

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
И УСТРОЙСТВ

MODELING OF PROCESSES  
AND DEVICES

УДК 551.510.535

## Прогнозирование максимально-применимых частот КВ-радиолиний по данным вертикального зондирования ионосферы\*

А.А. ВАСЕНИНА

644009, РФ, г. Омск, ул. Масленникова, 231, ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения», научный сотрудник, заместитель заведующего научно-исследовательской лабораторией. E-mail: [vas.al.an@rambler.ru](mailto:vas.al.an@rambler.ru)

В работе приводится описание методики по расчету критической частоты ионосферы на основе разложения эмпирической базы данных во временные ряды Фурье. Рассмотрен способ адаптации модели с использованием значений числа солнечных пятен и индекса солнечной активности  $F_{10.7}$ . Указана возможность коррекции по данным текущей диагностики среды, в частности с применением измерений станций вертикального зондирования ионосферы. Представлены результаты анализа эффективности обеих методик в виде значений среднеквадратического отклонения от экспериментальных данных на период времени июнь–июль 2014 года. Показано, что использование оперативных данных вертикального зондирования для оценки индекса солнечной активности в 15 % случаев может привести к резкому возрастанию ошибки. Для устранения этой проблемы предложена методика совместного использования экспериментальных данных, позволяющая исключить вероятность появления критических ошибок, обусловленных наличием локальных неоднородностей в области расположения корректирующей станции. Представлены результаты статистического анализа, подтверждающие работоспособность разработанной методики. Подробно описан алгоритм по расчету максимально-применимых частот коротковолновых трасс различной протяженности, основанный на теореме об эквивалентности и законе секанса, в котором фигурируют всего два параметра ионосферы: критическая частота и коэффициент распространения. Проведена оценка эффективности применения алгоритма совместно с различными методиками прогнозирования критической частоты путем сравнения с экспериментальными данными ионограмм наклонного зондирования. Показано, что представленная методика коррекции индекса солнечной активности позволяет уменьшить ошибку прогнозирования не только критической частоты, но и максимально-применимых частот для односкачковых трасс протяженностью до 3000 км.

**Ключевые слова:** моделирование ионосферы, критическая частота ионосферы, индексы солнечной активности, адаптирующий параметр, коэффициент распространения, максимально-применимая частота, вертикальное зондирование ионосферы, билинейная интерполяция

DOI: 10.17212/1814-1196-2014-4-79-88

### ВВЕДЕНИЕ

Качество функционирования коротковолновых (КВ) систем дальней связи напрямую зависит от текущих параметров ионосферы. Ни электрические свойства наземного зондирования, ни создаваемая система наблюдений за ионосферой со спутников не могут дать полной информации в режиме реального времени для всей поверхности Земли.

В связи с этим широкое применение получили ионосферные модели, позволяющие не только восстановить профиль электронной концентрации  $N(h)$  [1–3], но и, как следствие, определить одну из основных характеристик КВ-связи – максимально применимую частоту (МПЧ) [4, 5]. МПЧ – это наивысшая частота, на которой возможна радиосвязь при угле излу-

---

\* Статья получена 31 июля 2014 г.

чения, необходимом для получения отраженного сигнала в заданной точке. Волны с частотами, большими МПЧ, не возвращаются к земной поверхности, а уходят в космическое пространство.

Использование одних лишь модельных данных при расчете характеристик КВ-радиосвязи может привести к значительным ошибкам, поэтому ведется активная разработка алгоритмов, адаптирующих модель по результатам текущей диагностики одного из параметров среды.

В работе проводится оценка точности моделирования критической частоты ионосферы (МПЧ при угле падения 90 градусов) с использованием в качестве адаптирующего параметра результатов вертикального зондирования (ВЗ) и значений индекса солнечной активности  $F_{10.7}$ . Предложена методика совместного применения экспериментальных данных, позволяющая уменьшить погрешность вычислений, в том числе и максимально применимых частот односкачковых трасс протяженностью до 3000 км.

### 1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРЫ

При моделировании критической частоты ионосферы ( $f_k F2$ ) использовалось разложение эмпирической базы данных во временные ряды Фурье согласно рекомендации Сектора радиосвязи Международного союза электросвязи – МСЭ-R (ITU-R) [6]:

$$f_k F2(\lambda, \theta, T) = a_0(\lambda, \theta) + \sum_{j=1}^H \left[ a_j(\lambda, \theta) \cos(jT) + b_j(\lambda, \theta) \sin(jT) \right], \quad (1)$$

где  $\lambda$  – географическая широта ( $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$ );  $\theta$  – восточная географическая долгота ( $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ) (отсчитывается на восток от Гринвичского меридиана);  $T$  – всемирное координированное время (UTC), представленное в виде угла ( $-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$ );  $H$  – максимальное количество гармоник, используемых для представления суточных вариаций. Значения коэффициентов Фурье  $a_j(\lambda, \theta)$  и  $b_j(\lambda, \theta)$  зависят от географических координат и могут быть представлены в виде рядов:

$$\begin{aligned} a_j(\lambda, \theta) &= \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 0, 1, 2, \dots, H, \\ b_j(\lambda, \theta) &= \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta), \quad j = 1, 2, \dots, H, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $G_k(\lambda, \theta)$  – сферические функции Лежандра;  $K = 75$ ,  $H = 6$ .

Глобальные функции  $G_k(\lambda, \theta)$  соответствуют каждому коэффициенту Фурье. Следовательно, выражение (1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} f_0 F2(\lambda, \theta, T) &= \sum_{k=0}^K U_{0,k} G_k(\lambda, \theta) + \\ &+ \sum_{j=1}^H \left[ \cos(jT) \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k(\lambda, \theta) + \sin(jT) \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k(\lambda, \theta) \right]. \end{aligned}$$

Коэффициенты разложения для всех месяцев в году при двух уровнях солнечной активности [7, 8] (низкой, когда число солнечных пятен  $W$  равно 0, и высокой, когда  $W = 100$ ) взяты

из эмпирической базы ITU-R, основанной на результатах измерений мировой сети станций ВЗ (ионозондов), станций некогерентного рассеяния и ракетных измерений. Последнее обновление можно найти на сайте НАСА <http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/ionospheric/iri/iri2011>. Вычисление  $f_k F2$  для других значений  $W$ , согласно рекомендации ITU-R, реализуется с помощью билинейной интерполяции по формуле

$$f_k F2(W) = \frac{100 - W}{100} f_0 + \frac{W}{100} f_{100}, \quad (3)$$

где  $f_0$  и  $f_{100}$  – критические частоты при  $W = 0$  и  $W = 100$  соответственно.

Как показали ранее проведенные исследования [9–11], в качестве адаптирующего параметра вместо числа солнечных пятен целесообразней использовать индекс солнечной активности, напрямую связанный с потоками электромагнитного излучения Солнца, – поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см ( $F_{10,7}$ ), применяя соотношение [3]:

$$W = \left( 167\,273 + (F_{10,7} - 63,7)1123,6 \right)^{0,5} - 408,99. \quad (4)$$

Значения индекса  $F_{10,7}$  размещены на сайте <http://www.spaceweather.com>.

Коррекцию алгоритма по вычислению критической частоты можно проводить и по результатам текущей диагностики среды, в частности по данным вертикального зондирования [4, 7, 12, 13]. Для этого производится выбор корректирующей станции, по измерениям которой проводится оценка  $W$ , а полученное значение используется в качестве адаптирующего параметра для всех остальных точек. В данном случае также воспользуемся билинейной интерполяцией

$$W = \frac{f_{\text{ion}} - f_0}{f_{100} - f_0} 100, \quad (5)$$

где  $f_{\text{ion}}$  – критическая частота ионосферы, полученная по результатам ионозондовых измерений.

Точность моделирования критической частоты с использованием двух вышеописанных методик будем определять, проводя сравнение с экспериментальными данными станций ВЗ, список которых представлен в табл. 1. Для этого по данным каждого из пяти ионозондов оценивается индекс  $W$  (выражение (5)) и подставляется в формулу (3) для вычисления  $f_k F2$  в точках с координатами оставшихся четырех станций.

Таблица 1

Координаты станций вертикального зондирования

Наименование станции	Асенс	Лопарская	Москва	Салехард	Тромсо
Координаты	38,0° с.ш., 23,6° в.д.	68,0° с.ш., 33,0° в.д.	55,5° с.ш., 37,3° в.д.	66,5° с.ш., 66,7° в.д.	69,7° с.ш., 19,0° в.д.

Результаты статистического анализа в виде значений среднеквадратичного отклонения (СКО) относительно данных ионозондов на период июнь–июль 2014 года представлены в табл. 2. Результаты первого столбца относятся к первой методике, когда адаптация проводится по значениям индекса  $F_{10,7}$  (формула (4)), в остальных столбцах расположены результаты моделирования с применением адаптации по данным ВЗ (формула (5)), где в качестве корректирующей станции поочередно выбираются ионозонды из табл. 1.

Таблица 2

## Ошибка прогноза критической частоты ионосферы с учетом коррекции

Название станции	СКО, МГц					
Асенс	1,10	–	1,54	1,21	1,39	1,97
Лопарская	0,84	0,85	–	0,55	0,40	0,52
Москва	0,73	0,82	0,70	–	0,62	1,07
Салехард	0,82	0,86	0,44	0,54	–	0,74
Тромсо	1,00	0,99	0,49	0,79	0,64	–

Из табл. 2 видно, что использование данных ВЗ для оценки индекса солнечной активности при прогнозировании критической частоты в большинстве случаев по точности не уступает методике с применением значений  $F_{10,7}$ , а иногда и превосходит ее. Но в 15 % от общего числа рассмотренных случаев наблюдается резкое возрастание ошибки. Чтобы избежать подобного и не отказываться от оперативных данных о состоянии ионосферы, в работе [9] была предложена методика по корректировке индексов солнечной активности. Дальнейшие исследования, проводимые в этом направлении, позволили модернизировать методику и получить обобщенное выражение для адаптирующего параметра.

При выводе формулы рассчитывались значения чисел солнечных пятен по данным корректирующей станции ( $W_{VS}$ ) и с применением значений индекса  $F_{10,7}$  ( $W_{F10}$ ), а также проводилась оценка изменений отклонения  $W_{VS}$  от истинных значений ( $W_0$ ) в зависимости от разности найденных величин ( $W_{VS}-W_{F10}$ ). После аппроксимации полученных значений прямой линией (рис. 1) было получено выражение

$$W = 0,65W_{VS} + 0,65W_{F10}.$$

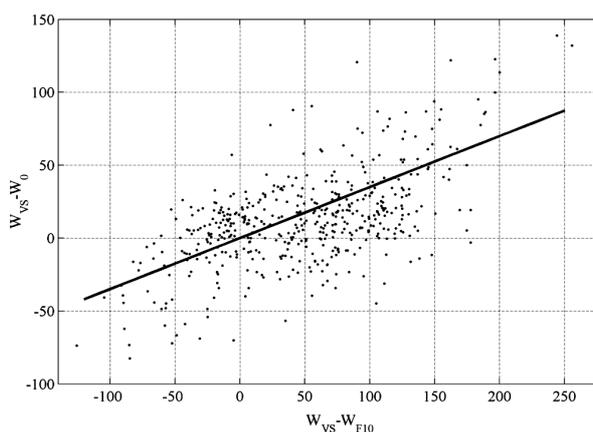


Рис. 1. Аппроксимация экспериментальных данных

В табл. 3 представлены результаты исследования точностных параметров изложенной выше методики. В 55 % случаев коррекция привела к уменьшению погрешности прогнозирования на 30...40 % и лишь в 5 % уступила результатам моделирования с использованием  $F_{10,7}$ . Таким образом, возможно применение данных ВЗ без опасения, что наличие какой-либо локальной неоднородности приведет к критической ошибке прогнозирования  $f_k F_2$ .

Таблица 3

**Ошибка прогноза критической частоты ионосферы**

Название станции	СКО, МГц					
Асенс	1,10	–	1,18	1,07	1,13	1,44
Лопарская	0,84	0,79	–	0,60	0,47	0,40
Москва	0,73	0,70	0,49	–	0,47	0,71
Салехард	0,82	0,77	0,42	0,58	–	0,53
Тромсо	1,00	0,95	0,60	0,83	0,70	–

**2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МПЧ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОЛИНИЙ**

МПЧ КВ-радиолиний можно оценивать с помощью траекторных расчетов, а можно воспользоваться методикой, основанной на теореме об эквивалентности и законе секанса, в которой фигурируют всего два параметра ионосферы. Второй подход менее точен, но прост в исполнении и требует меньших затрат машинного времени. Для его реализации помимо критической частоты необходимо рассчитать коэффициент распространения  $M$ , который находится по аналогии с применением разложения эмпирической базы данных во временные ряды Фурье. Отличие только в значениях коэффициентов разложения, которые также можно найти на сайте НАСА, и параметров  $K = 48, H = 4$  (формула (2));  $M$  – это число, на которое нужно умножить критическую частоту, чтобы получить МПЧ для трассы протяженностью 3000 км [3, 14]:

$$\text{МПЧ}(3000) = M \cdot f_k F2 . \tag{6}$$

Оба параметра ( $M$  и  $f_k F2$ ) рассчитываются для центра заданной трассы протяженностью  $S$ .

Чтобы рассчитать МПЧ( $S$ ), необходимо провести пересчет коэффициента распространения. Для этого рассмотрим траектории распространения электромагнитных волн, отражающихся от ионосферы (рис. 2).

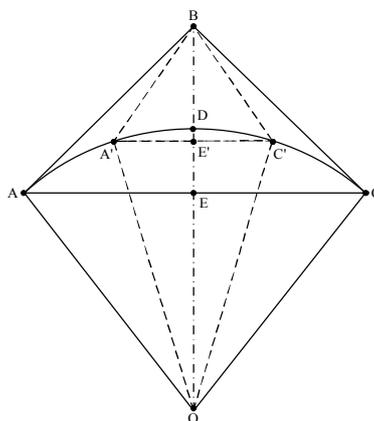


Рис. 2. Отражение электромагнитных волн от ионосферы

Сплошной линией  $ABC$  отображен путь, соответствующий расстоянию по земле 3000 км, прерывистой  $A'BC'$  – путь, соответствующий длине трассы  $S$ . Первая волна падает на ионосферу под углом  $\alpha = \angle ABE$ , вторая – под углом  $\alpha' = \angle A'BE$ . Эти углы можно найти из закона секанса

$$\text{МПЧ} = \frac{f_k F2}{\cos \alpha}.$$

Исходя из геометрических соображений (рис. 2):

$OA = OD = OC = R$ , где  $R$  – радиус Земли;

$OB = R + h_m$ , где  $h_m$  – высота максимума слоя  $F2$ ;

$\phi = \angle AOE$ ,  $\phi' = \angle A'OE$ ;

$$\tan \alpha = \frac{R \sin \phi}{R(1 - \cos \phi) + h_m} = \frac{\sin \phi}{(1 - \cos \phi) + \frac{h_m}{R}}; \quad (7)$$

$$\tan \alpha' = \frac{R \sin \phi'}{R(1 - \cos \phi') + h_m} = \frac{\sin \phi'}{(1 - \cos \phi') + \frac{h_m}{R}};$$

$$\tan \alpha' = \frac{\sin \phi'}{\cos \phi - \cos \phi' + \frac{\sin \phi}{\tan \alpha}}, \quad (8)$$

где  $\alpha = \arccos \left[ \frac{f_k F2}{\text{МПЧ}(3000)} \right] = \arccos \left[ \frac{1}{M} \right]$ , а центральные углы находим по формулам:

$$\phi = \frac{3000}{2R}, \quad \phi' = \frac{S}{2R}.$$

Общая формула для коэффициента распространения для трассы произвольной протяженности запишется как

$$M_S = \sec \left[ \arctan \left( \frac{\sin \phi'}{\cos \phi - \cos \phi' + \sin \phi / \tan [\arccos(1/M)]} \right) \right]. \quad (9)$$

А для нахождения МПЧ трассы произвольной протяженности формула (6) переписывается в виде

$$\text{МПЧ}(S) = M_S \cdot f_k F2. \quad (10)$$

Таким образом, алгоритм по расчету МПЧ можно описать следующими шагами.

1. Определение координат центральной точки заданной трассы.
2. Расчет критической частоты и параметра распространения для этой точки.
3. Вычисление углов падения на ионосферу по формулам (7) и (8).
4. Пересчет коэффициента распространения для заданной трассы по формуле (9).
5. Расчет МПЧ по формуле (10).

Отметим, что в рассматриваемом алгоритме не учитывается сферичность ионосферы, что может вносить дополнительную погрешность при расчетах.

Для оценки точности данного алгоритма проводится сравнение значений МПЧ, рассчитанных по формуле (10), с экспериментальными данными ионограмм наклонного зондирования (НЗ) [4, 15]. На сегодняшний день для изучения Арктики реализован комплекс станций НЗ, данные которого в режиме реального времени можно наблюдать на сайте [www.geophys.aari.ru](http://www.geophys.aari.ru). Географическое расположение станций отображено на рис. 3, треугольниками отмечены станции ВЗ.

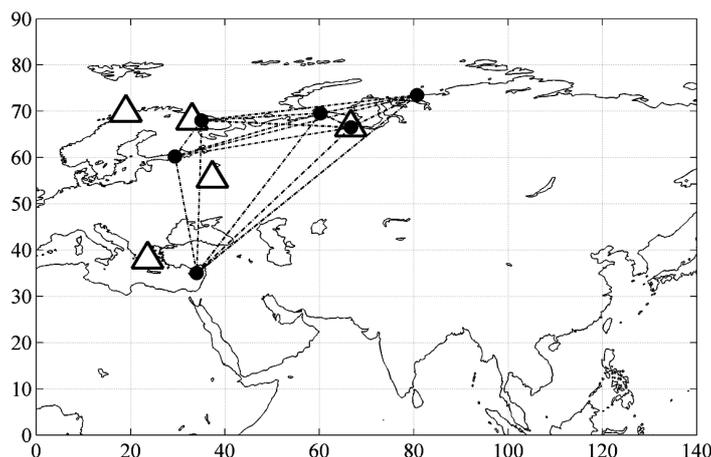


Рис. 3. Расположение станций наклонного (●) и вертикального (Δ) зондирования

В табл. 4 представлены координаты станций наклонного зондирования.

Таблица 4

**Координаты станций НЗ**

Наименование станции	Координаты
Горьковская	60,27° с.ш., 29,38° в.д.
Ловозеро	68,00° с.ш., 35,02° в.д.
Амдерма	69,60° с.ш., 60,20° в.д.
Салехард	66,52° с.ш., 66,67° в.д.
Диксон	73,52° с.ш., 80,68° в.д.
Кипр	35,00° с.ш., 34,00° в.д.

Используя ранее описанный алгоритм пересчета, вычислялись значения МПЧ отображенных на рис. 3 трасс за период июнь–июль 2014 года. При использовании в качестве адаптирующего параметра значений  $F_{10,7}$  СКО составил 2,74 МГц. Результаты статистического анализа с использованием данных корректирующей станции и предложенной методики представлены в табл. 5.

Таблица 5

## Ошибка прогнозирования МПЧ, в мегагерцах

Название корректирующей станции	СКО_ВЗ	СКО_ВЗ_F10,7
Асенс	2,87	2,77
Москва	2,39	2,44
Тромсо	2,09	2,16

Можно отметить, что разработанная методика коррекции индекса солнечной активности позволяет значительно снизить погрешность моделирования при удачном выборе корректирующей станции и исключает появление критических ошибок при наличии локальных неоднородностей. В частности, использование данных ионозонда «Тромсо» на 20 % увеличило точность вычислений максимально применимых частот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены различные варианты адаптации алгоритма по расчету критической частоты ионосферы, в том числе предложена методика совместного использования данных вертикального зондирования и значений индекса солнечной активности  $F_{10,7}$ . Результаты статистического анализа показали, что разработанная методика в ряде случаев позволяет уменьшить погрешность моделирования критической частоты ионосферы на 30...40 %, а МПЧ – на 20 %. При этом отсутствуют случаи возникновения критических ошибок, обусловленные наличием локальных неоднородностей в области расположения корректирующей станции вертикального зондирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cander Lj.R., Leitinger R., Levy M.F. Ionospheric models including the environment // Proceeding of the ESA Workshop on Space Weather, ESA, WPP-155, 11–13 November 1998, ESTEC. – Noordwijk, the Netherlands, 1999. – P. 135–141.
2. Biliza D. Ionospheric models for radio propagation studies // The Review of Radio Science 1999–2002 / ed. by W.R. Stone. – Piscataway, New Jersey: IEEE Press and Wiley, 2002. – P. 625–679.
3. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications: PhD thesis / Delft University of Technology. – Delft, 2009. – 208 p.
4. Иванов В.А., Рябова Н.В., Шумаев В.В. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона: учеб. пособие. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 204 с.
5. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. – М.: Ленанд, 2009. – 496 с.
6. ITU-R reference ionospheric characteristics: Recommendation ITU-R P.1239–2 / International Telecommunication Union. – Approved in 2009–10. – Geneva: ITU, 2009. – 30 p. – (P Series: Radiowave propagation).
7. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
8. Блинов И.В. Солнечная активность // Соросовский образовательный журнал. – 2004. – Т. 8, № 2. – С. 64–68.
9. Васенина А.А. Методика коррекции индексов солнечной активности // Техника радиосвязи. – 2013. – № 2 (20). – С. 27–34.
10. Васенина А.А. Оперативный прогноз критической частоты ионосферы // Труды Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON–2013, Красноярск, Институт нефти и газа Сибирского федерального университета, 12–13 сентября, 2013 г. – Красноярск, 2013. – С. 1–4.
11. Березовский В.А., Васенина А.А., Бензик А.В. Влияние точности определения критической частоты слоя F2 на поведение лучевых траекторий // Омский научный вестник. – 2012. – № 3 (113). – С. 294–298.
12. Рябова Н.В. Радиомониторинг и прогнозирование помехоустойчивых дециметровых радиоканалов: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Йошкар-Ола, 2004. – 343 с.
13. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. – М.: Физматлит, 2007. – 336 с.

14. Bilitza D. International reference ionosphere 1990. NSSDC 90-22 / National Space Science Data Center, World Data Center a for Rockets and Satellites. – Greenbelt, Maryland, U.S.A., 1990. – 155 p.

15. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами / под ред. С.И. Авдюшина. – М.: ИПГ им. акад. Е.К. Федорова, 2008. – 210 с. – (Труды Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова; вып. 87).

*Васенина Алена Андреевна*, научный сотрудник, заместитель заведующего научно-исследовательской лабораторией ОАО «ОНИИП». Основное направление научных исследований – моделирование ионосферы. Имеет более 20 публикаций. E-mail: vas.al.an@rambler.ru

### **Prediction of the maximum-usable frequencies of HF radio links based on vertical ionospheric sounding\***

**A.A. VASENINA**

*PJSC «Omskiy Nauchno Issledovatel'skiy Institut Priborostroeniya», (PJSC «ONIIP»). 231 Maslennikova Street, Omsk, 644009, Russian Federation. E-mail: vas.al.an@rambler.ru*

The article describes an algorithm for the calculation of the ionospheric critical frequency based on the expansion of empirical data in a Fourier time series. The way of adapting the algorithm using both the values of the sunspot number and the solar activity indices  $F_{10.7}$  is considered. The possibility of correction by the current diagnostics of the environment, in particular by using measurements of vertical ionospheric sounding stations is shown. The results of the analysis of the effectiveness of both methods in the form of a standard deviation value for the time period of June-July 2014 are presented. It is shown that the use of operational data of vertical sounding for the evaluation of the solar activity index in 15 % of cases may lead to a sharp increase in errors. To resolve this problem, a technique of sharing experimental data which would eliminate the probability of critical errors caused by the presence of local inhomogeneities in the region of the correction station was proposed. The statistical analysis results confirming the efficiency of the developed method are presented. The algorithm is described in detail based on the calculation of the maximum usable frequencies of shortwave links of different lengths by the theorem of equivalence and the secant law, with the latter featuring only two parameters of the ionosphere, namely the critical frequency of the F2 layer and the propagation factor. The evaluation of the effectiveness of the algorithm in conjunction with various techniques of forecasting the critical frequency by comparison with experimental data of oblique sounding ionograms is carried out. It is shown that the proposed method of solar activity correction index can reduce the error of prediction of not only critical frequencies but also of maximum usable frequencies for single-hop tracks extending up to 3000 km.

**Keywords:** ionospheric modeling, ionospheric critical frequency, solar activity indices, adaptive parameter, propagation factor, maximum usable frequency, vertical ionospheric sounding, bilinear interpolation

#### **REFERENCES**

1. Cander L.J.R., Leitinger R., Levy M.F. Ionospheric models including the environment. *Proceeding of the ESA Workshop on Space Weather*, ESA, WPP-155, 11–13 November 1998, ESTEC, Noordwijk, the Netherlands, 1999, pp. 135–141.
2. Bilitza D. Ionospheric models for radio propagation studies. *The Review of Radio Science 1999–2002*, ed. by W.R. Stone. Piscataway, New Jersey, IEEE Press and Wiley, 2002, pp. 625–679.
3. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. PhD thesis, Delft University of Technology, 2009. 208 p.
4. Ivanov V.A., Ryabova N.V., Shumaev V.V. *Osnovy radiotekhnicheskikh sistem DKM diapazona* [Fundamentals of radio systems HF range]. Ioshkar-Ola, MarGTU Publ., 1998. 204 p.
5. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. *Rasprostraneniye radiovoln* [Radio wave propagation]. Moscow, Lenand, 2009. 496 p.
6. ITU-R reference ionospheric characteristics. Recommendation ITU-R P.1239–2. Approved in 2009–10. P Series: Radiowave propagation, International Telecommunication Union. Geneva, ITU, 2009. 30 p.
7. Bryunelli B.E., Namgaladze A.A. *Fizika ionosfery* [The physics of the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p.
8. Blinov I.V. Solnechnaya aktivnost' [Solar activity]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal – Soros Educational Journal*, 2004, vol. 8, no. 2, pp. 64–68.
9. Vasenina A.A. Metodika korrektsii indeksov solnechnoi aktivnosti [Correction technique of solar activity indices]. *Tekhnika radiosvyazi – Tehnika radiosvazi*, 2013, no. 2 (20), pp. 27–34.

---

\* Received 31 July 2014.

10. Vasenina A.A. [Operational prediction of the critical frequency of the ionosphere]. *Trudy Mezhdunarodnoi IEEE Sibirskoi konferentsii po upravleniyu i svyazi SIBCON-2013* [Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2013), Krasnoyarsk, Russia, September 12–13, 2013], Krasnoyarsk, 2013, pp. 1–4.
11. Berezovskii V.A., Vasenina A.A., Benzik A.V. Vliyanie tochnosti opredeleniya kriticheskoi chastoty sloya F2 na povedenie luchevykh traektorii [The influence of accuracy of F2 critical frequency definition of ray paths behavior]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 2012, no. 3 (113), pp. 294–298.
12. Ryabova N.V. *Radiomonitoring i prognozirovanie pomekhoustoichivyykh dekametrovykh radiokanalov*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Radio monitoring and prediction error-correcting decameter radio. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Ioshkar-Ola, 2004. 343 p.
13. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. *Radiotomografiya ionosfery* [Ionospheric tomography]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 336 p.
14. Bilitza D. International Reference Ionosphere 1990. NSSDC 90-22. National Space Science Data Center, World Data Center a for Rockets and Satellites. Greenbelt, Maryland, U.S.A., 1990. 155 p.
15. Avdyushin S.I., ed. *Trudy Instituta prikladnoi geofiziki imeni akademika E.K. Fedorova*. Vyp. 87. *Radiozondirovanie ionosfery sputnikovymi i nazemnymi ionozondami* [Proceedings of the Institute of Applied Geophysics, Academician E.K. Fedorov. Iss. 87. Radiosounding ionospheric satellite and ground ionosonde]. Moscow, IPG im. akad. E.K. Fedorova, 2008. 210 p.