

Комплексная методика профилирования геофизических характеристик на трассе распространения радиоволн диапазона очень низких частот

А. А. Типикин

Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия»

Аннотация: **Введение:** в работе предложена комплексная методика использования современных геофизических моделей для профилирования геофизических характеристик на радиотрассе диапазона очень низких частот; она объединяет ряд частных методик и реализуется в виде программы на языке Matlab.

Материалы и методы: исходными данными служит информация из цифровых глобальных карт электрических характеристик подстилающей поверхности, геомагнитных моделей International Geomagnetic Reference Field или World Magnetic Model, а также модели ионосферы International Reference Ionosphere. В основе методики лежит циклическое обращение к геофизическим моделям, управляемое такими параметрами, как зенитный угол солнца, проводимость подстилающей поверхности, геомагнитный азимут радиотрассы и амплитуда геомагнитного поля. При выходе полученного значения одного из управляющих параметров за пределы назначенного интервала выполняется сохранение характеристик сегмента радиотрассы в массив исходных данных.

Результаты: прогнозирование напряженности поля с помощью апробированного пакета программ показало, что замена моделей исходных данных вносит в прогноз выраженные периодические возмущения, которые проявляются в виде биения уровня напряженности поля по расстоянию. Количественно оценка эффекта выполнена с помощью периодограммы по уровню соответствующих гармоник. Проведенный анализ показал, что периодические возмущения являются следствием резкого спада электронной концентрации в стандартной модели ионосферы, поэтому в комплексную методику сегментации внедрена гибридная модель ионосферы, которая совмещает биэкспоненциальную и стандартную модели ионосферы для более плавного спада электронной концентрации на низких высотах.

Обсуждение и заключения: в результате прогнозирования с использованием комплексной методики выявлено, что внедрение гибридной модели дает наименьшие периодические возмущения в прогнозе напряженности поля. Однако использование гибридной модели осложняется необходимостью обоснованного выбора точки, в которой происходит переход от одной экспоненциальной функции к другой, поэтому применение биэкспоненциальной модели требует проведения дополнительных исследований.

Ключевые слова: сегментирование радиотрассы, геофизические модели, очень низкие частоты, прогнозирование, напряженность поля.

Для цитирования: Типикин А. А. Комплексная методика профилирования геофизических характеристик на трассе распространения радиоволн диапазона очень низких частот // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19, № 3. С. 61–75. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-3-61-75>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Типикин А. А., 2025

Статья поступила в редакцию 09.04.2025;
переработанный вариант – 05.03.2025;
принята к публикации 13.05.2025.

1. Введение

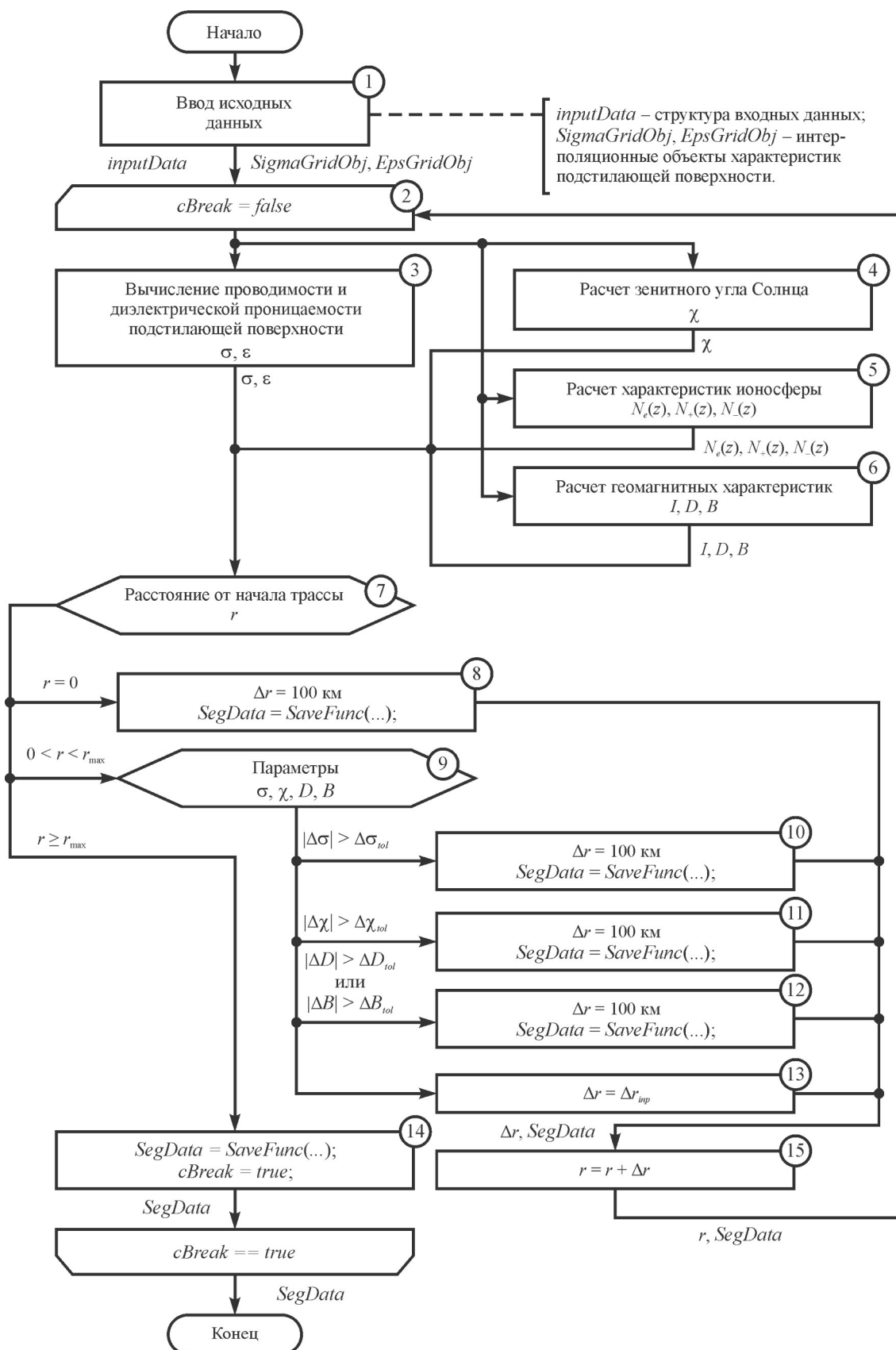
Прогнозирование энергетических параметров радиолиний диапазона очень низких частот (ОНЧ) имеет важное значение в областях применения систем связи специального назначения и сверхдлинноволновой навигации, что подтверждается рядом работ [1–4]. Результаты прогнозирования зависят от комплекса геофизических параметров, выступающих в качестве входных данных, к которым относятся электрические параметры подстилающей поверхности, характеристики ионосферы и геомагнитного поля Земли. Для использования в ходе расчетов необходимо иметь возможность автоматизации ввода указанных сведений, что реализовано на примере скачкового метода прогнозирования в исследованиях [5, 6]. Следует отметить, что несмотря на более простую математическую реализацию, скачковый метод в сравнении с волновым (методом нормальных волн) имеет существенный недостаток, который заключается в точечном характере получаемого прогноза. По указанной причине задача прогнозирования энергетических параметров вдоль всей радиотрассы сводится к многократным расчетам в различных точках трассы с последующей интерполяцией результатов. Волновой метод лишен этого недостатка в той степени, что вычисление параметров волновых мод во всех однородных сегментах волновода, образованного поверхностью Земли и ионосферой, с последующим преобразованием мод, например, с помощью приближения Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна [7, 8], дает возможность быстрого прогнозирования энергетических параметров в его произвольных точках [9, 10].

В связи с этим для волнового метода прогнозирования был разработан ряд частных методик, позволяющих использовать цифровые карты электрических параметров подстилающей поверхности [11, 12], стандартную модель ионосферы [13–15] и различные геомагнитные модели [16, 17] в качестве входных данных, что отражено в работах [18, 19]. Однако разрозненный характер частных методик ввода геофизических параметров объективно требует разработки комплексной методики, рационально объединяющей все виды исходных геофизических данных в единый массив, который может быть далее использован в процессе прогнозирования, что и определяет цель данного исследования.

2. Материалы и методы

Разработанная методика комплексного сегментирования радиотрассы представляет собой программу на языке Matlab. Обобщенная блок-схема методики показана на рис. 1.

В блоке 1 вводятся исходные данные – структура *inputData*, содержащая сведения, необходимые для расчетов – мощность передатчика, координаты передатчика, время, на которое составляется прогноз, координаты приемника или азимут радиотрассы и т.д. В интерполяционных объектах *SigmaGridObj* и *EpsGridObj* содержатся сведения об удельной проводимости и диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности, эти объекты, по сути, представляют собой цифровые карты. Методика формирования карт описана в работах [11, 12].



В блоке 2 открывается цикл, в теле которого выполняются вычисления характеристик сегментов. Первоначальные расчеты проводятся для начала радиотрассы, т. е. расстояние от передатчика g , км, равно нулю. В блоке 3 для заданной рабочей частоты и координат с помощью объектов *SigmaGridObj* и *EpsGridObj* вычисляются параметры σ (удельная

проводимость, См/м) и ε (удельная диэлектрическая проницаемость, 1/м). Определение параметров σ и ε осуществляется путем вызова объектов *SigmaGridObj* и *EpsGridObj* с заданной рабочей частотой f , Гц, и географическими координатами, град.

В блоке 4 рассчитывается зенитный угол Солнца χ , град, для заданного мирового скоординированного времени (UTC) и географических координат. Методика расчета приведена в [20, 21]. Расчет характеристик ионосферы (блок 5) осуществляется с помощью стандартной модели ионосферы (International Reference Ionosphere, IRI) [13–15], где модель нижней части ионосферы выполнена на основе фарадеевской стандартной модели (Faraday International Reference Ionosphere, FIRI-2001) [22]. Вычисление осуществляется с помощью системного объекта *IRISub*, реализующего модель IRI в Matlab, или путем загрузки соответствующей скомпилированной динамической библиотеки. Результатом расчетов являются профили электронной концентрации $N_e(z)$ в эл/см³ или в эл/м³ как функции высоты z , км, над поверхностью Земли для заданного всемирного скоординированного времени (Universal Coordinated Time, UTC), даты и географических координат. Электронная концентрация в ионосфере напрямую связана с измеренным значением потока солнечного излучения на длине волны 10,7 см (индекс F10.7), годовым скользящим средним количеством солнечных пятен R_{12} и рядом других параметров, которые либо прогнозируются на дату в будущем, либо являются результатом фактического измерения. Кроме электронной концентрации при необходимости могут вычисляться концентрации отрицательных $N_-(z)$ и положительных $N_+(z)$ ионов, однако их влияние на распространение ОНЧ радиоволн существенно меньше, чем влияние свободных электронов в нижней ионосфере.

В блоке 6 выполняется расчет геомагнитных характеристик с помощью международной стандартной геомагнитной модели (International Geomagnetic Reference Field, IGRF) [16] или всемирной магнитной модели (World Magnetic Model, WMM) [17]: магнитного наклона D , град, магнитного склонения I , град, и магнитной индукции B , нТл. Величины D и B используются далее для сегментирования радиотрассы, а с помощью магнитного склонения I определяется магнитный азимут трассы, т. е. разница между азимутом трассы в заданной ее точке и магнитным склонением. Подробная методика выполнения расчетов приведена в работе [18]. В блоке 7 осуществляется множественный выбор в зависимости от текущего расстояния r , отсчитываемого от начала радиотрассы. На первой итерации цикла $r = 0$, поэтому в блоке 8 иницируется начальное приращение $\Delta r = 100$ км, так как минимальная длина сегмента трассы не может быть меньше данной величины, и рассчитанные геофизические параметры записываются в структуру *SegData* с помощью вспомогательной функции *SaveFunc*. После этого выполняется приращение расстояния на величину Δr , и начинается следующая итерация цикла. Если r больше нуля, но при этом меньше максимально допустимой длины радиотрассы $r_{\max}$, то в блоке 9 осуществляется следующий этап множественного выбора. В зависимости от характера изменения параметров σ , ε , D и B цикл либо переходит на следующую итерацию без записи данных в структуру *SegData*, либо данные сохраняются, что означает фиксацию очередного сегмента радиотрассы и его параметров (блоки 10–12). В случае сохранения данных по очередному сегменту задается начальное приращение $\Delta r = 100$ км, в противном случае приращение равно величине Δr_{inp} (блок 13), которая берется из входных данных, по умолчанию $\Delta r_{\text{inp}} = 20$ км. Пределы изменения величин σ , ε , D и B для фиксации очередного сегмента радиотрассы могут быть заданы нелинейно. Например, для зенитного угла солнца могут быть заданы границы интервалов {90; 91,8; 93,6; 95,4; 97,2; 99}, град, что обосновано разделением диапазона χ на дневную область ($\chi < 90^\circ$) и ночную ($\chi > 99^\circ$) с дискретизацией области терминатора ($90^\circ < \chi < 99^\circ$) с шагом $1,8^\circ$. При использовании модели IRI возможна более подробная дискретизация в областях $\chi < 90^\circ$ и $\chi > 99^\circ$, однако при этом следует учитывать, что слишком большое количество интервалов χ приведет к большому количеству сегментов волновода, что в результате сказывается на объеме выполняемых вычислений. Для удельной проводимости подстилающей поверхности границы интервалов представлены в табл. 1 статьи [23]. В диапазоне от 10^{-6} до $1,7$ См/м разбиение на поддиапазоны осуществляется в соответствии с рекомендацией МСЭ-R P.832-4. В области $\sigma > 1,7$ См/м

границы интервалов дискретизации выбираются исходя из статистических характеристик данных, полученных в работе [23], таким образом, чтобы в найденные интервалы попадали пики гистограммы.

Очередной сегмент радиотрассы фиксируется при выходе параметра за пределы текущего интервала. Если в блоке 7 фиксируется превышение величины r над $r_{\max}$, то записывается конечный сегмент радиотрассы, признаку завершения цикла $cBreak$ присваивается значение *true* (блок 14), цикл останавливается. В результате функционирования программы формируется структура *SegData* с данными о сегментировании радиотрассы.

Горизонтальные профили электрических характеристик подстилающей поверхности и геомагнитных параметров представлены в работах [18, 23]. В качестве примера на рис. 2 изображены вертикальные профили электронной концентрации для 22:00 всемирного скоординированного времени (UTC, 15:44 местного времени) 15 апреля 2015 г. в точке с координатами 46,37° с.ш. и 98,34° з.д. Один из профилей получен с помощью модели IRI, а второй – с помощью экспоненциальной модели, используемой в пакете программ Long Wave Propagation Capability (LWPC) [24], с параметрами $h = 74$ км, $\beta = 0.3$ км⁻¹.

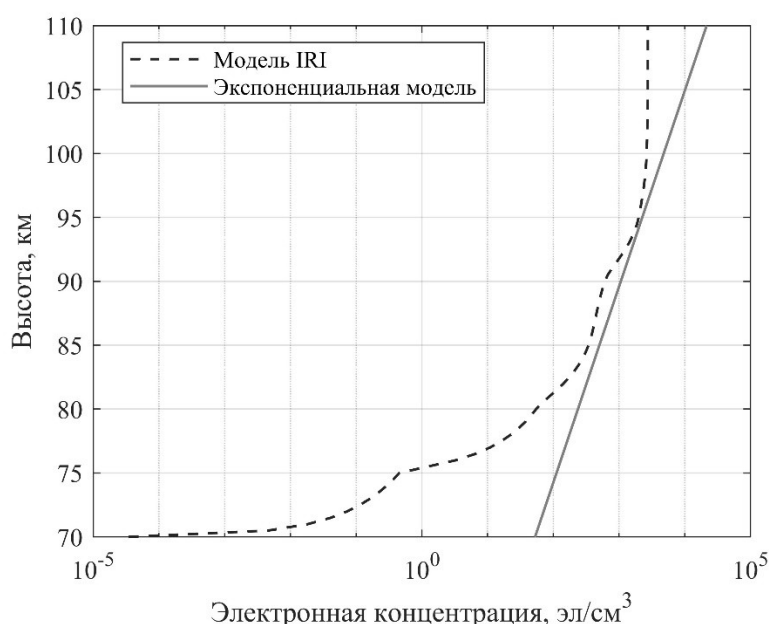


Рис. 2. Вертикальные профили электронной концентрации в точке 46,37° с.ш. и 98,34° з.д., 22:00 UTC, 15.04.2015 г.

Как показали исследования [18, 19, 23], наиболее существенное влияние на результат прогнозирования оказывает модель ионосферы. Если разные карты подстилающей поверхности и модели геомагнитного поля дают приблизительно одинаковые горизонтальные профили трассовых характеристик, то профили электронной концентрации могут значительно отличаться (рис. 2), что заметно влияет на прогнозируемый уровень напряженности поля в точке приема.

3. Результаты

Прогнозы напряженности электрического поля на трассе с передатчиком, расположенным в точке 46,37° с. ш. и 98,34° з. д., азимутом радиотрассы 45° для времени 22:00 UTC 15 апреля 2015 г., полученные с помощью пакета программ LWPC на трассах, сегментированных двумя способами, показаны на рис. 3, где E_{LWPC} – прогноз напряженности поля на радиотрассе, сегментированной средствами LWPC, а E_{KC} – прогноз поля, полученный с помощью методики комплексной сегментации. При этом рабочая частота передатчика установлена равной 10,5 кГц, мощность – 1 кВт. В качестве расчетного ядра в обоих случаях использо-

влась программа Long Wave Propagation Mode (LWPM), входящая в пакет LWPC [23]. В программе реализован волновой метод расчета (метод нормальных волн), общее описание которого можно найти в работе [9]. Таким образом, кривая E_{LWPC} получена на основе сегментирования по внутренним моделям пакета LWPC, а кривая E_{KC} – с помощью расчетного ядра LWPM, на вход которого поданы данные современных геофизических моделей, сегментированные с помощью разработанной методики.

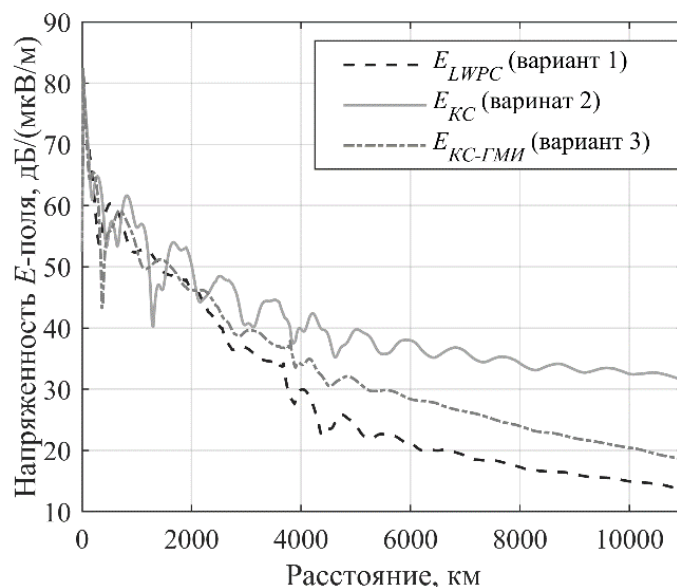


Рис. 3. Прогнозы E-поля, полученные с помощью разных методик сегментации радиотрассы

На рис. 4 изображены кривые, отражающие разницу прогнозов ΔE , которые демонстрируют существенное различие вариантов моделирования.

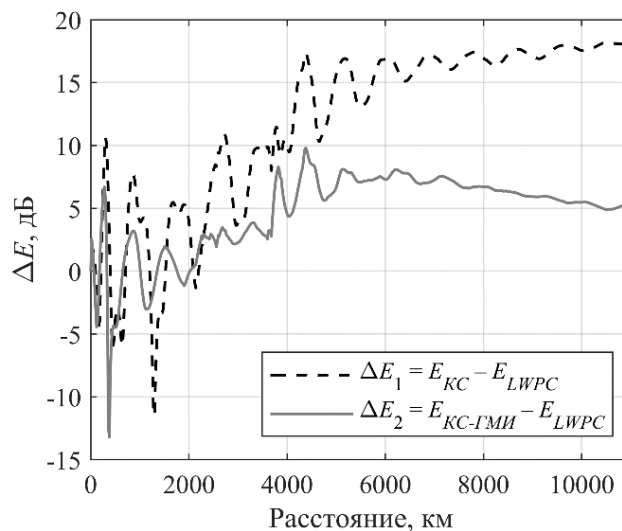


Рис. 4. Разница прогнозов напряженности электрического поля

Величина ΔE_1 имеет размах от $-11,48$ до $18,19$ дБ, что составляет почти 30 дБ, при этом видно, что разработанная методика сегментации (вариант 2) вносит в результат моделирования периодические возмущения. Так как влияние земной волны на расстояниях более 500 км статистически не обнаруживается [6], то наблюдаемый эффект скорее всего вызван интерференцией волновых мод вследствие резко очерченной верхней границы волновода.

Для определения количественного характера периодических составляющих в разнице прогнозов может быть использована периодограмма, часто применяемая для анализа временных рядов [25, 26], которая для временного ряда $a_t, t = 1, 2, \dots, n$, записывается в виде:

$$I(f_i) = \frac{2}{n} \left[\left(\sum_{t=1}^n a_t \cos 2\pi f_i t \right)^2 + \left(\sum_{t=1}^n a_t \sin 2\pi f_i t \right)^2 \right],$$

где $f_i = i/n$ – частота. Величину $I(f_i)$ принято называть интенсивностью. Фактически интенсивность представляет собой результат корреляции a_t с синусоидами и косинусоидами различных частот. Периодичность с частотой f_i , имеющаяся в остаточных ошибках (в данном случае в разнице прогнозов), подчеркивается при корреляции с синусоидой или косинусоидой той же частоты и дает поэтому большое значение $I(f_i)$.

Если в качестве временного ряда взять значения напряженности электрического поля, полученные для заданных расстояний, то можно выявить периодические составляющие, соответствующие определенной длине пути, пройденной электромагнитной волной вдоль радиотрассы. Периодограммы различий прогнозирования показаны на рис. 5.

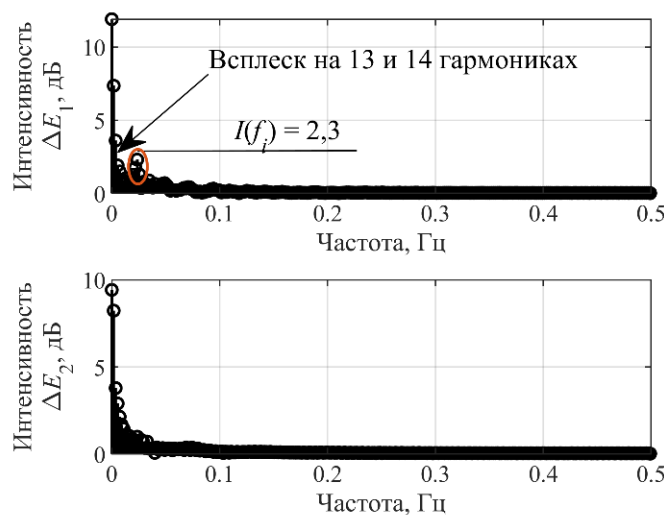


Рис. 5. Периодограммы различий прогнозирования

Нулевая частота периодограммы I отражает величину постоянного компонента ΔE и равна 11.9 дБ, что соответствует $\overline{\Delta E_1} = 11.9$. Следующие 4 наиболее сильные гармоники f_i отвечают за плавное изменение ΔE_1 на расстояниях от 0 до 11000 км. В районе 13 и 14 гармоник виден всплеск до уровня 2,3 дБ, что соответствует биениям ΔE_1 с периодичностью около 900 км. Очевидно, что это нежелательный компонент, присутствующий в прогнозе напряженности электрического поля, который может свидетельствовать о наличии неконтролируемых эффектов при смене входных данных модели. Полученный результат подтверждает данные о сильной чувствительности метода нормальных волн к малому содержанию электронов в нижнем слое атмосферы [9; 27].

Если в модели IRI (рис. 2) для высот ниже приблизительно 70 км электронная концентрация резко снижается до значений $10^{-20} - 100^{-30}$ эл/см³, то для экспоненциальной модели Уэйта [28] эта характеристика снижается гораздо медленнее от $10 - 100$ до $10^{-8} - 10^{-10}$ эл/см³. Таким образом, целесообразно использовать гибридную модель ионосферы, в которой электронная концентрация, начиная с высот около 110 – 150 км, спадает в соответствии с моделью IRI и при достижении определенного порогового значения далее до нулевой высоты снижается по экспоненциальному закону. Такая модель позволяет учитывать более плавное снижение концентрации электронов на низких высотах. Пример гибридной модели ионосферы показан на рис. 6.

На рис. 6 сплошной линией показан профиль электронной концентрации, состоящий из трех участков. Верхний участок получен по данным модели IRI, а два нижних участка – с помощью биэкспоненциального профиля, предложенного в работе [27]. Средняя часть профиля рассчитывается по экспоненциальной формуле [28]:

$$N_e(z) = 1,43 \cdot 10^7 \exp(-0,15h') \exp((\beta - 0,15)(z - h')),$$

с параметрами $\beta = 0,3 \text{ км}^{-1}$ и h' в пределах от 70 до 86 км. В то время как нижняя часть профиля рассчитывается в соответствии с выражением [24]:

$$N_e(z) = N_e(h'_{kn}) \exp(0,35(z - h'_{kn})),$$

где высота перехода между видами экспоненциальных профилей h'_{kn} лежит в пределах от 55 до 70 км. В примере, изображенном на рис. 6, использованы параметры $h' = 80 \text{ км}$ и $h'_{kn} = 55 \text{ км}$.

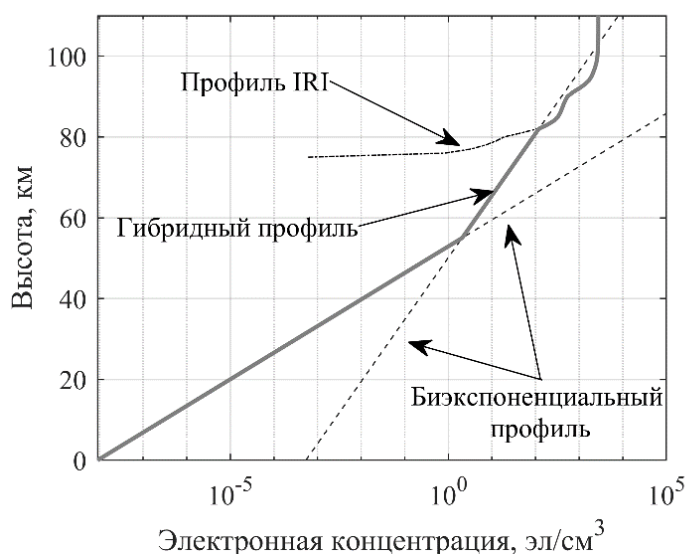


Рис. 6. Гибридная модель ионосферы на высотах от 0 до 110 км

Кривая $E_{\text{КС-ГМИ}}$ (вариант 3) на рис. 4 получена с помощью комплексной методики с учетом гибридной модели ионосферы. Как видно из рис. 4, переменная $\Delta E_2 = E_{\text{КС-ГМИ}} - E_{\text{LWPC}}$ не имеет выраженных биений по расстоянию, что подтверждается гораздо более плавной периодограммой, показанной в нижней части рис. 5. Средняя разница прогнозов в случае использования гибридного ионосферного профиля менее существенна и составляет $\overline{\Delta E_2} = 4,68 \text{ дБ}$ при размахе около 23 дБ.

На рис. 7 показаны графики прогнозных кривых напряженности поля на радиотрассе Сан-Франциско – Гавайи для дневных условий в летний сезон, рабочая частота 24 кГц. Данные измерений взяты из отчета [29]. Круглыми маркерами обозначены результаты прогнозирования скачковым методом [6], сплошной линией с точками – волновым методом с помощью программы, описанной в [23], где волновод принят однородным с проводимостью подстилающей поверхности 4 См/м и экспоненциальной ионосферой с параметрами $\beta = 0,5 \text{ км}^{-1}$ и $h' = 70$. Пунктирной линией на рис. 7 показана кривая напряженности поля, полученная с помощью программы LWPC, где в качестве ионосферы принята гибридная модель, а биэкспоненциальный профиль электронной концентрации подобран таким образом, чтобы получить минимальную среднюю погрешность и среднее квадратичное отклонение. Параметры биэкспоненциального профиля $h'_{kn} = 60 \text{ км}$ и $h' = 80 \text{ км}$. Результаты статистической обработки погрешностей прогнозирования приведены в табл. 1, где МО – математическое ожидание погрешности прогнозирования, СКО – среднее квадратичное отклонение.

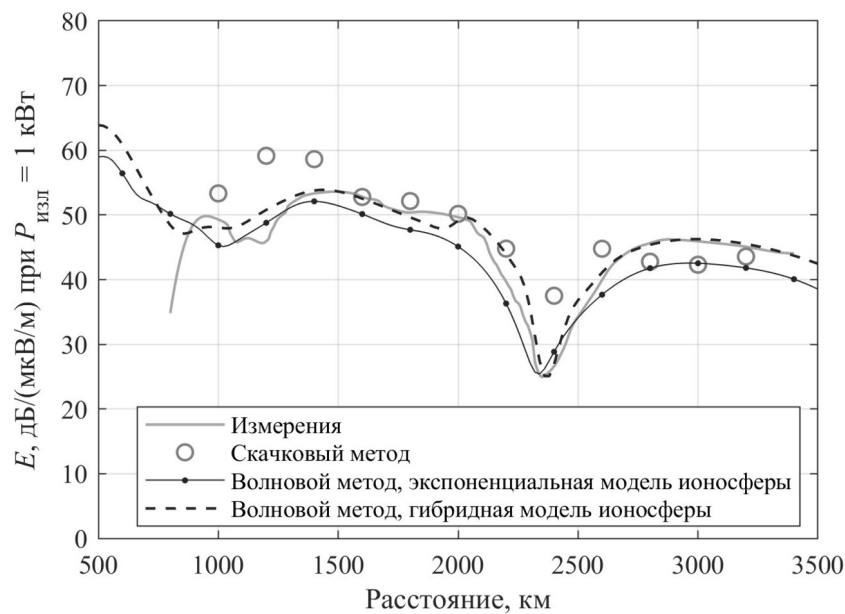


Рис. 7. Графики измерений и прогнозов напряженности поля на радиотрассе Гавайи – Сан-Франциско

Таблица 1. Показатели погрешности прогнозирования

Метод расчета	Показатель	
	МО	СКО
Волновой метод, гибридная модель ионосферы	0,72	1,90
Волновой метод, экспоненциальная модель ионосферы	-2,18	2,38
Скачковый метод	3,14	5,19

Как видно из табл. 1, волновой метод с подобранными параметрами h'_{kn} и h' гибридной модели ионосферы может не только давать наилучшие усредненные результаты (МО = 0,72 дБ), но и наименьшую вариативность прогнозов (СКО = 1,90 дБ).

4. Обсуждение и заключения

Новизна проведенного исследования заключается в том, что разработана методика, позволяющая использовать современные модели геофизических параметров в существующих методах прогнозирования напряженности поля ОНЧ диапазона путем комплексного профилирования проводимости σ и диэлектрической проницаемости ϵ подстилающей поверхности, амплитуды B и наклона D вектора геомагнитного поля и высотных профилей электронной концентрации $N_e(z)$ на основе единого управляющего алгоритма.

При использовании разработанной методики обнаружено, что непосредственный ввод электронной концентрации из модели IRI дает результаты, значительно отличающиеся от прогнозов, выполненных с помощью экспоненциальной модели. Кроме того, в остатках прогнозирования (разнице прогнозов) присутствуют периодические биения, что может свидетельствовать о наличии неконтролируемых эффектов вследствие изменения входных данных. Использование гибридной модели ионосферы дает прогнозы более близкие к исходным, полученным с помощью пакета программ LWPC, при этом периодограмма разницы прогнозов не имеет нежелательных всплесков гармоник основной частоты.

Таким образом, использование модели ионосферы с резким спадом электронной концентрации (резко очерченной нижней границей) при прогнозировании энергетических параметров радиотрасс ОНЧ диапазона волновым методом нежелательно, так как ведет к появлению

нию интерференционных экстремумов по длине радиотрассы, что не наблюдается в ходе практических измерений.

Кроме того, сравнение результатов моделирования с результатами измерений на отдельных радиотрассах показывает, что волновой метод с гибридной моделью ионосферы может давать по сравнению со скачковым методом [6] и волновым методом с экспоненциальной моделью ионосферы [23] лучшую точность при меньшей вариативности прогнозов.

Следует иметь в виду, что использование гибридного профиля ограничено необходимостью подбора параметров биекспоненциального профиля ионосферы h'_{kn} и h' для достижения наилучшего соответствия результатов прогнозирования и практических измерений. Данный вопрос требует отдельного исследования, так как заключается в поиске оптимальных значений h'_{kn} и h' с целью минимизации МО и СКО погрешностей прогнозирования, что может быть выполнено только на достаточно большой выборке данных. Также возникает вопрос о необходимости использования модели IRI, поскольку, как видно из рис. 6, используемая часть профиля IRI достаточно хорошо аппроксимируется экспоненциальной моделью. Указанные вопросы требуют проведения дальнейших исследований.

Литература

1. Li G., Wang Y., Liu C. Analysis of VLF Radio Wave Propagation Characteristics and Its Influence on Underwater Platform Communication // IEEE 3rd International Conference on Communications and Information Systems (ICCIS). 2018. P. 83–87.
2. Madhavilatha T., Naidu P., Devi M. Day to Night Shift in Reflection Height of VLF Radio Waves Derived from IRI Model Electron Density Models // *Studia Geophysica et Geodaetica*. 2023. Vol. 67. P. 183–194.
3. Reinisch B., Song P., Galkin I., Stelmash S., Roche K., Khmyrov G., Bibl K., Kozlov A., McEachen M., Paznukhov V. The VLF Transmitter, Narrowband Receiver, and Tuner Investigation on the DSX Spacecraft // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2023. Vol. 128. № 7. P. 1–33.
4. Nina A. Analysis of VLF Signal Noise Changes in the Time Domain and Excitations/Attenuations of Short-Period Waves in the Frequency Domain as Potential Earthquake Precursors // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. № 2:397.
5. 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.
6. 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.
7. Kuwagaki T. Sheaf Quantization from Exact WKB Analysis // *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*. 2024.
8. Suzuki T., Taniguchi E., Iwamura K. Exact WKB analysis for adiabatic discrete-level Hamiltonians // *Physical Review A*. 2024. Vol. 109. № 2.
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.
10. Xu W., Gu X., Ni B., Wang S., Yang Z., Cheng W., Hu Z.-J., He F., Li B., Chen X., Liu J.-J., Hu H.-Q. Measurements and modeling of the responses of VLF transmitter signals to X-class solar flares at the Great Wall Station in Antarctica // *Space Weather*. Vol. 21. № 4.
11. 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.
12. Типикин А. А., Потапов Д. С., Парафейник Д. В. Результаты исследований по формированию цифровых картографических данных электрических характеристик

- подстилающей поверхности в диапазоне СДВ // Морской вестник. 2023. № S1(16). С. 27–29.
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. № 12(21). P. 3531.
 14. *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. № 13. P. 371.
 15. *Pignalberi A., Bilitza D., Coisson P., Haralambous H., Nava B., Pezzopane M., Prol F., Smirnov A., Themens D., Xiong C.* Validation of the IRI-2020 Topside Ionosphere Options through In-Situ Electron Density Observations by Low-Earth-Orbit Satellites // *Advances in Space Research*. 2024. Vol. 21. № 4:e2022SW003249.
 16. *Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S.* The BGS Candidate Models for IGRF-13 with a Retrospective Analysis of IGRF-12 Secular Variation Forecasts // *Earth, Planets and Space*. 2021. Vol. 73:42.
 17. *Chulliat A., Brown W., Alken P., Beggan C., Nair M., Cox G., Woods A., Macmillan S., Meyer B., Panizza M.* The US/UK World Magnetic Model for 2020–2025: Technical Report. – National Ocean and Atmosphere Administration, 2020.
 18. *Тупикин А. А.* Методика использования моделей геомагнитного поля Земли при прогнозировании энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2024. № 1(61). С. 23–34.
 19. *Тупикин А. А.* Методика использования международной стандартной модели ионосферы при прогнозировании энергетических параметров радиолний диапазона очень низких частот // *Экономика и качество систем связи*. 2024. № 3(33). С. 78–86.
 20. Рекомендация МСЭ-R P.684-7. Прогнозирование напряженности поля на частотах ниже приблизительно 150 кГц. Женева: МСЭ, 2016. 43 с.
 21. *Huang W., Liu B.* Solar Position Algorithm Based on the Kepler Equation // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 11:5449.
 22. *Friedrich M.* Handbook of Lower Ionosphere. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2016. 168 p.
 23. *Тупикин А. А., Пахотин В. А., Помапов 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.
 24. SPAWAR LWPC Longwave Propagation Code v. 2.1. URL: <https://github.com/space-physics/LWPC>. (дата обращения: 05.10.2023).
 25. *Makarov V., Lambert S., Cigan P., DiLullo C., Gordon D.* Robust 1-Norm Periodograms for Analysis of Noisy Non-Gaussian Time Series with Irregular Cadences: Application to VLBI Astrometry of Quasars // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2024. Vol. 136:054503.
 26. *Das S., Rao S., Yang J.* Spectral Methods for Small Sample Time Series: A Complete Periodogram Approach // *Journal of Time Series Analysis*. 2021. Vol. 42. № 2.
 27. *Xu W., Marshall R., Kero A., Turunen E., Drob D., Sojka J., Rice D.* VLF Measurements and Modeling of the D-Region Response to the 2017 Total Solar Eclipse // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2019. P. 1–10.
 28. *Xu W., Marshall R., Bortnik J., Bonnell J.* An Electron Density Model of the D- and E-Region Ionosphere for Transionospheric VLF Propagation // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2021. Vol. 126. № 7:e2021JA029288.

29. Comparison of predicted VLF/LF signal levels with propagation data. 960-TP-74-5. Defense Communications Agency, 1974. 75 p.

Типикин Алексей Алексеевич

к.т.н., начальник отдела Научно-исследовательского института оперативно-стратегических исследований строительства Военно-морского флота Федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Военно-морского флота “Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова”» (НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»), (198514, г. Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Разводная, д. 17), тел. +7 981 940 54 15, e-mail: alextip@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0940-4285, SCOPUS ID: 58752151700.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

A comprehensive technique for profiling geophysical characteristics along the radio waves propagation path in the very low frequency band

Aleksey A. Tipikin¹

¹ Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy»

Abstract: The subject of the study. Results of the electromagnetic field strength forecasting in the very low frequency band highly depends on the accuracy of the input data, such as the underlying surface electrical characteristics, the characteristics of the geomagnetic field and the ionosphere. Currently, modern geophysical models provide sufficiently high accuracy of the initial data for the field strength forecasting, but their implementation is complicated by the disparity of data presentation formats and requirement for software implementations of forecasting methods refinement. The study proposes a comprehensive methodology for using modern geophysical models for profiling geophysical characteristics on the very low frequency band radio path.

Materials and methods. The complex technique was obtained by combining a number of partial techniques and implemented as a program in the Matlab programming language. The initial data are taken from digital global maps of the underlying surface electrical characteristics, geomagnetic models, such as International Geomagnetic Reference Field or World Magnetic Model, and the International Reference Ionosphere model. The technique is based on a cyclic access to the geophysical models which is controlled by the number of parameters such as the Sun zenith angle, the underlying surface conductivity, the geomagnetic azimuth of the radio path and the geomagnetic field amplitude. When the obtained value of one of the control parameters goes beyond the designated interval, the characteristics of the radio path segment are added to the initial data array.

Results. Approved software package for the field strength forecasting has shown that the replacement of the initial data models introduces visible periodic disturbances into the forecast, that take a form of the field strength level pulsation over a distance. The effect was quantified with the corresponding harmonics levels in the periodogram. The analysis showed that periodic disturbances are the result of a sharp decrease in electron density in the International Reference Ionosphere model, therefore, a hybrid ionospheric model has been introduced into the complex segmentation technique, that combines the bi-exponential and International Reference Ionosphere models for a smoother decrease in electron concentration at low altitudes.

Discussion and conclusions. Field strength forecasting with the complex technique revealed that the introduction of a hybrid model gives the least periodic disturbances values of the field strength. However, the use of a hybrid ionosphere model is complicated by the need for a rational selection of the point where takes place the transition from one exponential function to another, therefore, the use of a bi-exponential model requires additional research. Moreover, the further direction of the study is to assess the accuracy of the developed methodology forecasting based on practical measurement data.

Keywords: radio path segmentation, geophysical models, very low frequencies, forecasting, field strength.

For citation: Tipikin A. A., Kompleksnaya metodika profilirovaniya geofizicheskikh kharakteristik na trasse rasprostraneniya radiovoln diapazona ochen' nizkikh chastot [A comprehensive technique for profiling geophysical characteristics along the radio waves propagation path in the very low frequency band]. *Vestnik SibGUTI*, 2025, vol. 19, no. 3, pp. 61-75. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-3-61-75>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Tipikin A. A., 2025

The article was submitted: 05.03.2025;
revised version: 09.04.2025;
accepted for publication 13.05.2025.

References

1. Li G., Wang Y., Liu C. Analysis of VLF Radio Wave Propagation Characteristics and Its Influence on Underwater Platform Communication. *IEEE 3rd International Conference on Communications and Information Systems (ICCIS)*, 2018, pp. 83-87.
2. Madhavalatha T., Naidu P., Devi M. Day to Night Shift in Reflection Height of VLF Radio Waves Derived from IRI Model Electron Density Models. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2023, vol. 67, pp. 183-194.
3. Reinisch B., Song P., Galkin I., Stelmash S., Roche K., Khmyrov G., Bibl K., Kozlov A., McEachen M., Paznukhov V. The VLF Transmitter, Narrowband Receiver, and Tuner Investigation on the DSX Spacecraft. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, vol. 128, no. 7, pp. 1-33.
4. Nina A. Analysis of VLF Signal Noise Changes in the Time Domain and Excitations/Attenuations of Short-Period Waves in the Frequency Domain as Potential Earthquake Precursors. *Remote Sensing*, 2024, vol. 16, no. 2:397.
5. 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*, 2023, no. 5, pp. 12-21.
6. Tipikin A. A., Pakhotin V. A. Metodika rascheta summarnogo polia prostranstvennoi i zemnoi voln diapazona ochen' nizkikh chastot [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.
7. Kuwagaki T. Sheaf Quantization from Exact WKB Analysis. *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik*, 2024. <https://doi.org/10.1515/crelle-2024-0041>.
8. Suzuki T., Taniguchi E., Iwamura K. Exact WKB analysis for adiabatic discrete-level Hamiltonians. *Physical Review A*, 2024, vol. 109, no. 2.
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.
10. Xu W., Gu X., Ni B., Wang S., Yang Z., Cheng W., Hu Z.-J., He F., Li B., Chen X., Liu J.-J., Hu H.-Q. Measurements and modeling of the responses of VLF transmitter signals to X-class solar flares at the Great Wall Station in Antarctica. *Space Weather*, vol. 21, no. 4.
11. Tipikin A. A. Metodika formirovaniia global'nykh tsifrovnykh kart elektricheskikh kharakteristik podstilaishchei 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.
12. Tipikin A. A., Potapov D. S., Parafeinik D. V. Rezultaty issledovaniy po formirovaniyu tsifrovyykh kartograficheskikh dannykh elektricheskikh kharakteristik podstilaiushchei poverkhnosti v diapazone SDV [The research results on the Obtaining of Digital Cartographic Data of the Electrical Characteristics of the Underlying Surface in the VLF Band]. *Morskoi vestnik*, 2023, no. S1(16), pp. 27-29.
 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, no. 12(21), pp. 3531.
 14. 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, no. 13, pp. 371.
 15. Pignalberi A., Bilitza D., Coïsson P., Haralambous H., Nava B., Pezzopane M., Prol F., Smirnov A., Themens D., Xiong C. Validation of the IRI-2020 Topside Ionosphere Options through In-Situ Electron Density Observations by Low-Earth-Orbit Satellites. *Advances in Space Research*, 2024, vol. 21, no. 4:e2022SW003249.
 16. Brown W., Beggan C., Cox G., Macmillan S. The BGS Candidate Models for IGRF-13 with a Retrospective Analysis of IGRF-12 Secular Variation Forecasts. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73:42.
 17. Chulliat A., Brown W., Alken P., Beggan C., Nair M., Cox G., Woods A., Macmillan S., Meyer B., Panizza M. *The US/UK World Magnetic Model for 2020–2025: Technical Report*. National Ocean and Atmosphere Administration, 2020.
 18. Tipikin A. A. Metodika ispol'zovaniia modelei geomagnitnogo polia Zemli pri prognozirovaniy energeticheskikh parametrov radiotras diapazona ochen' nizkikh chastot [Forecasting Radio Path Energy Parameters in the Very Low Frequency Band Using Earth's Geomagnetic Field Models]. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2024, no. 1(61), pp. 23-34.
 19. Tipikin A. A. Metodika ispol'zovaniia mezhdunarodnoi standartnoi modeli ionosfery pri prognozirovaniy energeticheskikh parametrov radiolinii diapazona ochen' nizkikh chastot [The Technique of Radio Path Energy Parameters Forecasting in the Very Low Frequency Band Using International Standard Ionosphere Model]. *Ekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2024, no. 3(33), pp. 78-86.
 20. ITU-R Recommendation P.684-7. *Prediction of Field Strength at Frequencies Below about 150 kHz*. Geneva, ITU, 2016. 43 p.
 21. Huang W., Liu B. Solar Position Algorithm Based on the Kepler Equation. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 11:5449.
 22. Friedrich M. *Handbook of Lower Ionosphere*. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2016. 168 p.
 23. Tipikin A. A., Pakhotin V. A., Potapov D. S. Metodika avtomaticheskogo profilirovaniia elektricheskikh kharakteristik podstilaiushchei poverkhnosti 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(3), pp. 66–73.
 23. SPAWAR LWPC Longwave Propagation Code v. 2.1, available at: <https://github.com/space-physics/LWPC>. (accessed: 05.10.2023).
 24. Makarov V., Lambert S., Cigan P., DiLullo C., Gordon D. Robust 1-Norm Periodograms for Analysis of Noisy Non-Gaussian Time Series with Irregular Cadences: Application to VLBI Astrometry of Quasars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2024, vol. 136:054503. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/ad4b9f>.
 25. Das S., Rao S., Yang J. Spectral Methods for Small Sample Time Series: A Complete Periodogram Approach. *Journal of Time Series Analysis*, 2021, vol. 42, no. 2.
 26. Xu W., Marshall R., Kero A., Turunen E., Drob D., Sojka J., Rice D. VLF Measurements and Modeling of the D-Region Response to the 2017 Total Solar Eclipse. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, pp. 1-10.
 27. Xu W., Marshall R., Bortnik J., Bonnell J. An Electron Density Model of the D- and E-Region Ionosphere for Transionospheric VLF Propagation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, vol. 126, no. 7:e2021JA029288.

29. *Comparison of predicted VLF/LF signal levels with propagation data. 960-TP-74-5*. Defense Communications Agency, 1974. 75 p.

Aleksey A. Tipikin

Candidate of Sci. (Engineering), Chief of Department, Research Institute for Operational and Strategic Research of the Navy Development of the Federal State-Funded Military Educational Institution of Higher Professional Education «Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov» (Naval Academy, Russia, 198514, Saint-Petersburg, Peterhof, Razvodnaya st. 17), phone: +7 981 940 5415, e-mail: alextip@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0940-4285, SCOPUS ID: 58752151700.