

МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЛИНИЙ ДИАПАЗОНА ОЧЕНЬ НИЗКИХ ЧАСТОТ

А.А. Типикин, к.т.н., НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова», alextip@mail.ru.

УДК 621.371.3

Аннотация. Проведено исследование возможности внедрения современных геофизических моделей в методику расчета энергетических параметров радиотрасс. Разработана методика использования вертикальных профилей электронной концентрации, полученных с помощью стандартной модели ионосферы, в волновом методе расчета напряженности поля диапазона очень низких частот. Проведено сравнение результатов расчетов, выполненных с помощью экспоненциальной и стандартной моделей ионосферы, получена количественная оценка различий прогнозов.

Ключевые слова: стандартная модель ионосферы; экспоненциальная ионосфера; электронная концентрация; прогнозирование энергетических параметров; диапазон очень низких частот.

THE METHOD OF THE INTERNATIONAL STANDARD IONOSPHERIC MODEL USAGE FOR THE RADIO LINES ENERGY PARAMETERS FORECASTING IN THE VERY LOW FREQUENCY BAND

Aleksey Tipikin, candidate of engineering sciences, Research Institute for Operational and Strategic Research of the Navy Development, Military Research and Educational Center of the Navy «Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov».

Annotation. In the article, we studied the possibility of introducing modern geophysical models into the methodology for calculating the energy parameters of radio lines. We developed a method for using vertical electron density profiles obtained with the standard ionospheric model in a wave method calculation of the field strength in a very low frequency band. We compared calculation results performed with exponential and standard ionospheric models and estimated quantitative differences in forecasts.

Keywords: international standard ionosphere model; exponential ionosphere; electron density; energy parameters forecasting; very low frequency band.

Введение

Прогнозирование энергетических параметров радиолиний является необходимым этапом при планировании применения систем связи [1, 2]. Точность данных прогнозов напрямую влияет на эффективность применения систем общего и специального назначения [3] и зависит от точности самого метода прогнозирования и качества исходных данных, включающих состояние подстилающей поверхности, состояние ионосферы и геомагнитного поля Земли. В работе [4] оценена степень влияния различных моделей геомагнитного поля Земли на результаты прогнозирования напряженности электрического поля в точке приема. В работах [5, 6] обосновано использование цифровых карт электрических характеристик подстилающей поверхности при прогнозировании энергетических параметров радиотрасс и современных ионосферных моделей. В работах [7, 8] описано использование стандартной модели ионосферы при прогнозировании

энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот (ОНЧ) скачковым методом.

В настоящее время одним из наиболее распространенных инструментов прогнозирования работы радиолиний ОНЧ диапазона является пакет программ *LWPC*, разработанный в 1980-х гг. [9, 10], который по настоящее время остается одним из наиболее удобных для использования программных пакетов, реализующих волновой метод прогнозирования (метод нормальных волн) [11]. Адекватность прогнозов, полученных с помощью *LWPC*, по-прежнему остается на высоком уровне и не вызывает сомнения у исследователей, несмотря на использование экспоненциальной модели ионосферы, считающейся устаревшей [12]. В то же время, представляется актуальным вопрос внедрения современных ионосферных моделей в процесс расчета энергетических параметров радиотрасс ОНЧ диапазона и оценка влияния указанных изменений на конечный результат. В этих целях может быть использована стандартная модель ионосферы (*IRI*) [13-15]. Например, на рис. 1 показаны графики зависимости электронной концентрации, полученные с помощью экспоненциальной модели и стандартной модели ионосферы. Из рисунка видны существенные отличия в характере изменения электронной концентрации с высотой по данным разных моделей, что дает основание предполагать об изменении точности прогнозирования при замене ионосферной модели.

Одним из недостатков использования экспоненциальной модели ионосферы является необходимость в априорных знаниях относительно эталонной высоты отражения h' и масштабного коэффициента β . Поэтому в некоторых работах параметры h' и β выбираются таким образом, чтобы вертикальный профиль электронной концентрации над поверхностью Земли согласовывался с оперативными данными ионосферного зондирования [16].

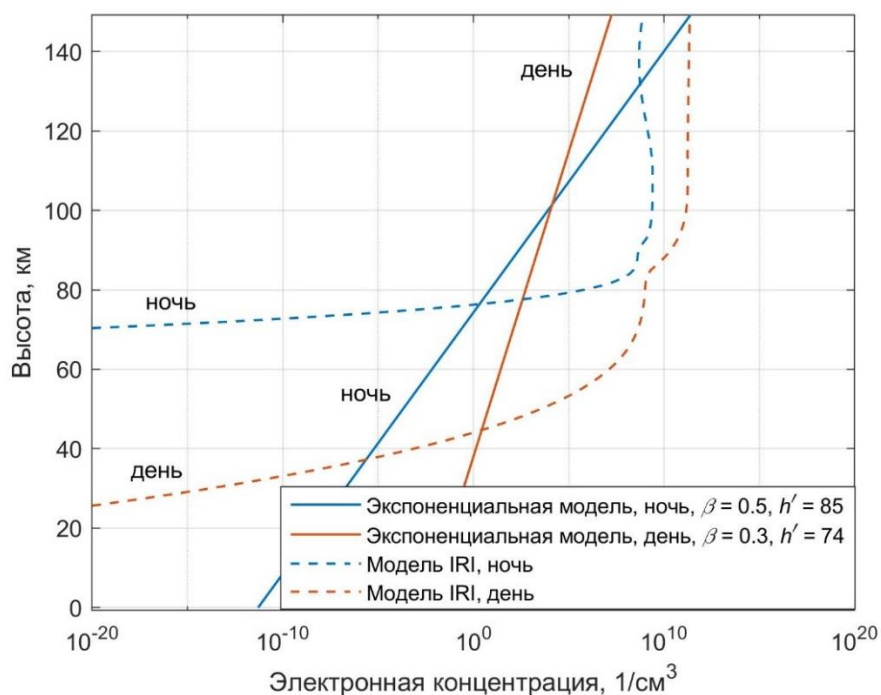


Рисунок 1

IRI является статистической моделью, которая базируется на различных коэффициентах солнечной и геомагнитной активности, а также непосредственно ионосферных индексах. Одним из основных коэффициентов является количество

солнечных пятен R , который использовался в начальных версиях *IRI*. В настоящее время применяется годовое скользящее среднее количества солнечных пятен R_{12} . Исследования показали высокую корреляцию между значениями плазменной частоты слоя f_oF2 , измеренными с помощью зондов, и R_{12} . Индекс $F10.7$ является измеренным значением потока солнечного излучения на длине волны 10,7 см. В настоящее время используется 81-дневное скользящее среднее и 365-дневное скользящее среднее $F10.7$. Глобальный индекс ионосферного зондирования IG получается путем месячного усреднения результатов сравнения прогнозных значений f_oF2 с измеренными значениями f_oF2 . Как и в случае с количеством солнечных пятен, в *IRI* используется годовое скользящее среднее IG_{12} . Кроме указанных коэффициентов, в модели *IRI* существует возможность корректуры данных по результатам текущих ионосферных измерений [13].

Тем не менее, формирование и внедрение в *LWPC* исходных данных, полученных из *IRI*, осложняется различием в представлении выходных и входных данных *IRI* и *LWPC* соответственно. Таким образом, целью данной статьи является разработка частной методики, обеспечивающей использование данных о состоянии ионосферы, полученных с помощью модели *IRI*, в процессе расчета энергетических параметров радиолиний.

Методика использования модели *IRI* для формирования входных данных при выполнении расчетов напряженности поля ОНЧ диапазона

Для замены ионосферной модели предлагается использовать ввод табличной ионосферы во входных файлах программы *LWPM* с помощью команды управления *range table*. Операция ввода требует создания дополнительных текстовых файлов с расширениями «*ndx*» и «*prf*». Файл типа «*ndx*» является файлом ионосферных индексов, в котором указаны два столбца чисел. В первом столбце вводятся расстояния от передатчика до начала каждого сегмента радиотрассы в км, а во втором – индексы ионосферных профилей NNN , соответствующих данным сегментам, где NNN – трехзначный номер индекса. Файл типа «*prf*» является файлом ионосферных профилей, в котором вводится таблица минимум из двух столбцов чисел. В первом столбце указываются высоты в обратном порядке, причем конец таблицы обозначается отрицательной высотой. Во втором столбце указываются данные электронной концентрации или частоты столкновений электронов. Тип вводимых данных во втором столбце таблицы определяется командами *Collision-Frequency-Table* и *Density-table*. С помощью команды *Species* может устанавливаться дополнительное количество заряженных частиц, для которых указываются входные данные. Максимальный аргумент команды равен трем, т.е. вводятся данные для электронов, отрицательных и положительных ионов. В результате должны быть созданы файлы «*fName.ndx*» и «*fNameNNN.prf*», где имя *fName* должно совпадать с именем файла, введенном во входном файле «*inp*» с помощью команды *tx*. Также могут вводиться и другие команды в соответствии с руководством пользователя [17].

Для реализации методики создан скрипт на языке *Matlab*. Блок-схема методики показана на рис. 2.

В соответствии с разработанной методикой входные данные вводятся в структуры *LWPCinput*, *LWPCinput01* и переменную *LWPCpath* (блок 1). В структурах *LWPCinput* и *LWPCinput01* хранятся сведения о рабочей частоте, координатах передатчика, азимутах радиотрасс (или координатах приемников), дата и время выполнения прогноза. В переменную *LWPCpath* вводится путь к программе *LWPM*. Из структуры входных данных *LWPCinput* с помощью

вспомогательной функции *MakeLWPCinput* (блок 2) создается входной файл *fileName.inp*, содержащий команды управления программой *LWPM*, а также скрипт операционной системы *fileName.cmd*. Скрипт операционной системы используется для предварительной очистки выходных директорий и запуска *LWPM* с заданным входным файлом (блоки 3 и 4). Результаты расчетов записываются в *SWG*- и *LWF*-файлы в выходных директориях, а также в лог-файл *fileName.log*, причем реальное имя лог-файла определяется командой *tx* в файле *fileName.inp*.

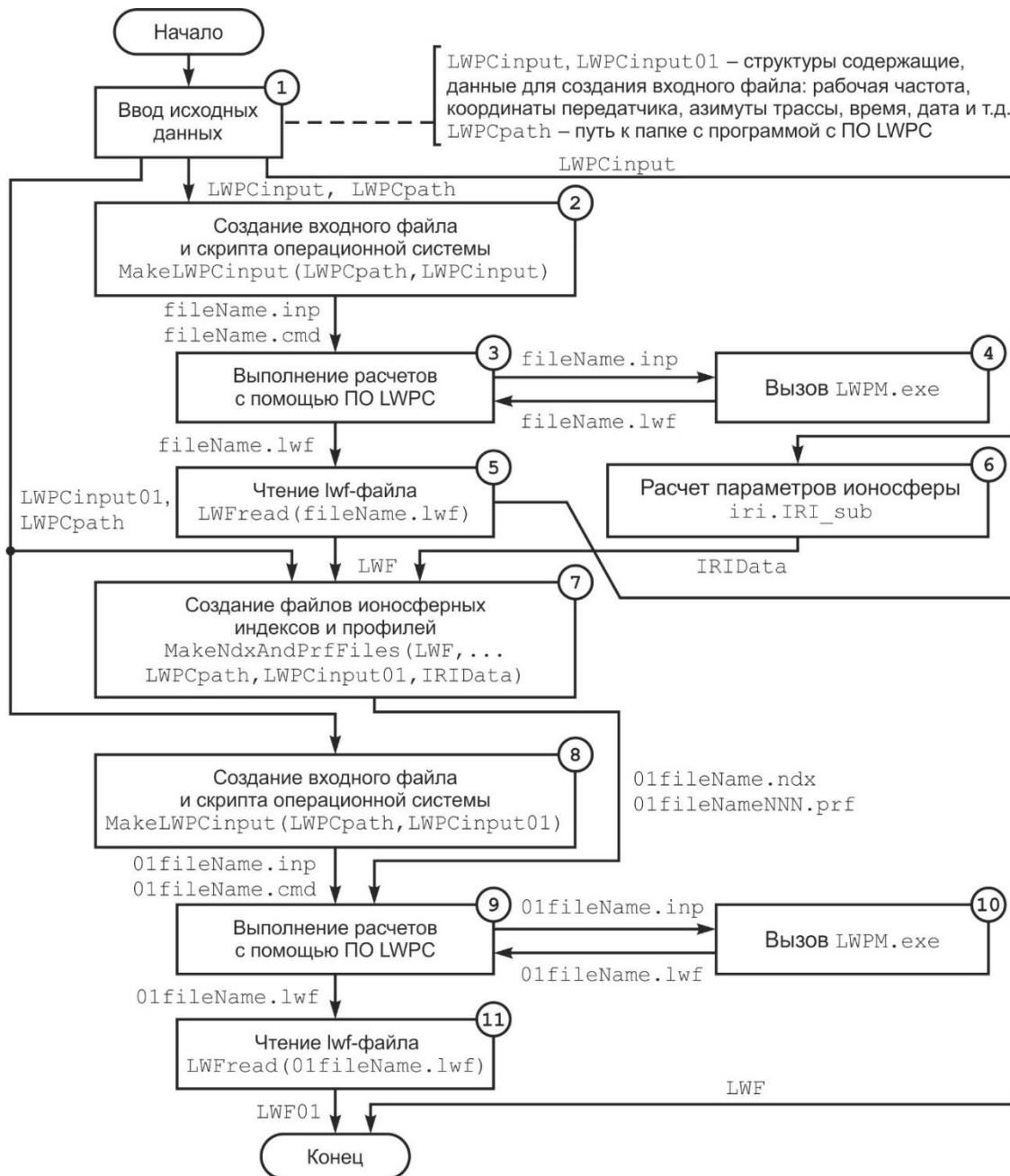


Рисунок 2

С помощью вспомогательной функции *LWFread* из *LWF*-файла извлекаются данные расчетов (блоки 5), которые записываются в структуру *LWF* и используются в блоке 7 для формирования файлов ионосферных индексов типа «*ndx*» и профилей типа «*prf*» с помощью вспомогательной функции

MakeNdxAndPrfFiles. Также в блок 7 поступает структура *IRIData*, в которой хранятся данные концентрации заряженных частиц в зависимости от высоты, рассчитанные на основе модели *IRI* в блоке 6. Полученные файлы *01fileName.ndx* и *01fileNameNNN.prf* поступают в блок 9, куда также вводятся новый входной файл *01fileName.inp* и скрипт операционной системы *01fileName.cmd* из блока 8. На основе указанных файлов выполняются новые расчеты путем повторного вызова программы *LWPM* (блоки 9 и 10). После этого в блоке 11 считывается новый *LWF*-файл, данные которого записываются в структуру *LWF01*. Таким образом, в результате работы скрипта формируются две структуры *LWF* и *LWF01*. В первой структуре данные расчетов базируются на экспоненциальной модели ионосферы, а во второй – на модели *IRI*.

Результаты прогнозирования напряженности электрического поля ОНЧ диапазона

Визуально сравнить эффект от использования разных моделей ионосферы можно на рис. 3, где изображены графики напряженности вертикальной составляющей электрической составляющей поля на частоте 10,2 кГц. Передатчик мощностью 10 кВт расположен в точке с координатами 46.366° с.ш., 98.336° з.д., азимут радиотрассы 240° (рис. 4). Данные для расчетов средствами *LWPC* взяты на 22:00 15 апреля. Данные для расчетов с помощью модели *IRI* взяты на такое же время и дату 2015 г.

Как видно из рис. 3, разница в прогнозируемых значениях напряженности поля может быть существенной и на отдельных участках превышает 10 дБ.

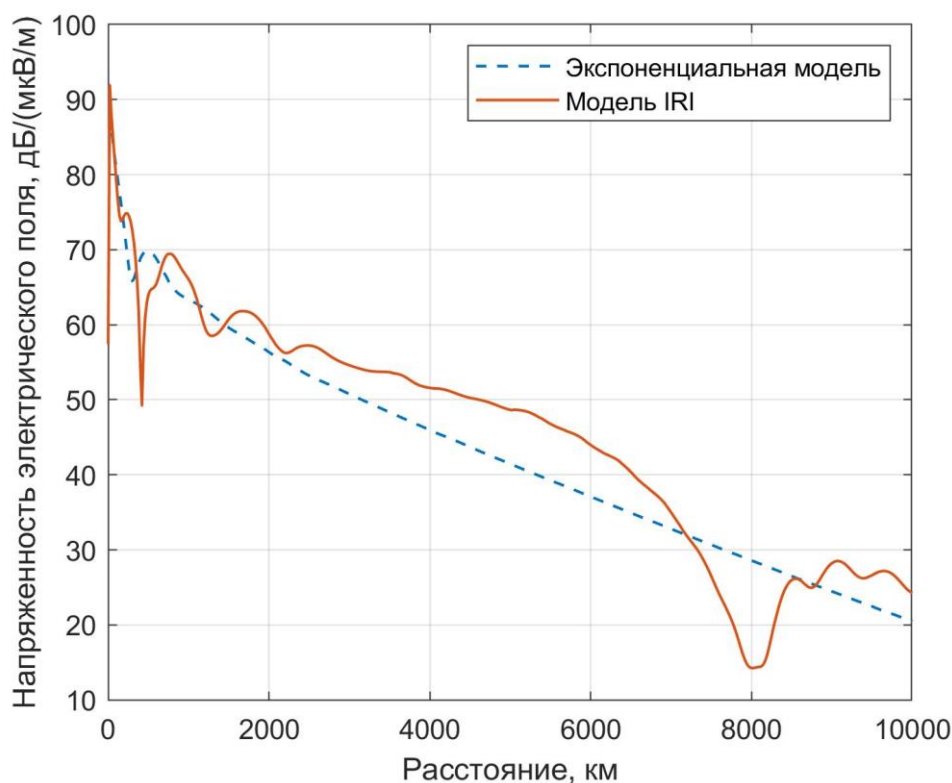


Рисунок 3



Рисунок 4

Для выполнения количественной оценки различий прогнозирования рассчитана разница прогнозов, которая для каждого i -го прогноза, характеризующегося своей совокупностью исходных данных (длина трассы, частота, время и т.д.), вычисляется по формуле [18; 19]:

$$e_i = x_i - y_i, \quad (1)$$

где: $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ – результаты прогнозирования (вариант 1), а $y_i = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ – результаты прогнозирования (вариант 2).

На рис. 5 показаны разницы прогнозных значений, где абсолютная средняя разница прогнозирования рассчитывается по формуле [20]:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i|. \quad (2)$$

Здесь N – количество серий расчетов для каждого значения расстояния от передатчика до точки приема. Каждая серия прогнозов получена для тех же исходных данных и азимутов радиотрассы от 0° до 336° с шагом 24° . Графики сглажены путем вычисления скользящего среднего по 50 элементам выборки.

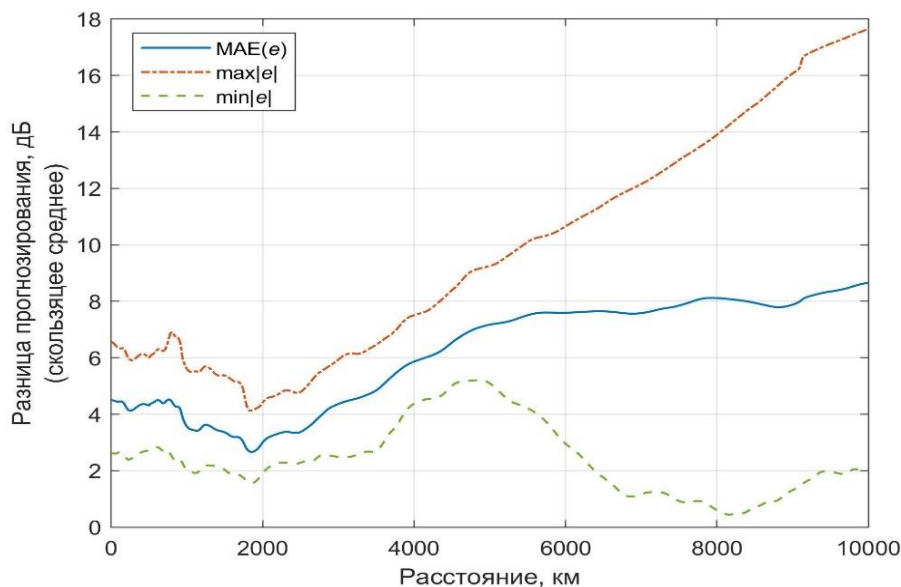


Рисунок 5

Как видно из рисунка, начиная с длины радиотрассы 2000 км, средняя абсолютная разница возрастает и достигает величины приблизительно 8 дБ на расстоянии 10000 км. На достаточно большой выборке результаты, полученные с помощью различных методик расчета, можно рассматривать как две случайные величины. Если основной вклад в результат расчетов при изменении системы входных данных вносит погрешность модели, то обе случайные величины должны иметь одинаковый закон распределения, возможно, с отличающимися математическим ожиданием (МО) и среднеквадратичным отклонением (СКО). Поэтому стандартизированные выборки (нормированные с учетом МО и СКО) должны быть однородными [18; 21]. В противном случае – при наличии существенных различий в результатах, обусловленных изменением системы входных данных, – однородность выборок должна отклоняться статистическими критериями, например, критерием Колмогорова-Смирнова. На рисунке 6 показаны гистограммы стандартизированных выборок, полученных с помощью методик расчета с использованием экспоненциальной модели ионосферы и модели *IRI*. Однородность выборок отклонена критерием Колмогорова-Смирнова на уровне значимости 5%.

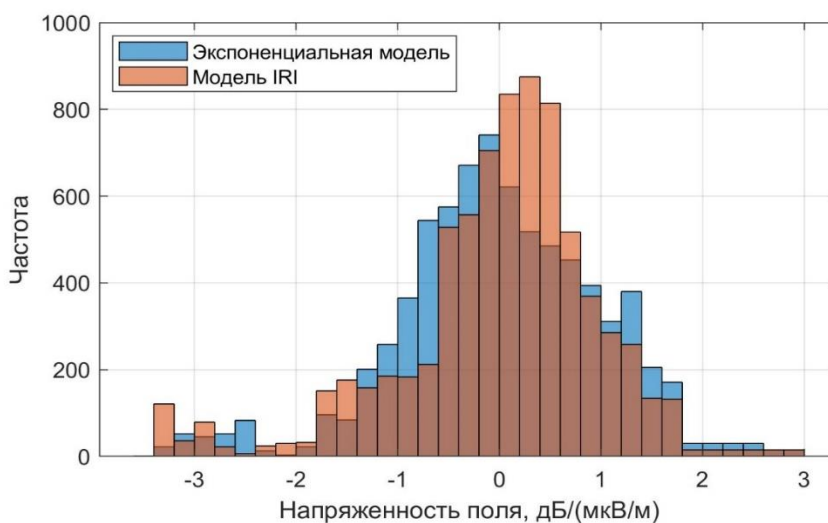


Рисунок 6

Заключение

Таким образом, средняя абсолютная разница прогнозирования возрастает с расстоянием и по всей длине трассы принимает существенные значения приблизительно от 3 до 8 дБ, а также не является следствием случайного различия входных данных. Это означает, что разница прогнозирования действительно обусловлена значимыми различиями в применяемых моделях. Следовательно, применение *IRI* при прогнозировании заметно отразится в точности прогнозов энергетических параметров радиотрасс ОНЧ диапазона, однако данный факт нуждается в дополнительной проверке и сравнении с результатами измерений на реальных радиотрассах.

Литература

1. 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. – № 1. – P. 3-17. DOI:10.1109/TGRS.2009.2028334.
2. Bradley P.A. IRI and VLF/LF radio service planning. // *Advances in Space Research*, 2001. – № 27. – P. 145-152. DOI:10.1016/S0273-1177(00)00150-2.
3. Шпак В.Ф. Информационные технологии в системе управления силами ВМФ (теория и практика, состояние и перспективы развития). – СПб.: Элмор, 2005. – 832 с.
4. Типикин А.А. Методика использования моделей геомагнитного поля Земли при прогнозировании энергетических параметров радиотрасс диапазона очень низких частот. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*, 2024. – № 1 (61). – С. 23-34. DOI: 10.25686/2306-2819.2024.1.23, EDN: ELLSQJ.
5. 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.
6. 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.
7. Типикин А.А., Пыков Е.В. Уточненная модель высоты точки отражения для методики прогнозирования энергетических параметров радиотрасс в диапазоне очень низких частот // В книге: Труды всеармейской научно-практической конференции «Инновационная деятельность в ВС РФ», 2023. – С. 15-23.
8. 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.
9. Ferguson J.A. Longwave Propagation Capability; Full FORTRAN Release: Version 1.0. TD 1847 – San Diego: Naval Ocean Systems Center, 1990.
10. Ferguson J.A. Computer Programs for Assesment of Long Wavelength Radio Communications; Version 1.1: User's Guide and Source Files. TD 2394 – San Diego: Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center. RDT&E Division, 1993.
11. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение радиоволн в волноводном канале Земля-ионосфера и в ионосфере. – М.: Наука, 1994. – 152 с.
12. Gasdia F., Marshall R.A. A new longwave mode propagator for the Earth-ionosphere waveguide // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021. DOI:10.1109/TAP.2021.3083753.

13. Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // *Adv. Radio Sci.*, 2018. – № 16. – P. 1-11. DOI:10.5194/ars-16-1-2018.
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 // *MDIP Remote Sens*, 2020. – № 12 (21). – P. 3531. DOI:10.3390/rs12213531.
15. 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. DOI:10.3390/atmos13030371.
16. Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Распространение электромагнитных волн в области высоких широт при различном состоянии ионосферы на частотах системы точного времени «Бета» // *Известия РАН. Серия физическая*, 2021. – Т. 85. – С. 315-320. DOI: 10.31857/S0367676521020034.
17. Ferguson J.A. Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0. User's Guide and Source Files. Technical Document 3030. TD 3030 – San Diego: Space Naval and Systems Center, 1998.
18. Гнатюк В.И. Закон оптимального построения техноценозов: Монография. – Калининград: Издательство КИЦ «Техноценоз», 2019. – 940 с.
19. 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.
20. 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.
21. Лапшов Д.Я., Когновицкий О.С. Статистические особенности канала связи с морским подвижным объектом // В книге: *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей*, 2014. – С. 264-268.