cos \varphi + Z_{c1} \cos \varphi_n}. \quad (4)$$

Если внутри сред будет выполняться условие $\mu_1 = \mu_2$, тогда можно сделать запись выражений (1)-(4) следующим образом:

$$R_{//}^E = \frac{\varepsilon_2 \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \varphi}}{\varepsilon_2 \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \varphi}}, \quad (5)$$

$$T_{//}^E = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2} \cos \varphi}{\varepsilon_2 \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \varphi}}, \quad (6)$$

$$R_{\perp}^E = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \varphi}}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \varphi}}, \quad (7)$$

$$T_{\perp}^E = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \varphi}}. \quad (8)$$

Из равенства (4) можно увидеть, что когда выполняется условие $(\varepsilon_2 \mu_2) < (\varepsilon_1 \mu_1)$, тогда угол преломления будет превышать угол падения. В этой связи, когда $\varphi = \varphi_{no} = \arcsin \sqrt{\frac{(\varepsilon_2 \mu_2)}{(\varepsilon_1 \mu_1)}}$, тогда скольжение преломленной волны будет вдоль границы,

которая разделяет воздушную и водную среду. Основываясь на (5), (7), можно увидеть, что будет равенство 1 по модулю коэффициентов отражения. Предположим, что будет происходить рост значения угла падения. Тогда в коэффициентах отражения значение модуля также будет 1. Но при этом будет происходить изменение в значении фазы. В таком случае приходим к полному внутреннему отражению.

Проводя анализ (5), (7), видно, что, когда $\varphi \geq \varphi_{no}$, можно проводить вычисление коэффициентов отражения следующим образом:

$$R_{//}^E = -\exp \left\{ 2 j \arctg \left[\frac{\varepsilon_1 \sqrt{\sin^2 \varphi - \frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}}}{\varepsilon_2 \cos \varphi} \right] \right\}, \quad R_{\perp}^E = \exp \left\{ 2 j \arctg \left[\frac{\mu_1 \sqrt{\sin^2 \varphi - (\varepsilon_2 \mu_2) / (\varepsilon_1 \mu_1)}}{\mu_2 \cos \varphi} \right] \right\}.$$

Когда наблюдается случай полного внутреннего отражения, то не будет равенства 0 коэффициентов преломления. Если проводить анализ поля во 2 среде (водной), то мы наблюдаем плоскую волну, являющуюся неоднородной. Будет происходить ее распространение вдоль границы, разделяющей две среды

$$E^{np} = T E^{nad} \exp \left\{ -\beta_1 \left[x \sqrt{\sin^2 - \frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}} + j z \sin \varphi \right] \right\}.$$

При этом коэффициент $T_{\perp}^E = \frac{2 \cos \varphi}{\frac{\mu_2}{\mu_1} - j \sqrt{\sin^2 - \frac{(\varepsilon_2 \mu_2)}{(\varepsilon_1 \mu_1)}}} \frac{\mu_2}{\mu_1}$. Когда между плоскостью

падения электромагнитной волны и вектором E угол равен 90° , тогда

$$T_{//} = \frac{2 \cos \varphi}{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cos \varphi - j \sqrt{\sin^2 \varphi - \frac{(\varepsilon_2 \mu_2)}{(\varepsilon_1 \mu_1)}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1}}. \quad \text{Происходит процесс экспоненциального}$$

убывания значений амплитуд электромагнитных волны внутри второй сред (то есть в водном слое), когда мы удаляемся от границы раздела. В таком случае будет распространение поверхностных волн.

Угол полного преломления будет равен углу нулевого коэффициента отражения.

Выражение, которое позволяет определить φ_δ , мы можем представить при условии равенства 0 (5) и (7). Условие полного преломления будет выполняться при распространении параллельно-поляризованных волн в средах с одинаковыми значениями магнитных проницаемостей. Однако $tg \varphi_\delta = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}$, это условие не будет выполняться, если волны будут нормально-поляризованными.

Анализ свойств морской воды

Если провести анализ свойств воды, которая входит в состав морей и океанов, то она не является идеальным проводником, но при этом она не будет идеальным изолятором. Те электромагнитные волны, которые будут попадать на поверхность воды, будут приводить к возбуждению внутри нее переменных электрических токов. Тогда на нагрев слоя воды будет расходоваться часть энергии [7]. Электрическое сопротивление воды и значение частоты электромагнитных волн будут оказывать влияние на то, какие будут величины потери энергии в водном слое. Для поверхностных радиоволн будет наблюдаться уменьшение значение дальности их распространения по мере того, как будет происходить рост их частоты [9, 10]. Это связано с тем, что внутри водного слоя значения индуцируемой электродвижущей силы (ЭДС) будут возрастать. При этом постепенным образом будет происходить увеличение токов внутри воды земле. За счет них формируются электромагнитные поля обратного направления.

Внутри водной преграды, по сравнению с воздухом, значение скорости распространяющихся электромагнитных волн будет меньше. Когда электромагнитная волна будет двигаться вдоль поверхности водной преграды, тогда можно увидеть, что верхний край в волне будет отставать от нижнего. Фронт в волне будет идти под наклоном к поверхности воды.

Следует отметить, что в морях и океанах потери существенно ниже, если проводить сравнение с поверхностью земли [11]. На характеристики потерь в водном слое оказывают влияние значения температуры, плотности, солености, а также однородности.

В Таблице 1 приведены значения солености океанов.

Таблица 1 – Значения солености океанов
Table 1 – Ocean salinity values

Океан	Значение солености, %
Атлантический	35,4
Тихий	34,56
Индийский	34,68

Для морской воды можно представить диэлектрическую проницаемость таким

образом $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j2\pi\tau f} - j\frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0 f}$, при этом использованы обозначения:

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ – диэлектрическая постоянная; f – значение частоты падающей электромагнитной волны; σ, τ – значения ионной проводимости и времени релаксации морской воды; $\varepsilon_\infty = 4,5, \varepsilon_s$ – значение оптической и статической проницаемостей соответственно.

Ниже приведены ключевые выражения для расчетов [7]
 $\varepsilon_s(T, N) = \varepsilon_s(T, 0)a(N)$, при этом

$\varepsilon_s(T, 0) = 87,74 - 0,4008T + 9,398 \cdot 10^{-4}T^2 + 1,410 \cdot 10^{-6}T^3$; где параметр T – это термодинамическая температура, которая измеряется в °С. Параметр $a(N)$ определяется на основе выражения $a(N) = 1,000 - 0,2551N + 5,151 \cdot 10^{-2}N^2 - 6,889 \cdot 10^{-3}N^3$; N – показывает нормальность воды с учетом в ней солей, при этом учитывается соленость S
 $N = S \left[1,707 \cdot 10^{-2} + 1,205 \cdot 10^{-5}S + 4,058 \cdot 10^{-9}S^2 \right]$.

Когда определяется время релаксации τ , то необходимо опираться на следующее выражение:

$\tau(T, N) = (2\pi\tau(T, 0)b(T, N))$, при этом
 $\tau(T, 0) = (1,1109 \cdot 10^{-10} - 3,824 \cdot 10^{-12}T + 6,938 \cdot 10^{-14}T^2 - 5,096 \cdot 10^{-16}T^3) / 2\pi$, здесь
 $b(T, N) = (0,1463 \cdot 10^{-2}NT + 1,000 - 0,04896N - 0,02967N^2 + 5,644 \cdot 10^{-3}N^3)$.

Для расчета ионной проводимости исследователи предлагают применять такое выражение $\sigma(T, S) = \sigma(25, S)e^{-\Delta\alpha}$, где

$\sigma(25, S) = S \left[0,182521 - 1,46192 \cdot 10^{-3}S + 2,09324 \cdot 10^{-5}S^2 - 1,2805 \cdot 10^{-7}S^3 \right]$;

$\alpha = 2,033 \cdot 10^{-2} + 1,266 \cdot 10^{-4}\Delta + 2,464 \cdot 10^{-6}\Delta^2 - S \left[\begin{array}{l} 1,849 \cdot 10^{-5} - 2,551 \cdot 10^{-7}\Delta + \\ + 2,551 \cdot 10^{-8}\Delta^2 \end{array} \right]$;

$\Delta = 25 - T$.

Результаты

На основе формул (6) и (8) были проведены расчеты коэффициентов преломления электромагнитной волны в зависимости от угла ее падения. Частота падающей волны

была выбрана 25 кГц, температура воды $T=21^\circ$. На Рисунке 2 проводится расчет $T_{//}^E$, кривая 1 соответствует Атлантическому океану, кривая 2 – Тихому океану, кривая 2 –

Индийскому океану. На Рисунке 3 проводится расчет T_{\perp}^E , кривая 1 соответствует Атлантическому океану, кривая 2 – Тихому океану, кривая 2 – Индийскому океану.

Видно, что $T_{//}^E$ очень слабо зависит от изменения угла падения электромагнитной волны

(менее 1 %). Значение $T_{//}^E$ при изменении угла падения электромагнитной волны в заданных пределах будет меняться приблизительно на 20 %. Для рассматриваемых океанов значения коэффициентов преломления будут отличаться не более чем на 1 %.

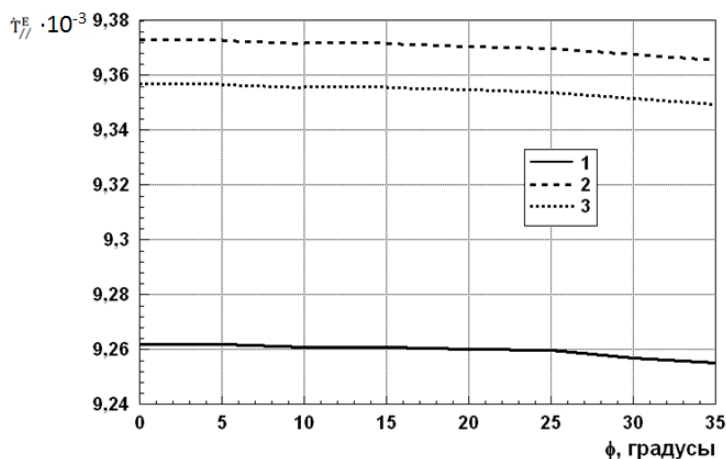


Рисунок 2 – Иллюстрация расчета $T_{//}^E$

Figure 2 – Calculation of $T_{//}^E$

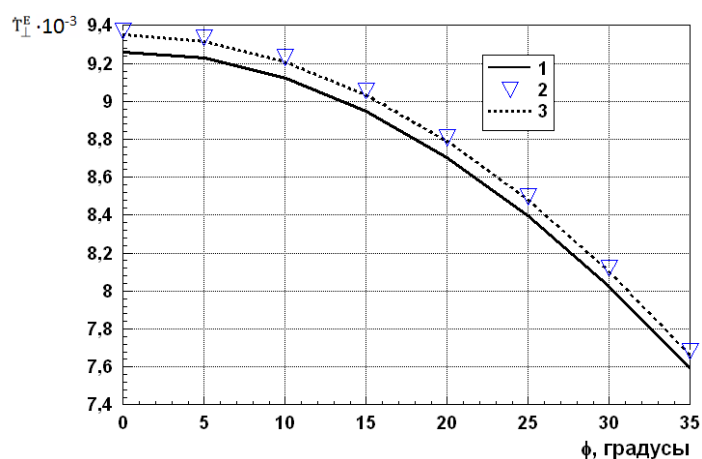


Рисунок 3 – Иллюстрация расчета T_{\perp}^E

Figure 3 – Calculation of T_{\perp}^E

Заключение

В работе рассмотрены особенности распространения электромагнитной волны через границу воздух-морская вода. Разработана математическая модель для расчета коэффициента преломления. Проведены расчеты угловой зависимости коэффициента преломления при заданных значениях солености морской воды и температуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Анализ особенностей приема и передачи сигналов в компьютерных сетях. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;40(1):75–78.
2. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Анализ некоторых направлений повышения пропускной способности ip-сетей связи. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;40(1):42–45.

3. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Особенности оптимизации беспроводных систем связи. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;40(1):68–71.
4. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2012;9:60–62.
5. Преображенский Ю.П., Аветисян Т.В., Ружицкий Е. Анализ некоторых характеристик спутниковых систем связи. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;40(1):82–85.
6. Никольский В.В. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Наука; 1978. 543 с.
7. Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В., Ашеко А.А., Батулин С.А. *Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий*. Препринт. М.: ИКИ РАН; 2002. Пр-2172, 60 с.
8. Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004;42(9):1836–1849. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888.
9. Ерёмка В.Д., Кабанов В.А., Логвинов Ю.Ф., Мыценко И.М., Разказовский В.Б., Робенко А.Н. *Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью*. Севастополь: Вебер; 2013. 217 с.
10. Соленость воды мирового океана: от чего она зависит и на что влияет. URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/solenost-vody-mirovogo-okeana-ot-chego-ona-zavisit-i-na-chto-vliyaet> [дата обращения: 23.09.2022].
11. Дударев Д.С., Дударев К.С., Теренина Н.К. Распространение радиоволн в океане. *Юный ученый*. 2019;21(1):13–18. URL: <https://moluch.ru/young/archive/21/1332/> [дата обращения: 08.10.2022].

REFERENCES

1. Lvovich Y.E., Preobrazhensky Y.P., Ruzhitsky E. Analysis of signal reception and transmission features in computer networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;40(1):75–78. (In Russ.).
2. Lvovich Y.E., Preobrazhensky Y.P., Ruzhitsky E. Analysis of some directions of increasing the capacity of ip-network communication. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;40(1):42–45. (In Russ.).
3. Lvovich Ya.E., Preobrazhensky Yu.P., Ruzhicky E. Features of optimization of wireless communication systems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;40(1):68–71. (In Russ.).
4. Miloshenko O.V. Methods for assessing the characteristics of radio wave propagation in mobile radio communication systems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*. 2012;9:60–62. (In Russ.).
5. Preobrazhensky Yu.P., Avetisyan T.V., Ruzhicky E. Analysis of some characteristics of satellite communication systems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;40(1):82–85. (In Russ.).
6. Nikol'skij V.V. *Electrodynamics and propagation of radio waves*. Moscow, Nauka; 1978. 543 p. (In Russ.).

7. Sadovskij I.N., Kuz'min A.V., Sharkov E.A., Sazonov D.S., Pashinov E.V., Asheko A.A., Batulin S.A. *Analysis of models of permittivity of the aquatic environment used in remote sensing of water areas*. Preprint. Moscow, IKI RAN; 2002. Pr-2172, 60 p. (In Russ.).
8. Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004;42(9):1836–1849. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888.
9. Eremka V.D., Kabanov V.A., Logvinov Yu.F., Mytsenko I.M., Razskazovsky V.B., Roenko A.N. *Features of radio wave propagation over the sea surface*. Sevastopol, Weber; 2013. 217 p. (In Russ.).
10. Solenost' vody mirovogo okeana: ot chego ona zavisit i na chto vliyaet. URL: <https://www.rgo.ru/ru/article/solenost-vody-mirovogo-okeana-ot-chego-ona-zavisit-i-na-chto-vliyaet> [accessed on 07.02.2021]. (In Russ.).
11. Dudarev D.S., Dudarev K.S., Terenina N.K. Propagation of radio waves in the ocean. *Yunyi uchenyi*. 2019;21(1):13–18. URL: <https://moluch.ru/young/archive/21/1332/> [accessed on 08.10.2022]. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аветисян Татьяна Владимировна, преподаватель, Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: vtatyana.avetisyan@mail.ru
ORCID: [0000-0003-3559-6070](https://orcid.org/0000-0003-3559-6070)

Tatiana Vladimirovna Avetisyan, Lecturer, College of Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: office@vvt.ru
ORCID: [0000-0002-7051-3763](https://orcid.org/0000-0002-7051-3763)

Yakov Evseevich Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.
ORCID: [0000-0002-6911-8053](https://orcid.org/0000-0002-6911-8053)
e-mail: app@vvt.ru

Andrey Petrovich Preobrazhenskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Преображенский Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

Yuri Petrovich Preobrazhenskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 23.05.2023; одобрена после рецензирования 06.07.2023; принята к публикации 27.09.2023.

The article was submitted 23.05.2023; approved after reviewing 06.07.2023; accepted for publication 27.09.2023.