



Методика расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне очень низких частот на основе скачкового метода

А. А. Типикин^а, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела, orcid.org/0000-0002-0940-4285, alextip@mail.ru

^аВоенный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова», Ушаковская наб., 17/1, Санкт-Петербург, 197045, РФ

Введение: прогнозирование энергетических параметров радиотрасс является неотъемлемой частью планирования работы радиосетей диапазона очень низких частот. На прогнозируемые значения напряженности электрического поля влияет большое количество факторов, в том числе состояние ионосферы и электрические характеристики подстилающей поверхности, которые учитываются с помощью отдельных компонентов множителей ослабления. Частные методики, предназначенные для расчета указанных компонентов, нуждаются в обобщении и внедрении в методику расчета энергетических параметров радиотрасс. **Цель:** разработать скачковую методику расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне очень низких частот с возможностью вводить исходные данные из стандартной модели ионосферы и глобальных карт электрических характеристик подстилающей поверхности. **Результаты:** обобщены исследования, реализованные в нескольких частных методиках, касающихся расчета высоты точки отражения электромагнитной волны от ионосферы; расчета дифференциальных временных задержек лучей исходя из условия равных углов места; вычисления коэффициентов отражения от поверхности Земли и корректирующих антенных коэффициентов. Разработана методика расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне очень низких частот, базирующаяся на скачковом методе. В разработанную методику внедрены частные методики для учета характеристик ионосферы с помощью стандартной модели ионосферы и характеристик подстилающей поверхности с помощью соответствующих цифровых карт. Методика реализована в виде совокупности взаимосвязанных скриптов и функций в вычислительной среде MatLab. Проведена серия расчетов напряженности электрического поля ионосферной волны для различных радиотрасс. Путем сравнения с результатами реальных измерений получены погрешности прогнозирования. Выполнены статистические исследования погрешностей, подтверждена адекватность разработанной методики. **Практическая значимость:** предложены инструменты для использования современных достижений в области моделирования состояния ионосферы и цифрового картографирования электрических характеристик подстилающей поверхности. Реализация методики на базе вычислительной среды MatLab позволила снизить участие оператора на этапе ввода исходных данных. Созданы возможности для разработки автономного программного обеспечения по прогнозированию напряженности поля электромагнитной волны в диапазоне очень низких частот.

Ключевые слова — диапазон очень низких частот, планирование связи, прогнозирование энергетических параметров, адекватность прогнозирования, точность прогнозирования, статистический анализ.

Для цитирования: 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: FTXMCY

For citation: Tipikin A. A. 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, EDN: FTXMCY

Введение

Важность вопроса прогнозирования энергетических параметров радиотрасс не раз подчеркивалась в различных научных работах [1, 2]. Особую значимость планирование радиосвязи приобретает в системах специального назначения, где одной из основных задач является обеспечение достоверной и своевременной связи, в том числе с учетом влияния преднамеренных помех [3, 4]. Планирование связи проводится на базе прогнозов, рассчитываемых с помощью разнообразных методик. Естественно, что проведение подобных расчетов должно не только давать приемлемые по точности оценки, но и

укладываться в установленные сроки, обусловленные работой органов управления, осуществляющих как планирование связи, так и применение систем специального назначения в целом. Указанные требования могут быть выполнены только при наличии автоматизированных методик, минимизирующих участие оператора на всех этапах расчетов.

Диапазон очень низких частот (ОНЧ; Very Low Frequencies, VLF), условно занимающий часть радиочастотного спектра от 3 до 30 кГц, традиционно используется в системах сверхдлинноволновой навигации, для связи с погруженными объектами и для передачи сообщений в резервной подсистеме радиосвязи. Первичными оцен-

ками, на которых базируются дальнейшие расчеты показателей достоверности и своевременности связи, являются расчеты энергетических параметров радиотрасс. В диапазоне ОНЧ существует два принципиально различных метода получения таких оценок — скачковый и волновой.

Волновой метод считается математически наиболее сложным и заключается в решении волнового уравнения для сферического волновода, образованного поверхностью Земли и ионосферой. Однако при данном подходе возникают трудности учета непостоянных электрических характеристик стенок волновода, что имеет место в подавляющем большинстве практических случаев. В зависимости от характера изменения электрических характеристик используют приближение Вентцеля — Крамерса — Бриллюэна [5, 6] или метод преобразования мод [7]. Чаще всего структуру волновода в ходе вычислений приходится упрощать и заменять некоторыми усредненными или идеализированными моделями, что ведет к появлению погрешностей, несмотря на высокую точность самого метода.

В соответствии со скачковым методом амплитуда и фаза напряженности электромагнитного поля в какой-либо точке Земли представляется векторной суммой полей, создаваемых несколькими лучами, распространяющимися непосредственно от передатчика путем одного или нескольких скачков, и земной волны. Основная сложность скачкового метода заключается в определении множителя ослабления каждого из лучей, который складывается из таких компонентов, как потери на распространение, потери на отражения от ионосферы, потери на отражения от поверхности Земли, ионосферная фокусировка и потери вследствие расположения антенн на сферической поверхности с конечной проводимостью. Преимуществом скачкового метода является более простой учет неоднородностей ионосферы и земной поверхности.

Лучи, отражающиеся от ионосферы, образуют так называемую ионосферную волну, которая дает решающий вклад в суммарное электромагнитное поле на расстояниях более 500–1000 км. Таким образом, оценка напряженности поля ионосферной волны, с одной стороны, необходимый элемент оценки энергетических параметров радиотрассы, с другой стороны, достаточный на расстояниях, на которых вкладом земной волны можно пренебречь.

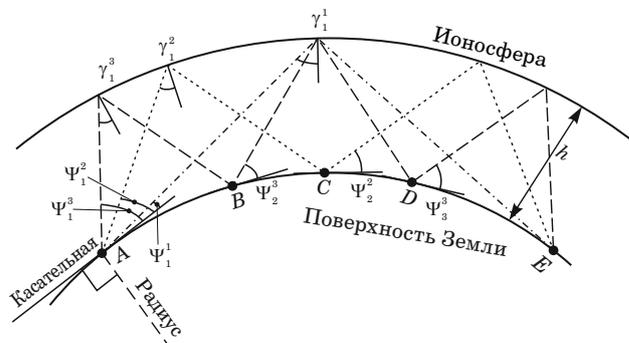
Довольно полно достижения по прогнозированию энергетических параметров радиолиний ОНЧ-диапазона изложены в работах [8–10]. Тем не менее в указанной области проведен ряд исследований, например, в трудах [11, 12] и др. разработаны частные методики,

позволяющие использовать в скачковом методе расчета напряженности электромагнитного поля диапазона ОНЧ стандартную модель ионосферы [13–15] и цифровые карты подстилающей поверхности [16] для минимизации участия оператора в процессе выбора параметров радиотрассы. Разработанные методики способствовали переходу от графоаналитических расчетов к автоматизированным вычислениям, где определение промежуточных характеристик, таких как коэффициенты отражения от ионосферы, коэффициенты отражения от поверхности Земли, поправочные антенные коэффициенты и др., происходит автоматически, а роль человека заключается в формулировании задачи путем ввода ограниченного перечня исходных данных. Цель данной статьи заключается в обобщении разработанных частных методик и создании комплексной методики расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне ОНЧ на основе скачкового метода, определении точности предлагаемой методики и подтверждении ее адекватности.

Методика расчета напряженности поля ионосферной волны

Геометрооптическое представление электромагнитной волны сводится к ее разложению на n лучей, каждый из которых осуществляет соответственно от одного до n скачков из точки передачи в точку приема. Схема такого разложения показана на рис. 1.

В рекомендации [17] исходным положением для определения траекторных характеристик лучей является условие равенства длин скачков, т. е., например, для двухскачкового луча выполняется условие равенства дуг $AC = CE$, а для трехскачкового луча — $AB = BD = DE$. При этом высота точек отражения на разных скач-



■ **Рис. 1.** Геометрооптическое представление ионосферной волны
 ■ **Fig. 1.** Geometrooptical representation of ionospheric wave

ках может отличаться. В частной методике [11] внесено уточнение, согласно которому исходным положением является равенство углов места $\Psi_1^n = \Psi_2^n = \dots = \Psi_n^n$, которое точнее описывает геометрооптическую модель, поскольку высоким точкам отражения соответствуют длинные скачки, и наоборот, низким точкам отражения – короткие скачки. Непосредственно высоты точек отражения определяются частной методикой [18] исходя из вертикального профиля электронной концентрации, полученного на базе стандартной модели ионосферы (International Reference Ionosphere).

Кривые коэффициентов отражения от ионосферы могут быть получены из рекомендации [17], где в качестве исходных данных выступают частота электромагнитной волны, индекс солнечной активности F10.7, угол отражения от ионосферы и косинус зенитного угла Солнца. Последние две величины вычисляются в ходе расчетов траекторных параметров радиотрассы [11]. В свою очередь кривые, приведенные в [17], являются интерполяцией решений дифференциального уравнения, связывающего высоту точки над земной поверхностью с матрицей ионосферного отражения.

Коэффициенты отражения от поверхности Земли для положительного угла места рассматриваются как функция частоты f , угла места Ψ , диэлектрической проницаемости ε и проводимости σ :

$$Rg(\Psi^n > 0) = \frac{n_c^2 \sin \Psi^n - \sqrt{n_c^2 - \cos^2 \Psi^n}}{n_c^2 \sin \Psi^n + \sqrt{n_c^2 - \cos^2 \Psi^n}}, \quad (1)$$

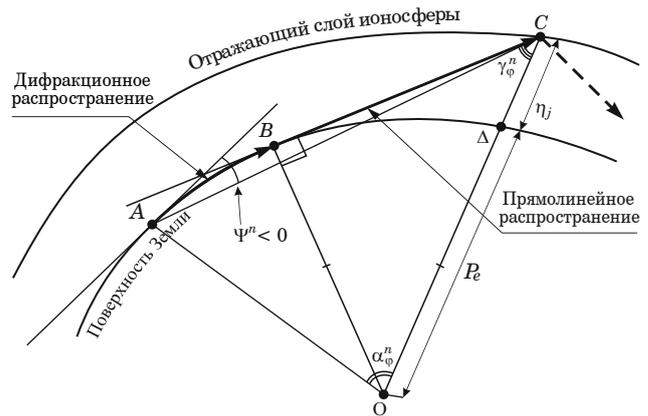
где

$$n_c^2 = \varepsilon - j \frac{18\sigma \cdot 10^6}{f}.$$

Область поверхности, участвующая в отражении электромагнитных волн, выделяется в соответствии с принципом Гюйгенса – Френеля. Конкретный порядок расчетов приведен в [19].

Для отрицательного угла места вводится квазигеометрооптическое представление электромагнитной волны. В этом случае рассматриваются два механизма распространения: «проскальзывание» и «полет». Механизм «проскальзывания» описан в [8] и проиллюстрирован на рис. 2, где дуга AB соответствует дифракционной части траектории, а отрезок BC – прямолинейной. На прямолинейном отрезке действует механизм «полета», описываемый геометрооптическим представлением.

На дифракционном участке коэффициенты отражения от поверхности Земли рассчитыва-



■ **Рис. 2.** Квазигеометрооптическое представление ионосферной волны при $\Psi^n \leq 0$

■ **Fig. 2.** Quasigeometrical representation of ionospheric wave for $\Psi^n \leq 0$

ются как отношение дифракционного поля к полю электромагнитной волны в свободном пространстве [17]:

$$Rg(\Psi^n \leq 0) = \frac{E_{\text{дифр}}}{E_{\text{с.п}}}, \quad (2)$$

где дифракционное поле $E_{\text{дифр}}$ может быть рассчитано в соответствии с [20]. Поправочные антенные коэффициенты рассчитываются согласно [21].

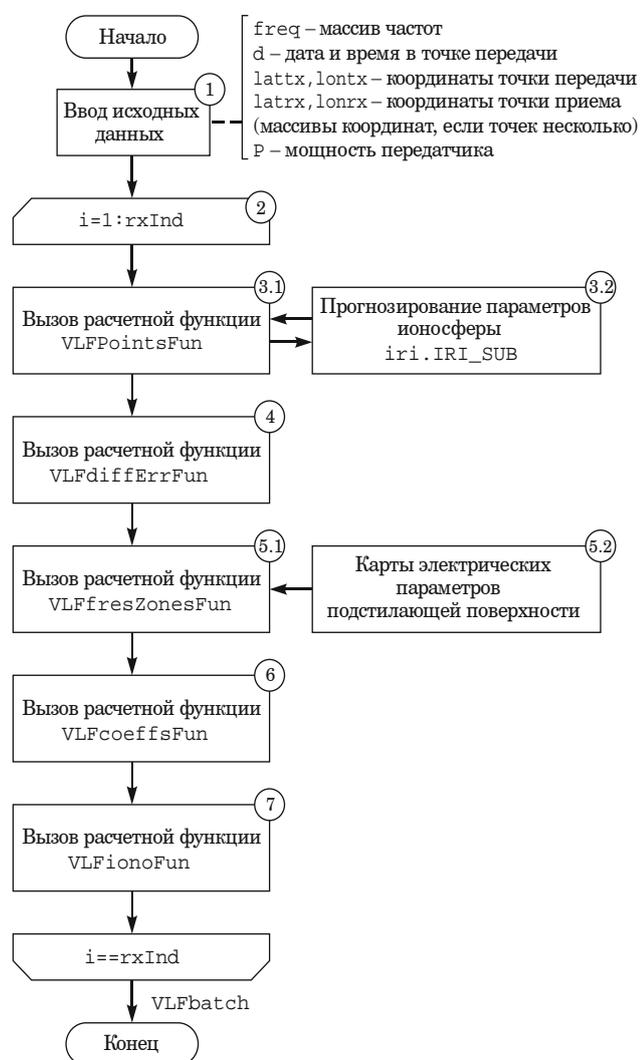
Общее выражение для расчета напряженности поля пространственной волны в диапазоне ОНЧ скачковым методом приведено в [17], где напряженность поля n -го луча пространственной волны [мВ/м] определяется как

$$E^n = \frac{600\sqrt{P_t} \cos \Psi^n F_r^n F_t^n \prod_{i=1}^n F_i^n \prod_{i=1}^n R_i^n \prod_{i=1}^{n-1} Rg_i^n}{D^n} \times \exp(-jkD^n), \quad (3)$$

где P_t – мощность передатчика, кВт; Ψ^n – угол места [11]; F_r^n – поправочный антенный коэффициент приемной антенны [21]; F_t^n – поправочный антенный коэффициент передающей антенны [21]; F_i^n – коэффициент ионосферной фокусировки i -го скачка, рассчитываемый по п. 2.3.3 рекомендации МСЭ [17]; R_i^n – ионосферный коэффициент отражения в i -й точке отражения, рассчитываемый по п. 2.3.5 рекомендации МСЭ [17]; Rg_i^n – коэффициент отражения от поверхности Земли в i -й точке отражения [19]; D^n – длина трассы вдоль траектории распространения электромагнитной волны, рассчитываемая по методике [12]; k – волновое число.

Для определения напряженности поля ионосферной волны суммируются лучи с 1-го по n -й. Расчетная методика в виде обобщенной блок-схемы показана на рис. 3.

Расчетная методика на основе скачкового метода представляет собой совокупность частных методик, реализованных в виде скрипта на языке MatLab. После запуска скрипта в блоке 1 вводятся исходные данные: массив расчетных частот, дата и время в точке передачи, координаты точек приема и передачи и мощность передатчика, — после чего запускается цикл по количеству точек (точек приема) (блок 2). Далее в блоке 3.1 вызывается расчетная функция VLFionoFun, реализующая частную методику [11], в ходе которой рассчитываются траекторные параметры



■ **Рис. 3.** Порядок проведения расчетов значений напряженности поля ионосферной волны в ОНЧ-диапазоне скачковым методом

■ **Fig. 3.** The procedure for calculating the values of the ionospheric wave field strength in the VLF band by the wavemethod

радиотрассы с помощью стандартной модели ионосферы IRI (блок 3.2). В блоке 4 в соответствии с методикой [12] выполняется уточнение траекторных параметров и расчет дифференциальных задержек лучей. В блоке 5.1 вызывается расчетная функция VLFfresZonesFun для определения областей поверхности Земли, существенно влияющих на распространение лучей, и вычисляются электрические характеристики этих областей с помощью разработанных цифровых карт (блок 5.2) [16]. В блоке 6 с помощью полученных данных рассчитываются коэффициенты, и затем в блоке 7 выполняются расчеты с помощью формулы (3). Все расчетные величины и промежуточные результаты сохраняются в структуру VLFBatch.

Сравнение результатов расчетов и измерений

Для определения адекватности расчетного метода и точности проведения расчетов выполнено сравнение результатов расчетов с результатами измерений на различных трассах радиосвязи [17, 22].

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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

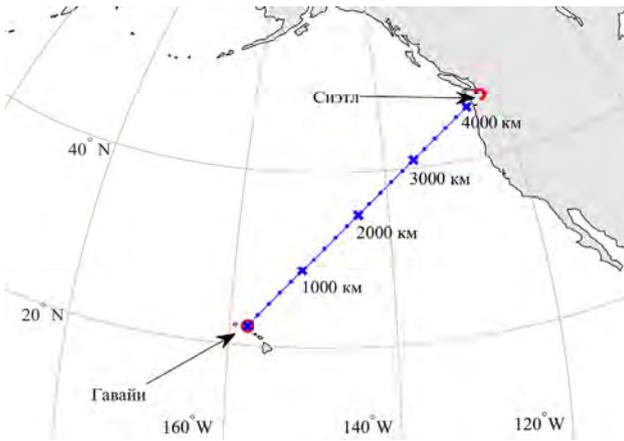
5. Гавайи (21,22° с.ш.; 158,00° з.д.) — Южн. Калифорния (35,31° с.ш.; 118,21° з.д.). Частотные измерения. Сентябрь–октябрь 1968 г., день и ночь. Расстояние 4166 км.

6. 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.

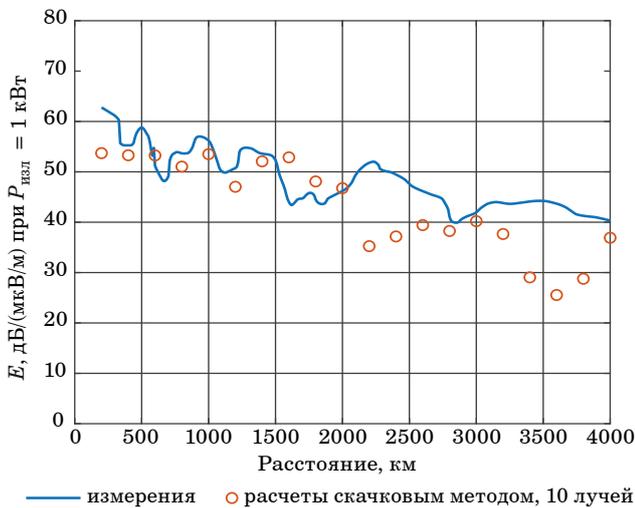
Во всех случаях результаты измерений приведены к значению излучаемой мощности 1 кВт. На рис. 4 показана трасса радиосвязи Гавайи — Сиэтл, а на рис. 5 — графики измеренных и прогнозных значений напряженности электрического поля. Данные измерений взяты из работы [22].

Для оценки точности метода прогнозирования обычно используют показатели, базирующиеся на погрешностях прогнозов [23, 24]. Абсолютная погрешность i -го прогноза, характеризующегося своей совокупностью исходных данных (длина трассы, частота, время и т. д.), вычисляется по формуле

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



■ **Рис. 4.** Радиотрасса Гавайи – Сиэтл
 ■ **Fig. 4.** Hawaii – Seattle radiopath



■ **Рис. 5.** Расчетные и измеренные значения напряженности электрического поля на трассе Гавайи – Сиэтл
 ■ **Fig. 5.** Calculated and measured values of the electric field strength for the Hawaii – Seattle radiopath

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 [25], рассчитываются по формулам:

– средняя погрешность прогнозирования

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

– средняя абсолютная погрешность прогнозирования

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

■ **Таблица 1.** Показатели точности прогнозов
 ■ **Table 1.** Forecasting accuracy performance

Показатель	Значение, дБ/(мкВ/м)	Граница 95%-го доверительного интервала оценки показателя		
		Нижняя	Верхняя	
<i>ME</i>	2,61	1,24	3,80	
<i>MAE</i>	8,06	7,33	9,18	
<i>RMSE</i>	10,94	9,75	12,55	
<i>MASE</i>	0,13	0,11	0,15	
Граница 90%-й доверительной полосы	Нижняя	-14,50	-16,55	-10,42
	Верхняя	19,68	15,52	24,18

– 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

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

Результаты расчетов показателей представлены в табл. 1.

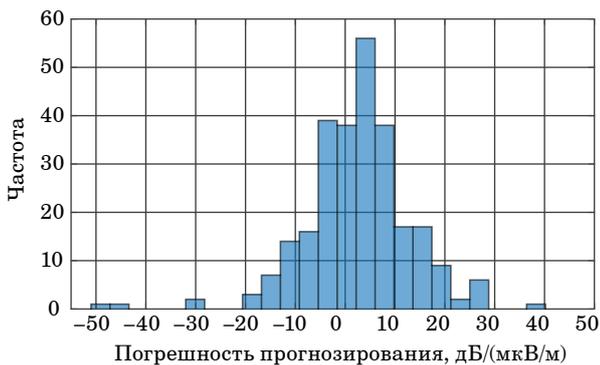
Статистика погрешностей расчетов показывает, что прогнозируемое значение напряженности поля ионосферной волны в среднем на 2,61 дБ/(мкВ/м) превышает результаты измерений. Вычисление квантилей вероятности дает 90%-ю полосу достоверности вычислений, которая составляет интервал от -14,50 до 19,68 дБ/(мкВ/м) относительно расчетного значения. Метод бутстрепинга [26, 27] позволяет определить доверительные интервалы полученных оценок, которые также представлены в табл. 1.

Оценка адекватности методики

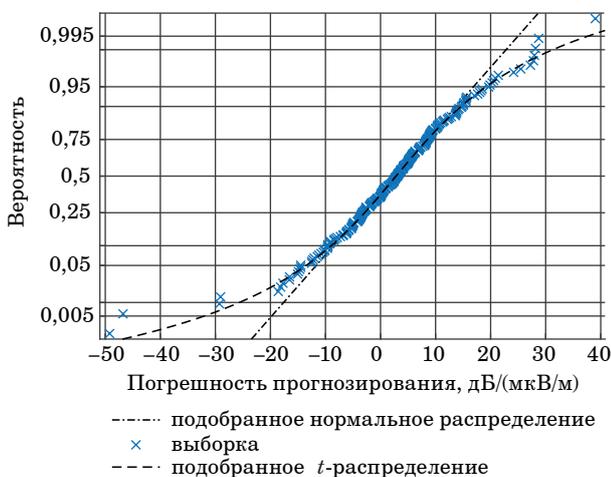
Чтобы утверждать об адекватности разработанной методики, кроме усредненных оценок точности прогнозирования, требуется исследовать погрешности прогнозирования на нормальность

их распределения. Гистограмма абсолютных погрешностей, рассчитанных по формуле (4), показана на рис. 6.

Гистограмма имеет вид, схожий с функцией плотности нормального закона распределения, однако тестирование по критерию Пирсона отвергает гипотезу о нормальности распределения на уровне значимости 5 %. Из вероятностного графика (рис. 7) видно, что в области медианы массив погрешностей достаточно хорошо согласуется с нормальным распределением, однако в области хвостов наблюдается сильное расхождение между практическими данными и теоретическим законом, поэтому можно предположить, что реальный закон распределения погрешностей вычислений близок к нормальному, но с более тяжелыми хвостами. Это может быть, например, t -распределение или логистическое распределение. Подбор методом поиска максимального правдоподобия и тестирование по критерию Пирсона показывают, что данные соответствуют



■ **Рис. 6.** Погрешности прогнозирования
 ■ **Fig. 6.** Forecasting errors



■ **Рис. 7.** Вероятности
 ■ **Fig. 7.** Probabilities

масштабно-сдвиговому t -распределению с параметрами $\mu = 4,63$, $\sigma = 8,52$ и $\nu = 5,11$ на уровне значимости 5 %.

Несмотря на то, что закон распределения погрешностей прогнозирования близок к нормальному, он все же не является таковым, поэтому нельзя исключать возможное влияние системных ошибок на результаты вычислений. Следует иметь в виду, что при высоких усредненных оценках точности прогнозирования среднеквадратичное отклонение погрешности существенно и составляет около 8 дБ/(мкВ/м), поэтому требуется провести дополнительное исследование для подтверждения адекватности рассматриваемого метода.

Более подробный анализ показывает, что статистические показатели зависят от длины радиотрассы (рис. 8).

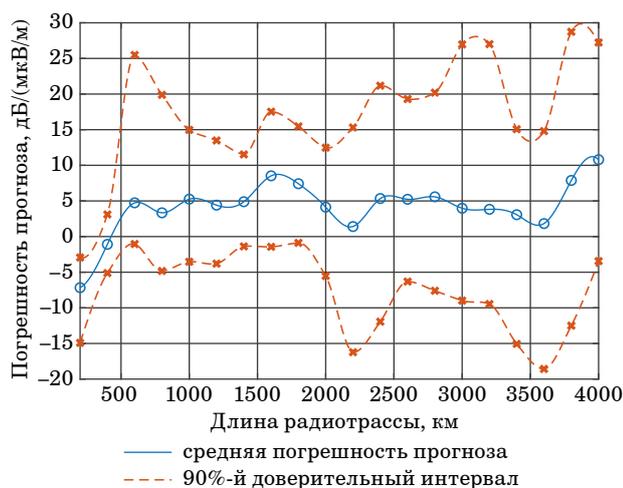
Таким образом, усредненные оценки, найденные в соответствии с формулами (5)–(7), дают представление о точности метода в целом, и, кроме них, требуется использовать комплексные оценки, учитывающие изменчивость статистических показателей. Комплексное оценивание адекватности расчетного метода кроме средних погрешностей измерений включает формализованные показатели качества прогнозирования, к которым относится $MASE$ [28], определяемая по формуле (8). Близкое к нулю значение $MASE$ (см. табл. 1) говорит о хорошей сходимости результатов расчетов и результатов измерений. В работе [29] рекомендуется использовать показатели точности и качества Зейла, которые рассчитываются по формулам

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

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

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. Для рассматриваемой методики $U_1 = 0,13$, $U_2 = 0,25$.

В работах [30, 31] предлагается использовать комплексный показатель Рассела, который вычисляется в соответствии с выражениями



■ **Рис. 8.** Доверительная полоса прогнозирования
 ■ **Fig. 8.** Forecasting confidence band

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

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

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

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 [32] значения показателя, меньшие 0,2, подтверждают адекватность исследуемой модели. Значения от 0,2 до 0,3 свидетельствуют об удовлетворительной сходимости результатов. Для рассматриваемого метода комплексный показатель Рассела C_R равен 0,08.

Литература

1. Bradley P. A. IRI and VLF/LF radio service planning. *Advances in Space Research*, 2001, no. 27, pp. 145–152. doi:10.1016/S0273-1177(00)00150-2
2. Cohen M. B., Inan U. S., Paschal E. W. Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with AWESOME instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 3–17. doi:10.1109/TGRS.2009.2028334
3. ГОСТ РВ 52216. *Связь военная. Основные термины и определения*. М., Госстандарт России, 2004. 15 с.

Заключение

Разработана комплексная методика расчета напряженности поля ионосферной волны в диапазоне ОНЧ на основе скачкового метода, изложенного в рекомендациях МСЭ [17]. Комплексная методика включает в себя совокупность частных методик, отвечающих за расчеты отдельных коэффициентов, входящих в выражение (3).

Сравнение расчетов напряженности поля ионосферной волны в диапазоне ОНЧ скачковым методом с результатами измерений показало низкую среднюю погрешность, равную 2,61 дБ/(мкВ/м). Однако наличие тяжелых хвостов в распределении погрешностей прогнозирования и высокое среднее квадратичное отклонение потребовали дополнительных исследований адекватности самого метода.

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 скачковый метод с использованием разработанных частных методик на основе стандартной модели ионосферы и цифровых карт подстилающей поверхности является адекватным и обладает достаточной точностью для прогнозирования энергетических параметров радиотрасс. Следует отметить, что проведенные расчеты не учитывают напряженность поля земной волны, которая оказывает значимое влияние на результирующую напряженность поля на расстояниях приблизительно до 1000 км [8]. Поэтому требуется провести дополнительные исследования, которые бы позволили добавить в скачковый метод расчета напряженности электромагнитного поля частную методику учета напряженности поля земной волны.

4. Земсков В. И., Катанович А. А. Основные направления развития системы связи ВМФ. *Морской сборник*, 2016, № 10 (2035), с. 57–62.
5. Ghatak A. K., Gallawa R. L., Goyal I. C. *Modified airy function and WKB solutions to the wave equation*. National Institute of Standards and Technology, 1991. 172 p.
6. Al-Masaeed M., Rabei E. M., Al-Jamel A. WKB approximation with conformable operator. *Modern Physics Letters A*, 2021, pp. 1–13. doi:10.1142/S0217732322501449
7. Belrose J. S. Long wave propagation. *Radio wave propagation, modeling, prediction and assessment*. AGARDograph, 1990, no. 326, pp. 40–62.

8. Макаров Г. И., Новиков В. В., Рыбачек С. Т. *Распространение радиоволн в волноводном канале Земля – ионосфера и в ионосфере*. М., Наука, 1994. 152 с.
9. Lynn K. VLF waveguide propagation: The basics. *Proc. of the 1st Intern. Conf. on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations*, 2010, pp. 3–44.
10. Pal S. *Numerical modelling of VLF radio wave propagation through Earth – ionosphere waveguide and its application to sudden ionospheric disturbances*. University of Calcutta, 2013. 150 p.
11. 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». СПб., 2022, с. 73–81.
12. Типикин А. А., Пыков Е. В., Розанов А. А. Модифицированная методика расчета дифференциальных временных задержек лучей в лучевой модели распространения радиоволн ОНЧ-диапазона. *Интеллектуальные разработки в интересах строительства и развития Военно-морского флота: сб. тр. НТК НИИ ОСИС ВМФ*, Санкт-Петербург, 22–24 ноября 2022 г., СПб., 2022, с. 47–56.
13. 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, iss. 3. doi:10.3390/atmos13030371. <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/3/371> (дата обращения: 09.07.2023).
14. 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, iss. 21. doi:10.3390/rs12213531. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3531> (дата обращения: 09.07.2023).
15. Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere. *Advances in Radio Science*, 2018, vol. 16, pp. 1–11. doi:10.5194/ars-16-1-2018
16. 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
17. Рекомендация МСЭ-R P.684-7. *Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц*. Женева, МСЭ, 2017. 39 с.
18. Типикин А. А. Уточненная модель высоты точки отражения для методики прогнозирования энергетических параметров радиотрасс в диапазоне очень низких частот. *Инновационная деятельность в ВС РФ: тр. всероссийской науч.-практ. конф.*, Санкт-Петербург, 4–6 апреля 2023 г., СПб., 2023, с. 15–23.
19. 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
20. Рекомендация МСЭ-R P.368-9. *Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц*. Женева, МСЭ, 2007. 43 с.
21. 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
22. Report no. 960-TP-74-5. *Comparison of predicted VLF/LF signal levels with propagation data*. Washington, Defense Communications Agency, 1974. 75 p.
23. Гнатюк В. И. *Закон оптимального построения техноценозов*: монография. Калининград, Техноценоз, 2019. 940 с.
24. Дорофеев С. А., Кивчун О. Р., Прохода А. Н. Оценка реализации потенциала энергосбережения при эксплуатации объектов военной инфраструктуры. *Изв. Тульского государственного университета. Технические науки*, 2018, № 1, с. 267–274.
25. Hora J., Campos P. A review of performance criteria to validate simulation models. *Expert Systems*, 2015, vol. 32, no. 5, pp. 578–595. doi:10.1111/exsy.12111
26. 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
27. Кувайкова Ю. Е. Применение ансамблевых методов машинного обучения для прогнозирования технического состояния объекта. *Изв. Самарского научного центра РАН*, 2021, т. 23, № 1, с. 111–114. doi:10.37313/1990-5378-2021-23-1-111-114
28. 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
29. Bliemel F. Theil's forecast accuracy coefficient: A clarification. *Journal of Marketing Research*, 1973, no. 10, pp. 444–446. doi:10.1177/002224377301000413
30. 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. *Proc. of DETC'08, ASME 2008 Intern. Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conf.*, New York, 2008. doi:10.1115/DETC2008-49669

31. 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*, 2010, vol. 132, iss. 6, pp. 061401 (10). doi:10.1115/1.4002478

32. 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

UDC 621.371.34

doi:10.31799/1684-8853-2023-5-12-21

EDN: FTXMCSY

The technique of calculating the field strength of the ionospheric wave in the very low frequency band based on the wavehop method

A. A. Tipikin^a, PhD, Tech., Head of a Research Division, orcid.org/0000-0002-0940-4285, alextip@mail.ru

^aMilitary Research and Educational Center of the Navy “Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N. G. Kuznetsov”, 17/1, Ushakovskaya Emb., 197045, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Forecasting the energy parameters of radio tracks is an integral part of planning the operation of radio networks in the very low frequency range. The predicted values of the electric field strength depend on a large number of factors, including the state of the ionosphere and the electrical characteristics of the underlying surface, which are considered using individual components of attenuation multipliers. Particular techniques designed to calculate these components need to be generalized and introduced into the methodology for calculating the energy parameters of radio tracks. **Purpose:** To develop a wavehop method for calculating the field strength of an ionospheric wave in the very low frequency band with the possibility to enter initial data from the International Reference Ionosphere model and global maps of the electrical characteristics of the underlying surface. **Results:** We carry out the study using several particular methods related to the calculation of the height of the reflection point of an electromagnetic wave from the ionosphere, the calculation of differential time delays of rays based on the condition of equal elevation angles, and the calculation of reflection coefficients from the Earth’s surface and correction antenna coefficients. We develop a technique of calculating the ionospheric wave field strength in the very low frequency band based on the wavehop method. The advanced methodology includes specific techniques for considering the characteristics of the ionosphere using the International Reference Ionosphere model and the characteristics of the underlying surface using appropriate digital maps. We implement the technique as a set of interrelated scripts and functions in the MatLab computing environment. In addition, we perform a series of calculations of the electric field strength of the ionospheric wave for various radio tracks. Comparing predicted values with the results of real measurements we find out prediction errors. We conduct statistical studies of prediction errors and confirm the adequacy of the developed technique. **Practical relevance:** We develop tools that integrate modern achievements in the ionosphere state modeling and digital mapping of the electrical characteristics of the underlying surface into the wavehop method. The implementation of the technique based on the MatLab computing environment makes it possible to reduce the operator’s participation at the stage of initial data input and to create opportunities for the development of the autonomous software for predicting the electromagnetic wave field strength in the very low frequency band.

Keywords – very low frequency band, telecommunications planning, prediction of energy parameters, adequacy of prediction, accuracy of prediction, statistical analysis.

For citation: Tipikin A. A. The technique of calculating the field strength of the ionospheric wave in the very low frequency band based on the wavehop method. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2023, no. 5, pp. 12–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2023-5-12-21, EDN: FTXMCSY

References

- Bradley P. A. IRI and VLF/LF radio service planning. *Advances in Space Research*, 2001, no. 27, pp. 145–152. doi:10.1016/S0273-1177(00)00150-2
- Cohen M. B., Inan U. S., Paschal E. W. Sensitive broadband ELF/VLF radio reception with AWESOME instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 3–17. doi:10.1109/TGRS.2009.2028334
- State Standard RV 52216. *Military telecommunications. Basic terms and definitions*. Moscow, Gosstandart Russii Publ., 2004. 15 p. (In Russian).
- Zemskov V. I., Katanovich A. A. The basic directions of the navy communication system development. *Morskoy Sbornik*, 2016, no. 10 (2035), pp. 57–62 (In Russian).
- Ghatak A. K., Gallawa R. L., Goyal I. C. *Modified airy function and WKB solutions to the wave equation*. National Institute of Standards and Technology, 1991. 172 p.
- Al-Masaeed M., Rabei E. M., Al-Jamel A. WKB approximation with conformable operator. *Modern Physics Letters A*, 2021, pp. 1–13. doi:10.1142/S0217732322501449
- Belrose J. S. Long wave propagation. Radio wave propagation, modeling, prediction and assessment. *AGARDograph*, 1990, no. 326, pp. 40–62.
- Makarov G. I., Novikov V. V., Rybachek S. T. *Rasprostraneniye radiovoln v volnovodnom kanale Zemlya – ionosfera i v ionosfere* [Propagation of radio waves in the Earth – ionosphere waveguide channel and in the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1994. 152 p. (In Russian).
- Lynn K. VLF waveguide propagation: The basics. *Proc. of the 1st Intern. Conf. on Science with Very Low Frequency Radio Waves: Theory and Observations*, 2010, pp. 3–44.
- Pal S. *Numerical modelling of VLF radio wave propagation through Earth – ionosphere waveguide and its application to sudden ionospheric disturbances*. University of Calcutta, 2013. 150 p.
- Tipikin A. A., Pykov E. V. *Metodika opredeleniya traektornykh parametrov radiotrassy ONCH diapazona na osnove utochnennoy modeli vysoty tochki otrazheniya*. In: *Sbornik nauchnykh trudov VUNC VMF «Voenno-morskaya akademiya»* [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]. In: Proc. of the Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy». Saint-Petersburg, 2022, pp. 73–81 (In Russian).
- Tipikin A. A., Pykov E. V., Rozanov A. A. 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 NII OSIS VMF «Intellektualnye razrabotki v interesah stroitel'stva i razvitiya Voenno-morskogo flota»* [Proc. of the Scientific and Technical Conf. 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).

13. 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, iss. 3. doi:10.3390/atmos13030371. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/3/371> (accessed 09 July 2023).
14. 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, iss. 21. doi:10.3390/rs12213531. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3531> (accessed 09 July 2023).
15. Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere. *Advances in Radio Science*, 2018, vol. 16, pp. 1–11. doi:10.5194/ars-16-1-2018
16. Tipikin A. A. 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/JC-STCS.15101
17. ITU-R Recommendation P.684-7. *Prediction of field strength at frequencies below about 150 kHz*. Geneva, ITU, 2016. 39 p.
18. Tipikin A. A. Refined model of the height of the reflection point for the methodology of forecasting the energy parameters of radio tracks in the very low frequency band. *Trudy vsearmejskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Innovacionnaya deyatel'nost' v VS RF»* [Proc. of the All-Army Scientific and Practical Conference «Innovative activity in the Armed Forces of the Russian Federation»]. Saint-Petersburg, 2023, c. 15–23 (In Russian).
19. Tipikin A. A. 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
20. ITU-R Recommendation P.368-9. *Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz and 30 MHz*. Geneva, ITU, 2007. 43 p.
21. Tipikin A. A., Potapov D. S. 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
22. Report no. 960-TP-74-5. *Comparison of predicted VLF/LF signal levels with propagation data*. Washington, Defense Communications Agency, 1974. 75 p.
23. Gnatyuk V. I. *Zakon optimal'nogo postroeniya tekhnocenozev* [The law of optimal construction of technocenosis]. Kaliningrad, Technocenoz Publ., 2019. 940 p. (In Russian).
24. Dorofeev S. A., Kivchun O. R., Prokhoda A. N. Evaluation of the realization of the energy saving potential in the operation of military infrastructure facilities. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 2018, no. 1, pp. 267–274 (In Russian).
25. Hora J., Campos P. A review of performance criteria to validate simulation models. *Expert Systems*, 2015, vol. 32, no. 5, pp. 578–595. doi:10.1111/exsy.12111
26. Kuzmin I. I. 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
27. Kuvaykova Yu. E. Application of ensemble machine learning methods for predicting the technical state of an object. *Izvestiya 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
28. 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
29. Bliemel F. Theil's forecast accuracy coefficient: A clarification. *Journal of Marketing Research*, 1973, no. 10, pp. 444–446. doi:10.1177/002224377301000413
30. 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. *Proc. of DETC'08, ASME 2008 International Design Engineering Technical Conf. and Computers and Information in Engineering Conf.*, New York, 2008. doi:10.1115/DETC2008-49669
31. 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*, 2010, vol. 132, iss. 6, pp. 061401 (10). doi:10.1115/1.4002478
32. 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

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая Scopus и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, что снижает рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста, есть возможность провести регистрацию на 12 языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>