

УДК 621.371.34

Методика расчета суммарного поля пространственной и земной волн диапазона очень низких частот

Типикин А. А., Пахотин В. А.

Постановка задачи: Известная методика оценки энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот на основе скачкового способа, разработанная в интересах автоматизации ввода исходных данных, включающих сведения о состоянии подстилающей поверхности, ионосферы и геомагнитного поля Земли, не учитывает поле земной волны в ходе вычисления напряженности электрического поля в заданной точке радиотрассы. Не ясны границы, в пределах которых влияние земной волны на суммарное поле при использовании скачкового метода должно учитываться. **Целью работы** является разработка методики оценки энергетических параметров радиотрассы диапазона очень низких частот с учетом влияния земной волны и оценка границ, в пределах которых влияние земной волны на суммарное поле существенно. **Используемые методы:** решение задачи основывается на использовании скачкового метода, учитывающего геометрооптический и квазигеометрооптический механизмы распространения для пространственной волны и дифракционный механизм распространения для земной волны. **Новизна:** при расчете поля земной волны использовано автоматическое профилирование электрических параметров подстилающей поверхности на базе глобальных цифровых карт и обобщенная методика расчета напряженности поля земной волны для произвольного количества однородных участков радиотрассы. **Результат:** учет поля земной волны при расчете энергетических параметров радиотрасс повысил точность прогнозной методики в области, где земная волна оказывает существенное влияние на суммарное поле, что подтверждается снижением средней суммарной погрешности прогнозирования на 3 дБ. Обеспечено автоматическое профилирование электрических параметров подстилающей поверхности на базе глобальных цифровых карт и учет произвольного количества однородных участков на радиотрассе. Адекватность разработанной методики подтверждена путем сравнения результатов прогнозирования с измерениями напряженности поля на реальных радиотрассах с последующим статистическим анализом погрешностей прогнозирования, базирующимся на показателях Зейла и Рассела. На основе статистически значимых различий погрешностей прогнозирования получена граница области, в пределах которой необходимо учитывать влияние земной волны на суммарное поле. **Практическая значимость:** автоматизация ввода исходных геофизических данных позволяет сократить сроки выполнения расчетных задач и снизить нагрузку на оператора при оценке возможностей систем связи специального назначения по обеспечению сил связью в заданных районах действий. Прогнозы, получаемые с помощью разработанной методики, повысят обоснованность предложений по вариантам обеспечения связи при разработке предложений в решение должностных лиц на применение систем связи специального назначения.

Ключевые слова: очень низкие частоты, прогнозирование, энергетические параметры, пространственная волна, земная волна, адекватность, геофизические данные.

Библиографическая ссылка на статью:

Типикин А. А., Пахотин В. А. Методика расчета суммарного поля пространственной и земной волн диапазона очень низких частот // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 3. С. 1-21. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-001-021

Reference for citation:

Tipikin A. A., Pakhotin V. A. The technique of calculating the total field of spatial and ground waves in the very low frequency band. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 3, pp. 1-21 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-001-021

Актуальность

В соответствии с положениями, разработанными в рамках теории управления, применение систем связи специального назначения, включает в себя не только конкретные организационно-технические мероприятия по обеспечению связи с заданными объектами, но и процесс подготовки системы связи органами управления [1]. При этом методика принятия решения на организацию связи и планирование применения системы связи, требует, чтобы в ходе подготовки системы связи к применению была выполнена оценка возможностей по обеспечению связи в заданных районах с учетом вероятных вариантов противодействия [2, 3]. Указанные подходы не могут быть в полной мере реализованы без наличия автоматизированных расчетных методик, позволяющих заблаговременно или в сжатые сроки обосновать предложения в решение должностного лица на применение сил.

Так как своевременность связи обеспечивается применением всего освоенного спектра радиочастот, то одним из вопросов, решаемых должностными лицами органа управления, является обоснование возможностей по обеспечению связи в диапазоне очень низких частот (ОНЧ), где в первую очередь требуется провести расчеты энергетических параметров радиотрасс. Исторически параллельно развивались два метода прогнозирования распространения радиоволн ОНЧ диапазона – скачковый и волновой. Положительные и отрицательные стороны каждого из методов упомянуты в работах [4–6]. Развитие методов вычислительной электродинамики привело к появлению третьего направления, базирующегося на таких вычислительных методах как, например, метод конечных разностей во временной области [7, 8]. Однако в настоящее время методы вычислительной электродинамики не приобрели широкого распространения для решения задач прогнозирования распространения радиоволн, что связано в первую очередь с высокой вычислительной ресурсоемкостью решения и, следовательно, большой длительностью расчетов [9]. Поэтому волновые и скачковые методы остаются основными методами прогнозирования энергетических параметров радиотрасс ОНЧ диапазона.

В исследовании [10] разработана методика прогнозирования напряженности поля ионосферной волны, базирующаяся на рекомендации [11]. Отличительной особенностью методики является использование в качестве входных данных профилей концентрации заряженных частиц на базе стандартной модели ионосферы [12–14] и цифровых карт электрических параметров подстилающей поверхности [15, 16]. Адекватность методики подтверждена статистическим анализом погрешностей прогнозирования. Однако разработанная методика не учитывает вклад земной волны в суммарное поле в точке приема. Кроме того, в канонических трудах по распространению радиоволн ОНЧ диапазона приведены только ориентировочные сведения о расстояниях, на которых земная волна оказывает существенное влияние на прием сигналов радиосвязи. Таким образом, целью данного исследования является разработка скачковой методики прогнозирования энергетических параметров радиотрасс с учетом вклада земной волны в суммарное поле в точке приема, а также оценка дальностей

радиотрасс, на которых земная волна оказывает существенное влияние на прием сигналов радиосвязи.

Методика

Скачковый метод прогнозирования радиоволн сводится к разложению электромагнитной волны на n лучей, распространяющихся от передатчика к приемнику различными траекториями, включающими от 1 до n скачков. При этом рассматривают два варианта распространения – геометрооптический и квазигеометрооптический [17], проиллюстрированные на рис. 1. Геометрооптическое представление используется при наличии прямой видимости между точками отражения от поверхности Земли и ионосферы, т.е. для случаев $\Psi_j^n > 0$, где Ψ_j^n – угол между направлением на точку отражения от ионосферы и касательной к земной поверхности, называемый углом места для n -скачкового луча на j -м скачке, $j = 1, 2, \dots, n$. Если $\Psi_j^n \leq 0$ то наблюдается квазигеометрооптическое распространение радиоволны. В этом случае земная поверхность затеняет точку отражения от ионосферы, поэтому начальную часть пути до ионосферы электромагнитная волна преодолевает с помощью дифракционного механизма распространения вдоль границы раздела Земля/атмосфера, а конечную – по прямолинейной траектории. Фактически квазигеометрооптическое представление является совокупностью двух механизмов распространения – дифракционного и пространственного, что более подробно описано в [6, 17].

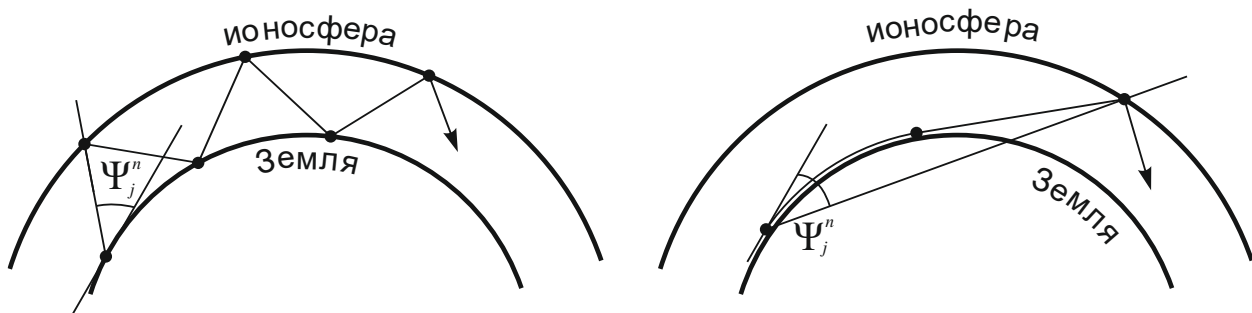


Рис. 1. Варианты траекторий радиоволны в скачковой модели распространения:
а – геометрооптический, б – квазигеометрооптический

Общее выражение для расчета напряженности поля пространственной волны в диапазоне ОНЧ скачковым методом, приведено в [11], где напряженность поля n -скачкового луча пространственной волны в мВ/м записывается как:

$$E_s^n = \frac{600\sqrt{P_t} \cos \Psi^n F_r^n F_t^n \prod_{i=1}^n F_i^n \prod_{i=1}^n R_i^n \prod_{i=1}^{n-1} R g_i^n}{D^n} \exp(-jkD^n), \quad (1)$$

где P_t – мощность передатчика, кВт;

Ψ^n – угол места [18];

F_i^n – коэффициент ионосферной фокусировки i -го скачка, рассчитываемый по п. 2.3.3 рекомендации МСЭ [11];

- F_r^n – поправочный антенный коэффициент приемной антенны [19];
 F_t^n – поправочный антенный коэффициент передающей антенны [19];
 R_i^n – ионосферный коэффициент отражения в i -й точке отражения, рассчитываемый по п. 2.3.5 рекомендаций МСЭ [11];
 Rg_i^n – коэффициент отражения от поверхности Земли в i -й точке отражения [6];
 D^n – длина трассы вдоль траектории распространения электромагнитной волны, рассчитываемая по методике [20];
 k – волновое число.

Для определения напряженности поля ионосферной волны суммируются лучи, включающие от 1 до n скачков. Более подробно методика расчета напряженности поля пространственной волны изложена в [10].

Для расчета напряженности поля земной волны в рекомендации [11] дана формула

$$E_g = |E_g| \exp(-jkG_r), \quad (2)$$

где $|E_g|$ – напряженность поля земной волны, дБ/(мкВ/м);

G_r – длина радиотрассы вдоль земной поверхности, км.

В соответствии с [11] величину $|E_g|$ рекомендуется рассчитывать с помощью методики Ротерема [21], реализованной в программе GRWAVE. Следует отметить, что программный расчет поля земной волны дает только модуль искомой величины, поэтому в формуле (2) фаза считается линейно изменяющейся с расстоянием, что не соответствует действительности. На самом деле характер изменения фазы земной волны подвержен влиянию подстилающей поверхности [17, 22], поэтому линейно изменяющуюся фазу земной волны целесообразно использовать только для оценки влияния земной волны на суммарное поле в точке приема.

Результирующее электрическое поле рассчитывается путем векторного суммирования земной волны и пространственных волн [11]:

$$E = E_g + \sum_{n=1}^N E_s^n, \quad (3)$$

где N обычно равно 10 для получения достаточной точности. Далее напряженность поля и фаза в точке приема берутся как $|E|$ и $\arg(E)$ соответственно.

Разработанная расчетная методика представляет собой совокупность частных методик, реализованных в виде скрипта и вспомогательных функций на языке Matlab. Блок-схема методики показана на рис. 2.

В блоке 1 вводятся исходные данные, включающие массив рабочих частот, дату и время, на которое проводятся расчеты, координаты точек приема и передачи, мощность передатчика. На основе введенных данных в блоке 2 запускаются вспомогательные функции, выполняющие расчеты напряженности поля ионосферной волны. Методика расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне ОНЧ на основе скачкового метода подробно описана в работе [10]. На основе тех же исходных данных в блоке 3 выполняется автоматическое профилирование [23], результатом которого является горизонтальный профиль электрических характеристик подстилающей поверхности. Профили-

рование выполняется на базе цифровых карт [15]. В блоке 4 осуществляется расчет напряженности поля земной волны на разнородной трассе, для чего сначала проводятся расчеты однородных участков с помощью программы GRWAVE, а затем результаты пересчитываются для разнородной трассы с помощью процедуры Миллингтона [24]. Частная методика расчета напряженности поля земной волны для трассы с произвольным количеством участков и характеристиками подстилающей поверхности изложена в работе [25]. Данные о напряженности поля на выходе блоков 3 и 4 представляются в комплексном виде, который позволяет просто выполнить векторное суммирование в блоке 5 и получить значение напряженности суммарного поля в точке приема.

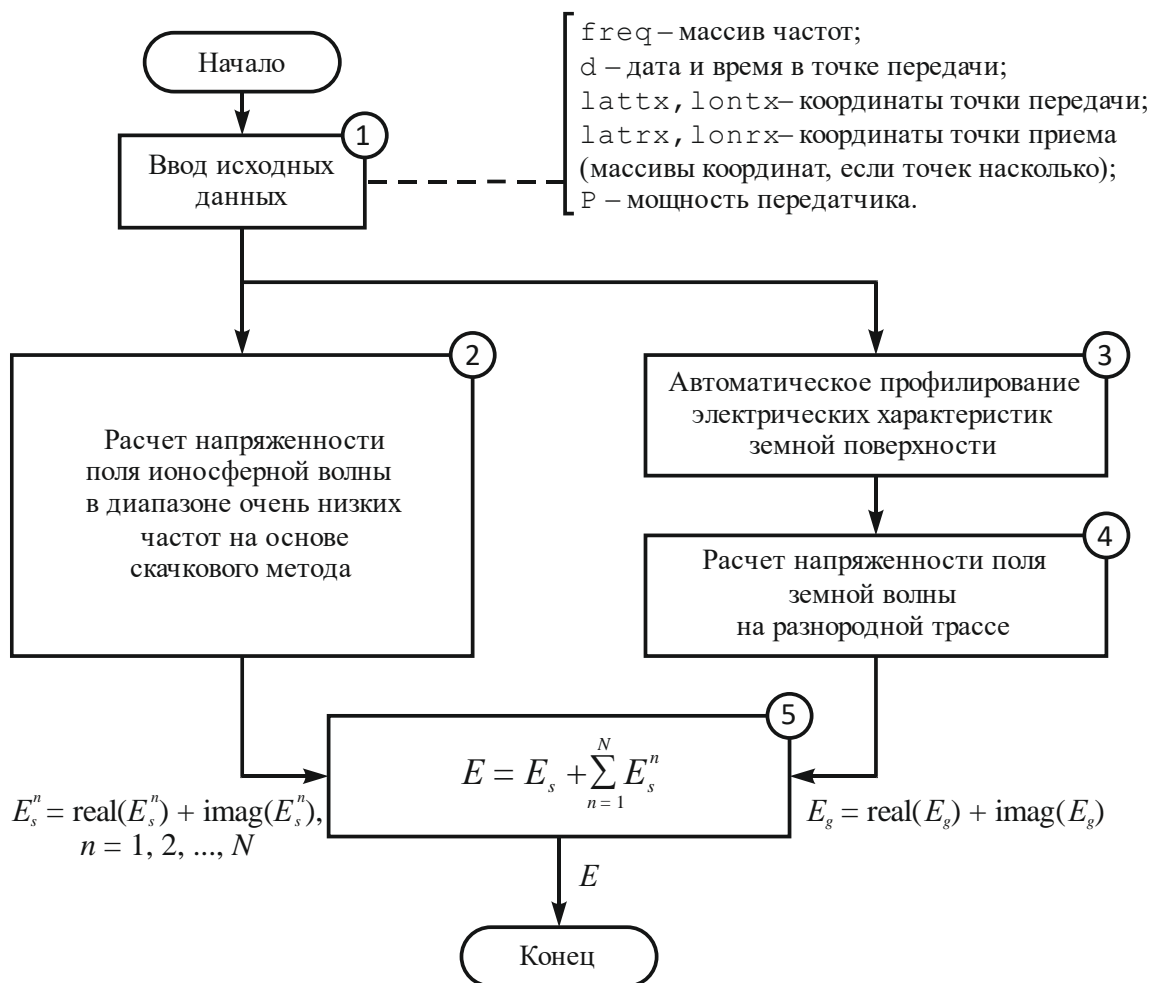


Рис. 2. Блок-схема методики расчета суммарного поля пространственной и земной волн диапазона очень низких частот

Сравнение результатов расчетов с результатами измерений

Для определения адекватности расчетного метода и точности проведения расчетов выполнено сравнение результатов расчетов с результатами измерений на различных трассах радиосвязи [11, 26]:

Гавайи (21,22° с.ш.; 158,00° з.д. (Перл-Харбор)) – Сан-Франциско (37,47° с.ш.; 122,25° з.д.). Частота 24 кГц, июнь 1965 г., день.

Гавайи (21,22° с.ш.; 158,00° з.д.) – Сиэтл (47,36° с.ш.; 122,20° з.д.). Частота 23,4 кГц, 27.01.1969 г., ночь.

Гавайи (21,22° с.ш.; 158,00° з.д.) – Самоа (13,48 ю.ш.; 171,45° з.д.). Частота 23,4 кГц, 29.01.1969 г., ночь.

Галифакс (44,38° с.ш.; 63,35° з.д.) – азимут 340°. Частоты 15, 25 и 35 кГц, лето, день и ночь.

Гавайи (21,22° с.ш.; 158,00° з.д.) – Южн. Калифорния (35,31° с.ш.; 118,21° з.д.). Частотные измерения. Сентябрь-октябрь 1968 г., день и ночь. Расстояние 4166 км.

Сильвер Крик (41,32° с.ш.; 97,67° з.д.) – Форт Юкон (66,56° с.ш.; 145,26° з.д.). 26.01.1970 г., день и ночь. Частота 34.5 кГц.

Во всех случаях результаты измерений приведены к значению излучаемой мощности 1 кВт. В качестве примера на рис. 3 показана трасса радиосвязи Сильвер-Крик – Форт Юкон, а на рис. 4 – графики измеренных и прогнозных значений напряженности электрического поля. Данные измерений взяты из [26].

Для оценки точности метода прогнозирования принято использовать показатели, базирующиеся на погрешностях прогнозов [27, 28]. Абсолютная погрешность i -го прогноза, характеризующегося своей совокупностью исходных данных (длина трассы, частота, время и т.д.), вычисляется по формуле:

$$e_i = x_i - y_i, \quad (4)$$

где $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ – результаты прогнозирования, а $y_i = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ – результаты измерений.

Усредненные показатели, характеризующие погрешность прогнозирования [29], рассчитываются по формулам:

средняя погрешность прогнозирования

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i, \quad (5)$$

средняя абсолютная погрешность прогнозирования

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i|, \quad (6)$$

среднеквадратичная погрешность прогнозирования

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N e_i^2}, \quad (7)$$

абсолютная нормированная погрешность прогнозирования

$$MASE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N q_i}, \quad (8)$$

где

$$q_i = \frac{e_i}{\frac{1}{N-1} \sum_{j=2}^N |x_i - x_{j-1}|}.$$

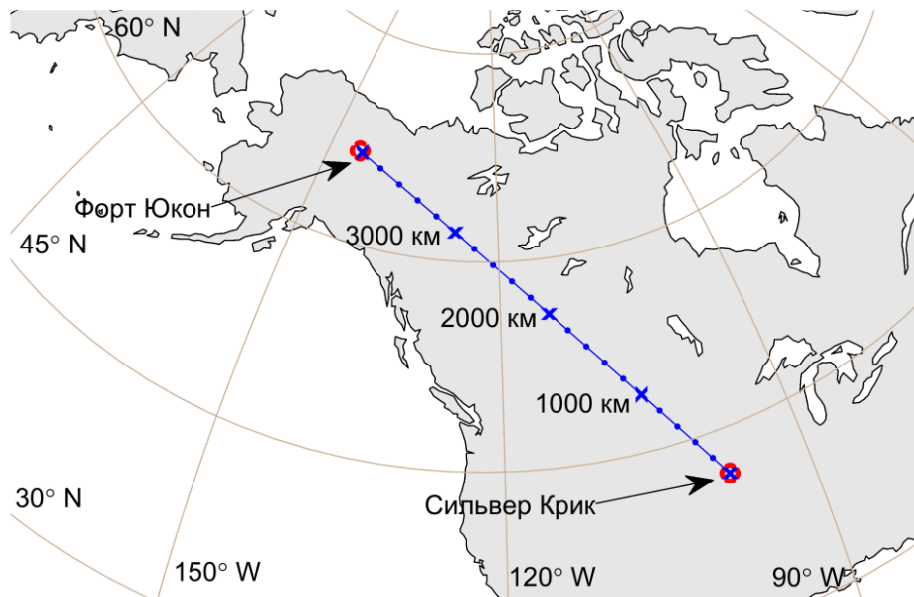


Рис. 3. Радиотрасса Сильвер Крик – Форт Юкон

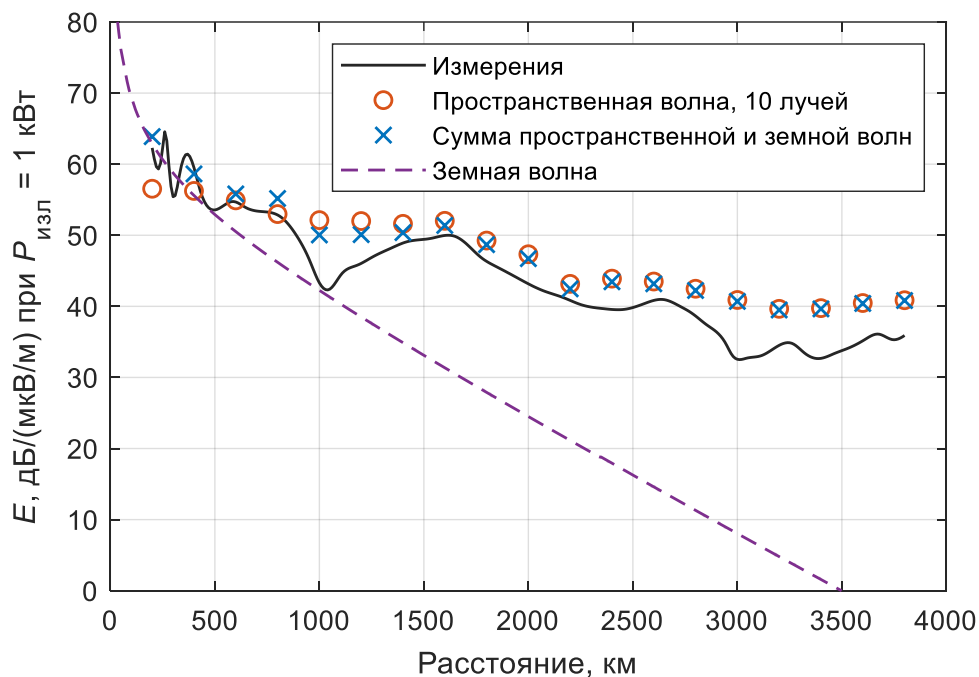


Рис. 4. Расчетные и измеренные значения напряженности электрического поля на трассе Сильвер-Крик – Форт Юкон

Результаты расчетов показателей представлены в таблице 1, где в верхней части строки приведены показатели, полученные для прогнозов ионосферной волной по методике [10], а в нижней части – для суммы полей ионосферной и земной волн.

Статистика погрешностей расчетов показывает, что прогнозируемое значение напряженности поля ионосферной волны в среднем на 3,43 дБ/(мкВ/м) превышает результаты измерений, что приблизительно на 1 дБ хуже, чем прогнозирование только ионосферной волной. Вычисление квантилей вероятности дает 90% полосу достоверности вычислений, которая составляет интервал от –

13,74 до 20,51 дБ/(мкВ/м) относительно расчетного значения. Метод бутстрепинга [30, 31] позволяет определить доверительные интервалы полученных оценок, которые также представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели точности прогнозов

№ п/п	Показатель (ионосферная волна/ионосферная волна + земная волна)	Значение, дБ/(мкВ/м)	Нижняя граница 95% доверительного интервала оценки показателя	Верхняя граница 95% доверительного интервала оценки показателя
1.	<i>ME</i>	2,61 3,43	1,24 2,11	3,80 4,54
2.	<i>MAE</i>	8,06 8,07	7,33 7,23	9,18 8,99
3.	<i>RMSE</i>	10,94 10,83	9,75 9,80	12,55 12,19
4.	<i>MASE</i>	0,13 0,13	0,11 0,12	0,15 0,15
5.	Нижняя граница 90% доверительной полосы	-14,50 -13,74	-16,55 -16,95	-10,42 -9,82
6.	Верхняя граница 90% доверительной полосы	19,68 20,51	15,52 18,03	24,18 23,65

Таким образом, различия между прогнозами, полученными для ионосферной волны и суммы ионосферной и земной волн незначительные и составляют в среднем около 1 дБ. Однако здесь следует учитывать, что фаза земной волны в соответствии с рекомендацией [11] при прогнозировании учитывается как линейно изменяющаяся с расстоянием, что не соответствует действительности. Поэтому кроме средних оценок погрешностей прогнозирования, следует провести более подробные статистические исследования, для определения степени адекватности разработанной методики.

Кроме того, как видно из рис. 4, амплитуды поля земной волны и ионосферной волны сравнимы на расстояниях приблизительно до 1000 км. Далее земная волна быстро затухает и уже не может оказать существенного влияния на результирующее поле. Следовательно, требуется детально оценить погрешности прогнозирования с учетом расстояния до точки приема, что обусловлено не только различными коэффициентами затухания земной и ионосферных волн, но и статистическими различиями в погрешностях прогнозов в зависимости от длины радиотрассы, продемонстрированными в статье [10].

Статистическое исследование результатов и оценка адекватности методики

Одной из первичных проверок, позволяющих судить об адекватности разработанной методики прогнозирования, является исследование погрешностей прогнозирования на нормальность распределения. Гистограммы погрешностей для разработанной методики и для методики [10] показаны на рис. 5.

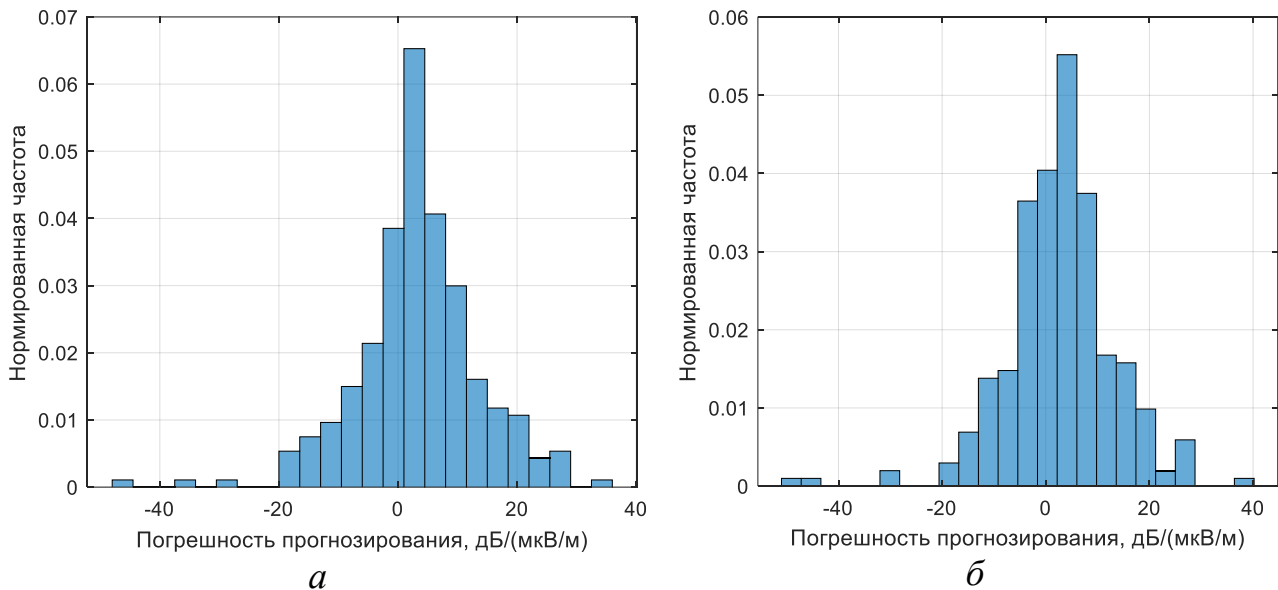


Рис. 5. Гистограммы распределений погрешностей прогнозирования:
а – земная волна + ионосферная волна;
б – ионосферная волна

Как и в случае распределения погрешностей при прогнозировании энергетических параметров радиотрассы ионосферной волной [10], при учете ионосферной и земной волн гистограмма погрешностей прогнозирования имеет вид, схожий с нормальным распределением, при этом гипотеза о нормальном распределении при тестировании по критерию Эппса-Палли отвергается на уровне значимости 5% [32].

Вероятностный график, показанный на рис. 6, демонстрирует что выборка согласуется с нормальным законом распределения только в области медианы, а в области хвостов наблюдается сильное расхождение между выборкой и теоретическим законом. Поэтому предположительно выборка соответствует закону распределения, близкому к нормальному, но с более тяжелыми хвостами. Подбор методом поиска максимального правдоподобия и тестирование по критерию Пирсона показывают, что данные соответствуют масштабнo-сдвиговому t -распределению с параметрами $\mu=2,92$, $\sigma=7,65$ и $\nu=4$ на уровне значимости 5%.

Несоответствие погрешностей прогнозирования нормальному закону распределения может свидетельствовать о наличии системных ошибок в методике прогнозирования, поэтому требуется дополнительное исследование для подтверждения адекватности рассматриваемой методики. Прежде всего, проведем анализ зависимости погрешности прогнозирования от длины радиотрассы, причем выполним его для двух методик – одна из которых учитывает только ионосферную волну [10], а вторая – ионосферную и земную волны. Графики статистических показателей приведены на рис. 7.

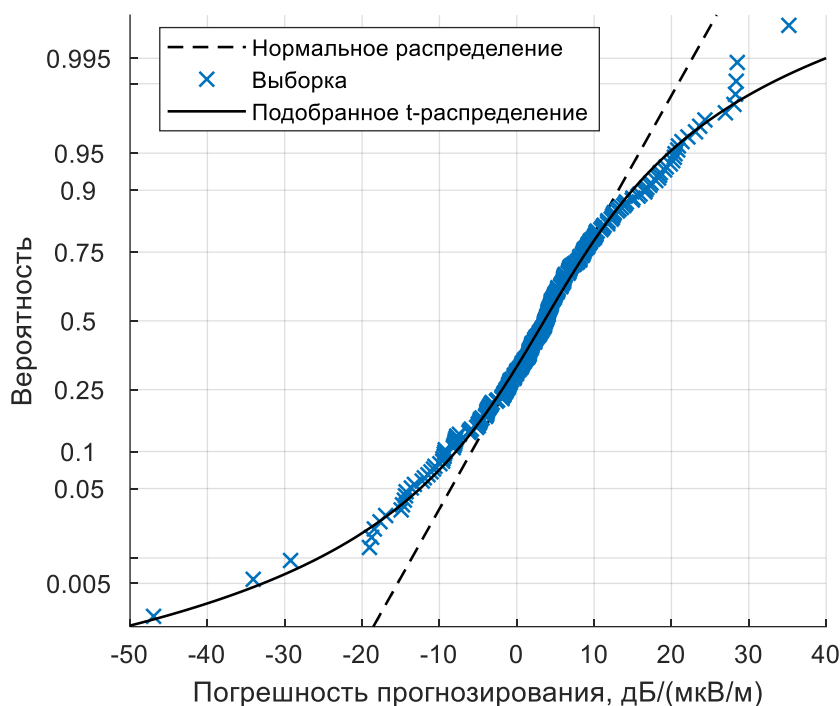


Рис. 6. Вероятностный график погрешностей прогнозирования

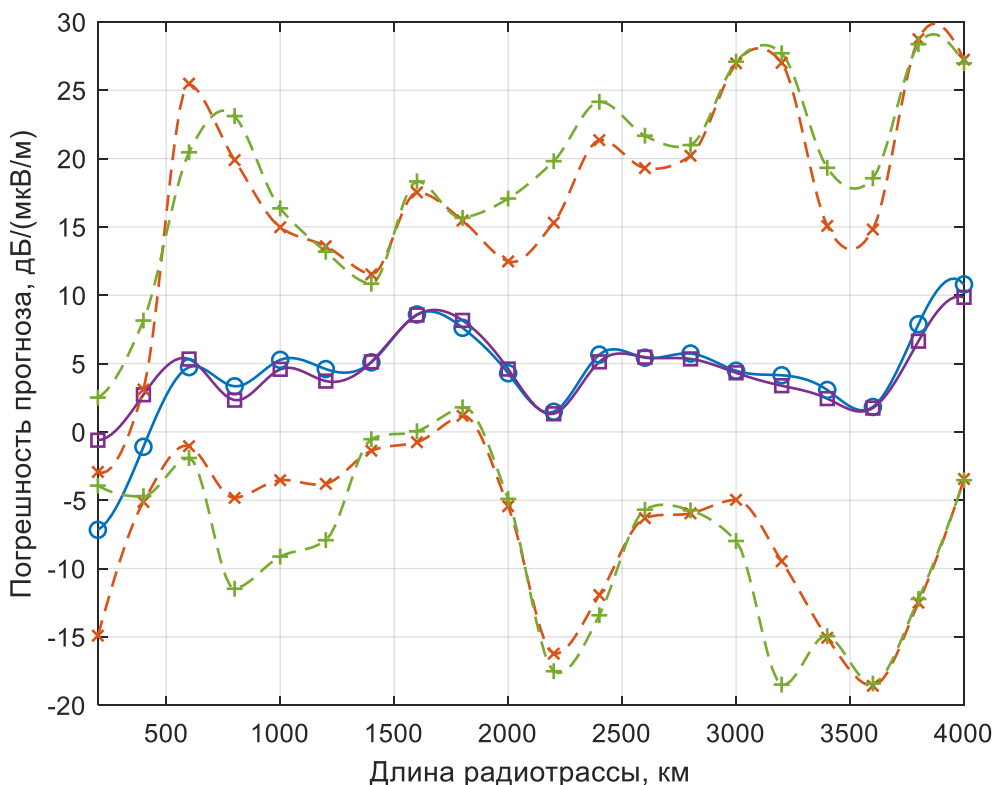


Рис. 7. Зависимость статистических показателей от длины трассы: синяя сплошная линия с круглыми маркерами – средняя погрешность прогнозирования (ионосферная волна), фиолетовая сплошная линия с квадратными маркерами – средняя погрешность прогнозирования (сумма ионосферной и земной волн), красная штриховая линия с крестообразными маркерами – 90% доверительная полоса (ионосферная волна), зеленая штриховая линия с крестообразными маркерами – 90% доверительная полоса (сумма ионосферной и земной волн)

Из рис. 7 видно, что погрешности прогнозирования зависят от длины радиотрассы, причем существенное расхождение прогнозов наблюдается на расстояниях приблизительно до 500 км. Для количественной статистической оценки погрешности прогнозирования должны быть дифференцированы по расстоянию, так что для каждой дальности должны быть получены две отдельные субвыборки, одна из которых соответствует прогнозированию ионосферной волной, а вторая – суммой ионосферной и земной волн. В том случае, когда земная волна оказывает существенное влияние на прогнозирование, парные субвыборки могут иметь разные законы распределения, что проверяется по критерию Колмогорова-Смирнова [33, 34]. Если же законы распределения совпадают, то значимое различие медиан и, следовательно, средних при одинаковых законах распределения, проверяется по двустороннему ранговому критерию Вилкоксона, который эквивалентен U -критерию Манна-Уитни [35].

Указанная процедура тестирования показала, что все субвыборки попарно имеют одинаковые законы распределения, за исключением субвыборок для расстояния 200 км, из оставшихся субвыборок значимые различия медиан имеют только субвыборки для расстояния 400 км. С помощью линейной интерполяции получим, что расстояние, равное 500 км, является предельной дистанцией, на которой земная волна в диапазоне ОНЧ существенно влияет на результаты прогнозирования напряженности электрического поля. При этом в диапазоне расстояний до 500 км абсолютное значение средней погрешности прогнозирования с учетом земной волны уменьшилось приблизительно на 3 дБ, а в диапазоне расстояний свыше 500 км – увеличилось на 1 дБ.

Графики зависимости погрешностей прогнозирования, показанные на рис. 7, свидетельствует о том, что кроме усредненных оценок, найденных в соответствии с формулами (5)–(7) и дающих представление о точности метода в целом, требуется использовать комплексные оценки, учитывающие изменчивость статистических показателей. Комплексное оценивание адекватности расчетного метода кроме средних погрешностей измерений включает формализованные показатели качества прогнозирования, к которым относится $MASE$ [36], определяемый по формуле (8). Близкое к нулю значение $MASE$ (см. таблицу 1) говорит о хорошей сходимости результатов расчетов и результатов измерений. В работе [37] рекомендуется использовать показатели точности и качества Зейла, которые рассчитываются по формулам:

$$U_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2}}; \quad (9)$$

$$U_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}}. \quad (10)$$

Значения величины U_1 варьируются в пределах от 0 до 1, чем значение меньше, тем лучше точность прогноза. Величина U_2 может принимать значения от 0 до $+\infty$, чем ближе к нулю – тем лучше. Если $U_2 \geq 1$, то качество прогнозирования сопоставимо со случайным выбором прогнозируемых значений.

В работах [38, 39] предлагается использовать комплексный показатель Рассела, который вычисляется в соответствии с выражениями:

$$M_R = \text{sign}(\lambda_{xx} - \lambda_{yy}) \log \left(1 + \left| \frac{\lambda_{xx} - \lambda_{yy}}{\sqrt{\lambda_{xx} \lambda_{yy}}} \right| \right); \quad (11)$$

$$P_R = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{\lambda_{xy}}{\sqrt{\lambda_{xx} \lambda_{yy}}}; \quad (12)$$

$$C_R = \sqrt{M_R^2 + P_R^2}, \quad (13)$$

где

$$\lambda_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2; \quad \lambda_{yy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2; \quad \lambda_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i.$$

В соответствии с исследованием [40] значения показателя меньше 0,2 подтверждают адекватность исследуемой модели. Значения от 0,2 до 0,3 свидетельствуют об удовлетворительной сходимости результатов. Результаты расчетов показателей сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Показатели адекватности

Показатель	U_1	U_2	C_R
Ионосферная волна	0,13	0,26	0,08
Ионосферная волна + земная волна	0,12	0,25	0,09

Выводы

Разработана комплексная методика расчета напряженности электрического поля диапазона очень низких частот на основе скачкового метода, учитывающая пространственную и земную волны. Комплексная методика включает в себя совокупность частных методик по расчету напряженности поля ионосферной волны, автоматическому профилированию электрических характеристик подстилающей поверхности и расчету напряженности поля земной волны на неоднородной трассе.

Комплексное оценивание с помощью средней абсолютной нормированной погрешности, показателей точности и качества Зейла и комплексного показателя Рассела показывает хорошую сходимость прогнозируемых и измеренных значений. Таким образом, совокупность полученных оценок позволяет утверждать, что разработанная методика является адекватной и может быть применена для прогнозирования энергетических параметров радиотрасс.

Сравнение расчетов напряженности поля с результатами измерений показала, что точность результатов расчетов, полученных с учетом земной волны, по сравнению с прогнозами, не учитывающими земную волну, ухудшилась в среднем на 1 дБ, т.е. разработанная методика незначительно уступает в точности, методике, не учитывающей земную волну. Несущественное изменение погрешности прогноза позволяет утверждать, что в целом земная волна не оказывает заметного влияния на качество прогнозирования энергетических параметров радиотрасс в диапазоне ОНЧ. Более детальный статистический анализ показал, что земную волну необходимо учитывать только на расстояниях до 500 км. На расстояниях свыше 500 км влиянием земной волны можно пренебречь.

Следует отметить, что в разработанной методике в соответствии с рекомендацией [11] фаза земной волны изменяется линейно, что не отражает реальный характер изменения фазы радиоволны над земной поверхностью с неоднородными параметрами, поэтому вклад земной волны в суммарное поле в точке приема имеет оценочный характер и нуждается в дальнейшем уточнении.

Литература

1. Автоматизация управления и связь в ВМФ / под ред. Кононова Ю. М. Изд. 2-е. СПб.: Элмор, 2001. 512 с.
2. Информационные технологии в системе управления силами ВМФ (теория и практика, состояние и перспективы развития) / под ред. Авдошина В. В. СПб.: Элмор, 2005. 832 с.
3. Соколов В. Н. Закономерности и принципы оперативного применения формирований войск и сил на приморских оперативных направлениях Российской Федерации // Военная мысль. 2022. № 5. С. 32–45.
4. Pal S., Basak T., Chakrabarti S. K. Results of Computing Amplitude and Phase of the VLF Wave Using Wave Hop Theory // Advances in Geosciences. 2011. Vol. 27. P. 1–11. doi: 10.1142/9789814355414_0001
5. Lynn K. VLF Waveguide Propagation: The Basics // Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations. Kolkata, American Institute of Physics. 2010. P. 3–44. doi: 10.1063/1.3512893.
6. Типикин А. А. Учет параметров подстилающей поверхности при прогнозировании распространения радиоволн ОНЧ диапазона с помощью скачковых методов // Восточно-европейский научный журнал. 2023. Т. 1. № 4 (89). С. 31–40. doi: 10.31618/ESSA.2782-1994.2023.1.89.356.
7. Marshall R. A., Wallace T., Turbe M. Finite-Difference Modeling of Very-Low-Frequency Propagation in the Earth-Ionosphere Waveguide // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65. № 12. P. 7185–7197. doi: 10.1109/TAP.2017.2758392.
8. Elsherbeni A. Z., Demir V. The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB Simulations. Edison, 2015. 558 p.

9. Gasdia F., Marshall R. A. A New Longwave Mode Propagator for the Earth-Ionosphere Waveguide // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2021. Vol. 69. № 12. P. 8675–8688. doi: 10.1109/TAP.2021.3083753.

10. Типикин А. А. Методика расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне очень низких частот на основе скачкового метода // *Информационно-управляющие системы*. 2023. № 5. С. 12–21. doi: 10.31799/1684-8853-2023-5-12-21. EDN: FTXMCSY.

11. Рекомендация МСЭ-R P.684-7. Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц. Женева: МСЭ, 2016. 43 с.

12. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernandez-Pajares M., Krankowski A., Nava B., Bilitza D., Kotulak K., Flisek P., Li Z., Wang N., Dollase D. R., Garcia-Rigo A., Batista I. Global monitoring of ionospheric weather by GIRO and GNSS data fusion // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. № 3. doi: 10.3390/atmos13030371.

13. Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., Hernandez-Pajares M., Reinisch B., Li Z., Kotulak K., Zakharenkova I., Cherniak Iu., Dollase D. R., Wang N., Flisek P., Garcia-Rigo A. Towards Cooperative Global Mapping of the Ionosphere: Fusion Feasibility for IGS and IRI with Global Climate VTEC Maps // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. № 21. doi: 10.3390/rs12213531.

14. Bilitza D. IRI the International Standard for the Ionosphere // *Advances in Radio Science*. 2018. № 16. P. 1–11. doi: 10.5194/ars-16-1-2018.

15. Типикин А. А. Методика формирования глобальных цифровых карт электрических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне очень низких частот // *Информатика, телекоммуникации и управление*. 2022. Т. 15. № 1. С. 7–18. doi: 10.18721/JCSTCS.15101.

16. Типикин А. А., Потапов Д. С. Методика оценки электрических характеристик почвы на трассе распространения земных радиоволн // *Техника радиосвязи*. 2022. № 1(52). С. 19–29. doi: 10.33286/2075-8693-2022-52-19-29.

17. Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля–ионосфера и в ионосфере. М.: Наука, 1994. 152 с.

18. Типикин А. А., Пыков Е. В. Методика определения траекторных параметров радиотрассы ОНЧ диапазона на основе уточненной модели высоты точки отражения // *Сборник научных трудов ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»*. 2022. С. 73–81.

19. Типикин А. А., Потапов Д. С. Методика учета влияния параметров сферической подстилающей поверхности с конечной проводимостью на характеристики антенн ОНЧ-диапазона // *Труды учебных заведений связи*. 2023. Т. 9. № 3. С. 60–66. doi: 10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66.

20. Типикин А. А., Пыков Е. В., Розанов А. А. Модифицированная методика расчета дифференциальных временных задержек лучей в лучевой модели распространения радиоволн ОНЧ диапазона // *Сборник трудов НТК НИИ ОСИС ВМФ «Интеллектуальные разработки в интересах строительства и развития Военно-морского флота»*. 2022. С. 47–56.

21. Rotheram A. S. Ground-Wave Propagation // *Marconi Review*. 1982. Vol. 45(1). P. 18–48.

22. Coleman C. *Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation*. Cambridge, 2017. 296 p.

23. Типикин А. А., Пахотин В. А., Потапов Д. С. Методика автоматического профилирования электрических характеристик подстилающей поверхности на трассе распространения радиоволн диапазона очень низких частот // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 3. С. 66–73. doi: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-66-73. EDN: MHACGD.

24. Millington G. Ground-Wave Propagation over an Inhomogeneous Smooth Earth // Proceedings of the Institute of Radio Engineers. 1949. № 96. P. 1–53.

25. Типикин А. А. Обобщённая методика расчёта напряжённости поля земной волны для трассы диапазона очень низких частот с произвольным количеством однородных участков // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 87. С. 21–28. doi: 10.21667/1995-4565-2024-87-21-28.

26. Comparison of Predicted VLF/LF Signal Levels with Propagation Data. 960-TR-74-5. Washington: Defense Communications Agency. 1974. 75 p.

27. Гнатюк В. И. Закон оптимального построения техноценозов: Монография. Калининград: Издательство КИЦ «Техноценоз», 2019. 940 с.

28. Дорофеев С. А., Кивчун О. Р., Прохода А. Н. Оценка реализации потенциала энергосбережения при эксплуатации объектов военной инфраструктуры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 1. С. 267–274.

29. Hora J., Campos P. A Review of Performance Criteria to Validate Simulation Models // Expert Systems. 2015. Vol. 32. № 5. P. 598–595. doi: 10.1111/exsy.12111.

30. Кузьмин И. И. Работа с данными в статистических исследованиях // Восточно-европейский научный журнал. 2021. № 7-1(71). С. 36–39. doi: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.71.82.

31. Кувайкова Ю. Е. Применение ансамблевых методов машинного обучения для прогнозирования технического состояния объекта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021. Т. 23. № 1. С. 111–114. doi: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-111-114.

32. Типикин А. А., Прусаков А. А., Тимошенко Н. А. Программная реализация критерия Эппса-Палли в среде моделирования Matlab // Открытое образование. 2024. Т. 28. № 2. С. 59–72. doi: 10.21686/1818-4243-2024-2-59-72.

33. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

34. Бессонов А. А. Искусственный интеллект и математическая статистика в криминалистическом изучении преступлений. Монография. М.: Проспект, 2021. 816 с.

35. Gibbons J. D., Chakraborti S. Nonparametric Statistical Inference. 5th ed. Boca Raton, 2011, 650 p. doi: 10.1201/9781439896129.

36. Hyndman R. J., Koehler A. B. Another Look at Measures of Forecast Accuracy // International Journal of Forecasting. 2006. № 22. P. 679–688. doi: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

37. Bliemel F. Theil's Forecast Accuracy Coefficient: A Clarification // Journal of Marketing Research. 1973. № 10. P. 444–446. doi: 10.1177/002224377301000413.

38. Sarin H., Kokkolaras M., Hulbert G., Papalambros P., Barbat S., Yang R.-J. A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Models with Emphasis on Vehicle Safety Applications. Proceedings of DETC'08, ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. New York, 2008. P. 1275–1286 doi: 10.1115/DETC2008-49669.

39. Sarin H., Kokkolaras M., Hulbert G., Papalambros P., Barbat S., Yang R. J. Comparing Time Histories for Validation of Simulation Models: Error Measures and Metrics // Journal of Dynamic Systems Measurement and Control – Transactions of the ASME. 2010. № 132:061401 (10). doi: 10.1115/1.4002478

40. Schwer L. E. Validation Metrics for Response Histories: Perspectives and Case Studies // Engineering with Computers. 2007. № 23. P. 295–309. doi: 10.1007/s00366-007-0070-1.

References

1. *Avtomatizatsiia upravleniia i sviaz' v VMF* [Automation of the Control and Telecommunications in the Navy] / Editor Kononov Yu. M., 2nd ed. Saint-Petersburg, 2001. 512 p. (in Russian).

2. *Informatsionnye tekhnologii v sisteme upravleniia silami VMF (teoriia i praktika, sostoianie i perspektivy razvitiia)* [Information Technologies for the Naval Forces Command and Control (Theory and Practice, State and Development Prospects)]. Editor Avdoshin V. V. Saint-Petersburg, 2005. 832 p. (in Russian).

3. Sokolov V. N. Zakonomernosti i printsipy operativnogo primeneniia formirovaniia voisk i sil na primorskikh operativnykh napravleniakh Rossiiskoi Federatsii [Laws and Principles of the Military Forces Operational Usage on the Seaside Operational Directions of the Russian Federation]. *Military Thought*, 2022, no. 5, pp. 32–45 (in Russian).

4. Pal S., Basak T., Chakrabarti S. K. Results of Computing Amplitude and Phase of the VLF Wave Using Wave Hop Theory. *Advances in Geosciences*, 2011, vol. 27, pp. 1–11. doi: 10.1142/9789814355414_0001

5. Lynn K. VLF Waveguide Propagation: The Basics. *Proceedings of the 1st International Conference on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations*. Kolkata, 2010, pp. 3–44. doi: 10.1063/1.3512893.

6. Tipikin A. A. Uchet parametrov podstilajushhej poverhnosti pri prognozirovaniia rasprostraneniia radiovoln ONCh diapazona s pomoshh'ju skachkovykh metodov [Accounting for Underlying Surface Parameters in Predictive Wavehop Methods of the VLF Radio Waves Propagation]. *East European Scientific Journal*, 2023, vol. 1, no. 4 (89), pp. 31–40 (in Russian). doi: 10.31618/ESSA.2782-1994.2023.1.89.356.

7. Marshall R. A., Wallace T., Turbe M. Finite-Difference Modeling of Very-Low-Frequency Propagation in the Earth-Ionosphere Waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 65, no. 12, pp. 7185–7197. doi: 10.1109/TAP.2017.2758392.

8. Elsherbeni A. Z., Demir V. *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB Simulations*. Edison, 2015. 558 p.

9. Gasdia F., Marshall R. A. A New Longwave Mode Propagator for the Earth-Ionosphere Waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 8675–8688. doi: 10.1109/TAP.2021.3083753.

10. Tipikin A. A. Metodika rascheta napriazhennosti polia ionosfernoi volny v diapazone ochen' nizkikh chastot na osnove skachkovogo metoda [The Technique of Calculating the Field Strength of the Ionospheric Wave in the Very Low Frequency Band Based on the Wavehop Method]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 5, pp. 12–21 (in Russian). doi: 10.31799/1684-8853-2023-5-12-21.

11. ITU-R Recommendation P.684-7. *Prediction of Field Strength at Frequencies Below about 150 kHz*. Geneva, ITU, 2016. 43 p.

12. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernandez-Pajares M., Krankowski A., Nava B., Bilitza D., Kotulak K., Flisek P., Li Z., Wang N., Dollase D. R., Garcia-Rigo A., Batista I. Global Monitoring of Ionospheric Weather by GIRO and GNSS Data Fusion. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 3. doi: 10.3390/atmos13030371.

13. Fron A., Galkin I., Krankowski A., Bilitza D., Hernandez-Pajares M., Reinisch B., Li Z., Kotulak K., Zakharenkova I., Cherniak Iu., Dollase D. R., Wang N., Flisek P., Garcia-Rigo A. Towards Cooperative Global Mapping of the Ionosphere: Fusion Feasibility for IGS and IRI with Global Climate VTEC Maps. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 21. doi: 10.3390/rs12213531.

14. Bilitza D. IRI the International Standard for the Ionosphere. *Advances in Radio Science*, 2018, no. 16, pp. 1–11. doi: 10.5194/ars-16-1-2018.

15. Tipikin A. A. Metodika formirovaniia global'nykh tsifrovyykh kart elektricheskikh kharakteristik podstilaiushchei poverkhnosti v diapazone ochen' nizkikh chastot [Method of Obtaining Global Digital Maps of Underlying Surface Electric Characteristics in the Very Low Frequency Band]. *Computing, Telecommunication and Control*, 2022, vol. 15, no. 1, pp. 7–18 (in Russian). doi: 10.18721/JCSTCS.15101.

16. Tipikin A. A., Potapov D. S. Metodika otsenki elektricheskikh kharakteristik pochvy na trasse rasprostraneniia zemnykh radiovoln [Evaluation of the Electrical Characteristics of the Soil on the Path of Propagation of Surface Radio Waves]. *Radio Communication Technology*, 2022, no. 1(52), pp. 19–29 (in Russian). doi: 10.33286/2075-8693-2022-52-19-29.

17. Makarov G. I., Novikov V. V., Rybachek S. T. *Rasprostranenie radiovoln v volnovodnom kanale Zemlia–ionosfera i v ionosfere* [Propagation of Radio Waves in the Earth-Ionosphere Waveguide Channel and in the Ionosphere]. Moscow, 1994, 152 p. (in Russian).

18. Tipikin A. A., Bykov E. V. Metodika opredeleniia traektornykh parametrov radiotrassy ONCh diapazona na osnove utochnennoi modeli vysoty toчки otrazheniia [Method of Obtaining Ray Trajectory Parameters of the Very Low Frequency Radiopath on Basis of the Refined Model of the Height of the Reflection Point]. *Sbornik nauchnykh trudov VUNTS VMF «Voenno-morskaia akademiia»* [Proceedings of the Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy»], 2022, pp. 73–81 (in Russian).

19. Tipikin A. A., Potapov D. S. Metodika ucheta vliianiia parametrov sfericheskoi podstilaiushchei poverkhnosti s konechnoi provodimost'iu na kharakteristiki antenn ONCh-diapazona [Methodology for Accounting the Influence

of Parameters of a Spherical Underlying Surface with Finite Conductivity on VLF Antennas Characteristics]. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2023, vol. 9, no. 3, pp. 60–66 (in Russian). doi:10.31854/1813-324X-2023-9-3-60-66.

20. Tipikin A. A., Bykov E. V., Rozanov A. A. Modifitsirovannaia metodika rascheta differentsial'nykh vremennykh zaderzhek luchej v luchevoi modeli rasprostraneniia radiovoln ONCh diapazona [A Modified Method for Calculating the Differential Time Delays of Rays in the Wavehop Model of Radio Waves Propagation in the VLF band]. *Sbornik trudov NTK NII OSIS VMF «Intellectual'nye razrabotki v interesakh stroitel'stva i razvitiia VoЕННО-morskogo flota»* [Proceedings of the Scientific and Technical Conference of the Research Institute for Operational and Strategic Research of the Navy Development «Intellectual Investigations in the Interests of the Development and Improvement of the Navy»], Saint-Petersburg, 2022, pp. 47–56 (in Russian).

21. Rotheram A. S. Ground-Wave Propagation. *Marconi Review*, 1982, no. 45 (1), pp. 18–48.

22. Coleman C. *Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation*. Cambridge, 2017, 296 p.

23. Tipikin A. A., Pakhotin V. A., Potapov D. S. Metodika avtomaticheskogo profilirovaniia elektricheskikh harakteristik podstilayushchej poverhnosti na trasse rasprostraneniia radiovoln diapazona ochen' nizkikh chastot [Technique for Automatic Profiling of Underlying Surface Electric Parameters on the Very Low Frequencies Radio Path]. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2024, vol. 10, no. 3, pp. 66–73 (in Russian). doi: 10.31854/1813-324X-2024-10-3-66-73.

24. Millington G. Ground-Wave Propagation over an Inhomogeneous Smooth Earth. *Institute of Radio Engineers*, 1949, no. 96, pp. 1–53.

25. Tipikin A. A. Obobshchennaia metodika rascheta napriazhennosti polia zemnoi volny dlia trassy diapazona ochen' nizkikh chastot s proizvol'nym kolichestvom odnorodnykh uchastkov [Generalized Method to Calculate Field Strength of Ground Wave in Very Low Frequency Band for a Path with Arbitrary Number of Homogeneous Segments]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2024, no. 87, pp. 21–28 (in Russian). doi: 10.21667/1995-4565-2024-87-21-28.

26. *Comparison of Predicted VLF/LF Signal Levels with Propagation Data. 960-TP-74-5*. Washington, Defense Communications Agency, 1974, 75 p.

27. Gnatyuk V. I. *Zakon optimal'nogo postroeniia tekhnotsenozov: Monografiia* [The Law of Optimal Construction of Technocenosis]. Kaliningrad, 2019, 940 p. (in Russian).

28. Dorofeev S. A., Kivchun O. R., Prokhoda A. N. Otsenka realizatsii potentsiala energosberezheniia pri ekspluatatsii ob'ektov voennoi infrastruktury [Evaluation of the Energy Saving Potential Implementation in the Operation of Military Infrastructure Facilities]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Proceedings of the Tula State University. Technical sciences], 2018, no. 1, pp. 267–274 (in Russian).

29. Hora J., Campos P. A Review of Performance Criteria to Validate Simulation Models. *Expert Systems*, 2015, vol. 32, no. 5, pp. 598–595. doi: 10.1111/exsy.12111.

30. Kuzmin I. I. Rabota s dannymi v statisticheskikh issledovaniiah [Working with Data in Statistical Research]. *East European Scientific Journal*, 2021, no. 7-1 (71), pp. 36–39 (in Russian). doi: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.1.71.82.

31. Kuvaykova Yu. E. Primenenie ansamblevykh metodov mashinnogo obucheniia dlia prognozirovaniia tekhnicheskogo sostoianiia ob"ekta [Application of Ensemble Machine Learning Methods for Predicting the Technical State of an Object]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2021, vol. 23, no. 1, pp. 111–114 (in Russian). doi: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-111-114.

32. Tipikin A. A., Prusakov A. A., Timoshenko N. A. Programmnaia realizatsiia kriteriia Eppsa-Palli v srede modelirovaniia Matlab [Software Implementation of the Epps-Pulley Criterion in Matlab Modeling Environment]. *Open Education*, 2024, vol. 28, no. 2, pp. 59–72 (in Russian). doi: 10.21686/1818-4243-2024-2-59-72.

33. Kobzar' A. I. *Prikladnaia matematicheskaia statistika. Dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied Mathematical Statistics. For Engineers and Researchers]. Moscow, 2006, 816 p. (in Russian).

34. Bessonov A. A. *Iskusstvennyi intellekt i matematicheskaia statistika v kriminalisticheskoi izuchenii prestuplenii. Monografiia* [Artificial Intelligence and Mathematical Statistics for The Crime Analysis]. Moscow, 2021. 816 p. (in Russian).

35. Gibbons J. D., Chakraborti S. *Nonparametric Statistical Inference*, 5th ed. Boca Raton, 2011, 650 p. doi: 10.1201/9781439896129.

36. Hyndman R. J., Koehler A. B. Another Look at Measures of Forecast Accuracy. *International Journal of Forecasting*, 2006, no. 22, pp. 679–688. doi: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

37. Bliemel F. Theil's Forecast Accuracy Coefficient: A Clarification. *Journal of Marketing Research*, 1973, no. 10, pp. 444–446. doi: 10.1177/002224377301000413.

38. Sarin H., Kokkolaras M., Hulbert G., Papalambros P., Barbat S., Yang R.-J. A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Models with Emphasis on Vehicle Safety Applications. *Proceedings of DETC'08, ASME 2008 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, New York, 2008. doi: 10.1115/DETC2008-49669.

39. Sarin H., Kokkolaras M., Hulbert G., Papalambros P., Barbat S., Yang R. J. Comparing Time Histories for Validation of Simulation Models: Error Measures and Metrics. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control – Transactions of the ASME*, 2010, no. 132, pp. 061401 (10). doi: 10.1115/1.4002478.

40. Schwer L. E. Validation Metrics for Response Histories: Perspectives and Case Studies. *Engineering with Computers*, 2007, no. 23, pp. 295–309. doi: 10.1007/s00366-007-0070-1.

Статья поступила 13 июля 2024 г.

Информация об авторах

Типикин Алексей Алексеевич – кандидат технических наук. Начальник отдела. Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований строительства Военно-морского флота Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия». Область научных интересов: системы связи, распространение радиоволн, антенно-фидерные устройства. E-mail: alextip@mail.ru

Пахотин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор. Ведущий научный сотрудник. Научно-исследовательский институт оперативно-стратегических исследований строительства Военно-морского флота Военного учебно-научного центра Военно-морского флота «Военно-морская академия». Область научных интересов: системы связи, антенно-фидерные устройства, радиофизика, физика полимеров. E-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru
Адрес: 198514, г. Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Разводная, д. 17.

The technique of calculating the total field of spatial and ground waves in the very low frequency band

A. A. Tipikin, V. A. Pakhotin

Purpose. There is a well-known technique for estimating the energy parameters of radio paths in the very low frequency band based on the wavehop method. This technique developed in the interests of automating the input of initial data, including information about the underlying surface electrical parameters, state of the ionosphere and geomagnetic field of the Earth. But it does not take into account the ground wave field during the calculation of the electric field strength at the radio path. Another disadvantage is that the boundaries within which the influence of the ground wave on the total field should be taken into account when using the wavehop method are not clear. The purpose of the present paper is to develop technique for estimating the energy parameters of the radio path in the very low frequency band, taking into account the influence of the ground wave and assessing the domain boundaries with the significant influence of the earth wave on the total field strength. **Methods.** The problem solution based on the wavehop method that takes into account the geometric-optical and quasi-geometric-optical propagation mechanisms for a spatial wave and the diffraction propagation mechanism for a ground wave. **Novelty.** Elements of novelty in presented technique are the ground wave field calculating with automatic profiling of the underlying surface electrical parameters based on global digital maps and using of the generalized method for calculating of the ground wave field strength with an arbitrary number of homogeneous sections on the radio path. **Results.** Accuracy of the forecasting methodology increased within the domain where the ground wave has a significant effect on the total field. In this domain the average total forecasting error decreased by 3 dB due to accounting the ground wave field in the calculation process of radio path energy parameters. Automatic profiling of the underlying surface electrical parameters based on global digital maps provided accounting for an arbitrary number of homogeneous sections on the radio path. Comparing the forecasting results with measurements of field strength on real radio paths, followed by statistical analysis of forecasting errors based on the Theil's and Russell's metrics, confirmed the adequacy of the developed technique. Statistically significant differences in forecasting errors allowed to obtain the domain boundary of the necessary accounting of the ground wave effect on the total field. **Practical relevance.** Automation of input geophysical data initialization makes it possible to reduce the time required for calculation tasks and decrease the operator workload during the evaluation of special-purpose communication systems capabilities to provide forces with communications in specified operation areas. The developed forecasting technique will increase the validity of proposals on communication scenarios during the officials proposals development on special-purpose communication systems application.

Ключевые слова: very low frequencies, forecasting, energy parameters, spatial wave, ground wave, adequacy, geophysical data.

Information about Authors

Aleksey Alekseevich Tipikin – Ph.D. of Engineering Sciences. Chief of Department. Research Institute for Operational and Strategic Research of the Navy Development of the Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy». Field of research: communication systems; radio wave propagation; antennas. E-mail: alextip@mail.ru

Vladimir Aleksandrovich Pakhotin – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Leading Researcher. Research Institute for Operational and Strategic Research of the Navy Development of the Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy». Field of research: communication systems; antennas; radio physics; polymer physics. E-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru

Address: Russia, 198514, Saint-Petersburg, Peterhof, Razvodnaya st. 17.