

УДК: 621.371.33

ББК 39.57

А. И. Агарышев

Иркутск, Россия

Нгуен Минь Жанг

Ханой, Вьетнам

М. А. Портнов

Иркутск, Россия

ВЛИЯНИЕ КВАЗИСИНУСОИДАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХ- И ТРЁХСКАЧКОВЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ИОНОСФЕРЫ

В статье представлены результаты исследований влияния неоднородностей ионосферы на максимальную наблюдаемую частоту (МНЧ) и углы прихода радиоволн, отражающихся два и три раза от ионосферы (мод 2F2 и 3F2). Приведены расчётные МНЧ и углов прихода декаметровых радиоволн методом равных МПЧ в условиях квазисинусоидальных неоднородностей. Проведено сравнение результатов расчетов с результатами измерений.

Ключевые слова: максимально применимая частота, максимально наблюдаемая частота, неоднородность электронной концентрации, характеристики двух- и трёхскачковых отражений от ионосферы, углы прихода модов 2F2, 3F2.

A.I. Agaryshev

Irkutsk, Russia

Nguyen Minh Giang

Hanoi, Vietnam

M.A. Portnov

Irkutsk, Russia

THE INFLUENCE OF QUASI-SINUSOIDAL INHOMOGENUITIES ON THE CHARACTERISTICS OF DOUBLE- AND THREE-HOP IONOSPHER- IC REFLECTIONS

The article presents the results of researching the influence of ionospheric inhomogeneities on the maximum observed frequency (MOF) and the angles of arriving the radiowaves reflected two and three times from the ionosphere (2F2 and 3F2 modes). The authors present the calculated MOF and angles of arrival of decameter radio waves using the method of equal MUF under conditions of quasi-sinusoidal inhomogeneities. The results of calculations are compared with the results of measurements.

Keywords: maximum usable frequency, maximum observed frequency, inhomogeneity of the electron concentration, characteristics of double- and three-hop ionospheric reflections, the angles of arrival of 2F2, 3F2 modes.

Введение

Коротковолновая радиосвязь занимает важное место в области дальней радиосвязи, особенно в труднодоступных местах и малонаселенных пунктах, а также в авиации и на кораблях. Основные преимущества такой системы по сравнению с другими видами связи: требуется маломощный передатчик (от десятка до сотен ватт) для осуществления радиосвязи до нескольких тысяч км, возможность быстрого восстановления работоспособности после повреждения. Для повышения качества радиосвязи необходимо повысить точность прогнози-

рования максимальной применимой частоты и других характеристик распространения радиоволн, в том числе углы прихода, напряжённость поля.

В настоящее время существуют методы прогнозирования МПЧ для односкачковых трасс, например, метод равных скачков [Девис, 1973], метод характеристик [Хазельгров, 1971], метод нормальных волн [Куркин, 1981]. Методы [1–3] обеспечивают прогнозирования МПЧ при отсутствии систематических отклонений между исходными данными и результатами расчетов МПЧ мода 1F2. Расчетные МНЧ2F2 и МНЧ3F2 этими методами дают рассчитанные МНЧ. Это занижение объясняется наличием случайных неоднородностей различных масштабов в среде распространения радиоволн, которые не рассмотрены в этих методах. Повышение точности прогнозирования МНЧ и углов прихода радиоволн этих мод позволит применять более высокие рабочие частоты, что важно ввиду ограничения частотного ресурса, и проектировать КВ антенны с оптимальной диаграммой направленностью за счет уточнения диапазона углов прихода отдельных мод распространения радиоволн.

Цель статьи заключается в моделировании и исследовании влияния регулярных и случайных неоднородностей ионосферы на МНЧ и углов прихода радиоволн мод 2F2, 3F2.

Метод расчета МПЧ с учетом регулярных неоднородностей ионосферы

В горизонтально-неоднородной среде точки отражения радиоволн смещаются от середины трассы в области более высоких критических частот f_0 . Этот фактор приводит к увеличению МНЧ и МПЧ по сравнению с расчетами в горизонтально-однородной ионосфере. Для учета влияния смещения точки отражения на расчетные МПЧ мы используем рисунок 1 и формулу для расчета значения МПЧ трассы с заданной длиной D (км) [Агарышев, 2009]:

$$\text{МПЧ}(D) = K(D) \cdot (0,9 \cdot f_0 F_2) \cdot \sqrt{1 + \tan^2(\varphi)} \quad (1)$$

В формуле (1) $K(D)$ – это коэффициент коррекции на сферичность ионосферы, $K(D) = 1 + a^2 + \frac{a}{4}$, $a = \frac{D}{2 \cdot R_E}$, R_E – радиус Земли, $f_0 F_2$ – критическая ча-

стота слоя F2, φ – угол, под которым радиоволна подает на эквивалентную зеркальную отражающую поверхность.

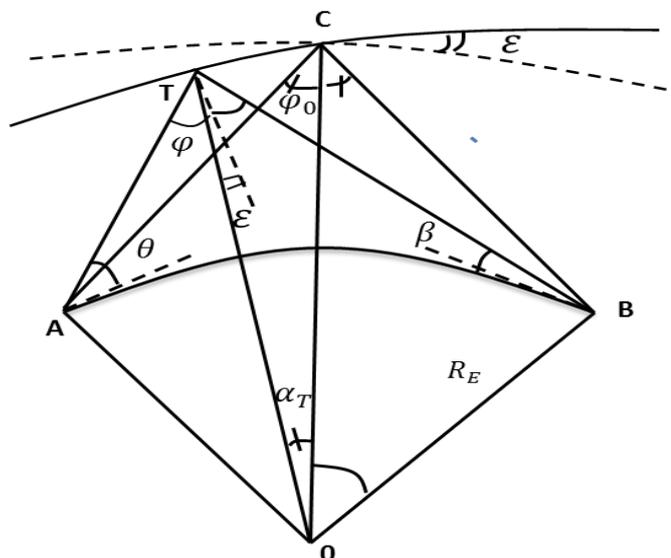


Рисунок 1 – Геометрия отражения радиоволн от эквивалентного наклонного зеркала

С учетом изменения параметров f_0F_2 и M (коэффициент для определения МПЧ на дальности 3000 км) вдоль трассы, выражение расчета МПЧ(D) можно уточнить путем расчёта угла φ . Для этого мы рассчитываем угол наклона эффективного зеркала отражающего слоя по выражению:

$$\tan(\varepsilon) = \frac{h_{02} - h_{01}}{D_0},$$

где $D_0 = 200$ км, h_{01} и h_{02} – действующие высоты в точках, удаленных от середины трассы на одинаковых длин 100 км. Значение h_{01} , h_{02} мы получим с использованием прогностической модели ионосферы [A simple HF propagation method for MUF and field strength: Document CCIR 6/288]. Угол смещения точки отражения от середины линии в сторону уменьшения действующей высоты определится из:

$$\alpha_T \approx \tan(\varepsilon) \cdot \frac{\left[1 + A_0^2 - 2 \cdot A_0 \cdot \cos(\alpha)\right]}{A_0 \cdot \cos(\alpha) - 1},$$

$$\tan(\varphi) \approx \frac{\sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha_T)}{A_0 - \cos(\alpha) \cdot \cos(\alpha_T)}, \quad (2)$$

где $A_0 = 1 + \frac{h_0}{R_E}$, h_0 – действующая высота отражающего слоя в середине трассы.

Подставляя значение ϕ из (2) в (1), мы можем рассчитать значение МПЧ(D) с учетом регулярных неоднородностей ионосферы. Из рисунка 1 также найдутся углы излучения θ и приема β для дальности D (км), когда рабочая частота равна МПЧ для этой трассы. В треугольнике ОТВ имеем:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \phi - \alpha_T - \varepsilon \quad (3)$$

В треугольнике ОАТ имеем:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \phi + \alpha_T + \varepsilon \quad (4)$$

Из (3), (4) следует, что с учетом смещения точки отражения в регулярной неоднородной ионосфере углы приема и излучения отличаются на $2 \cdot |\alpha_T + \varepsilon|$.

Расчет МНЧ мод 2F2 и 3F2 методом равных МПЧ для горизонтально-неоднородной ионосферы

Согласно методу равных МПЧ [Агарышев, 2009], условие равных МПЧ:

$$\text{МПЧ}(D_1) = \text{МПЧ}(D_2) = \text{МНЧ}2F2, \text{ где } D_1 + D_2 = D.$$

Расчет начинается с одинаковых длин скачков $D_1 = D_2 = D/2$ и проводится расчет МПЧ(D_1) и МПЧ(D_2) по формуле (1) и также значения углов излучения и приема (θ_1, β_1) и (θ_2, β_2) для трасс D_1 и D_2 по формуле (3), (4). Если $\text{МПЧ}(D_1) > \text{МПЧ}(D_2)$, тогда уменьшим длину D_1 на 10 км (или другое заданное значение), это значит $D_1 = D_1 - 10$ (км) и $D_2 = D - D_1$, и повторно проводится расчет значений МПЧ(D_1) и МПЧ(D_2), θ_1, β_1 и θ_2, β_2 и рассчитывается абсолютное значение разности $|\text{МПЧ}(D_1) - \text{МПЧ}(D_2)|$. Условие остановки расчета $|\text{МПЧ}(D_1) - \text{МПЧ}(D_2)| \leq 0.1$.

Значение МНЧ2F2 найдется по выражению $\text{МНЧ}2F2 = \frac{\text{МПЧ}(D_1) + \text{МПЧ}(D_2)}{2}$ и β_2

– это угол прихода радиоволн мода 2F2 для трассы длиной D. Если $D_1 < D_2$, то-

гда увеличится D_1 на 10 км и $D_2 = D - D_1$ и проводится вышенаписанный процесс расчета. Алгоритм расчёта МНЧ2F2 иллюстрируется рисунком 2 ниже.

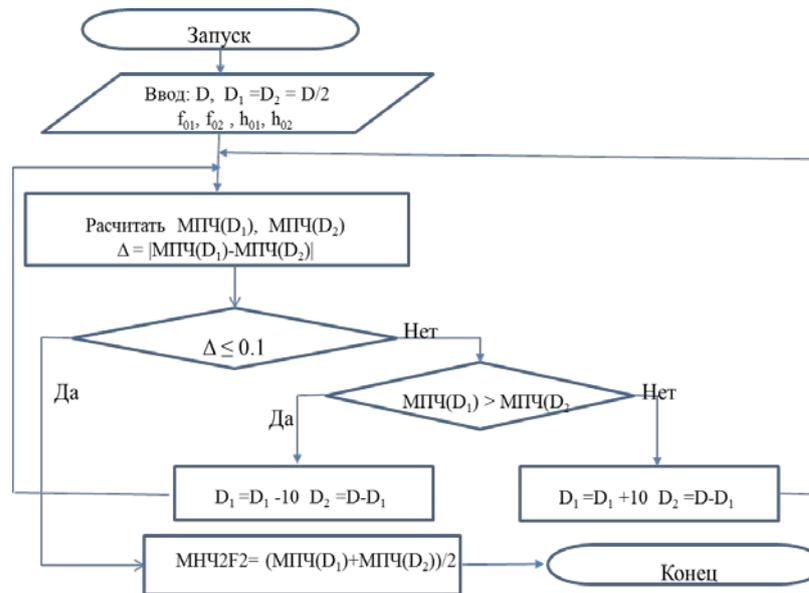


Рисунок 2 – Алгоритм расчета МНЧ 2F2 по методу равных МПЧ

Для того чтобы рассчитать значение МНЧ3F2, мы применим такой же алгоритм, отличие только в том, что мы разделим трассу длиной D на участки D_1 и D_2 . При этом $D_1 = D/3$, $D_2 = 2D/3$. Из (1) для расчета значения МПЧ(D_1) и алгоритм расчета МНЧ2F2(D_2) для участка D_2 . Потом сравним МПЧ (D_1) и МНЧ2F2(D_2), если МПЧ(D_1) > МНЧ2F2(D_2), тогда уменьшится длина D_1 на 10 км (или другое заданное значение) и рассчитываем длину участка $D_2 = D - D_1$, и повторно проводится расчет значений МПЧ(D_1) и МНЧ2F2(D_2). Условие $|\text{МПЧ}(D_1) - \text{МНЧ2F2}(D_2)| \leq 0.1$ остановки расчёта. Значение МНЧ3F2 найдется по

выражению $\text{МНЧ3F2} = \frac{\text{МПЧ}(D_1) + \text{МНЧ2F2}(D_2)}{2}$ и β_2 значение угла прихода радиоволн для участка D_2 . Если МПЧ (D_1) < МНЧ 2F2(D_2), тогда увеличение D_1 на 10 км: $D_1 = D_1 + 10$, $D_2 = D - D_1$ и повторяется алгоритм.

Учет влияния крупномасштабных неоднородностей ионосферы

Для учета крупномасштабных неоднородностей (КМН) используется модель неоднородности ионосферы в виде перемещающегося квазисинусоидального возмущения высоты отражения радиоволн. КМН движется со скоростью v по направлению от передатчика до приемника. Тогда высота отражающего слоя имеет вид функции от расстояния вдоль трассы и от времени:

$$h(x,t) = h_{cp} + A \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda_m} - \Delta\psi(t) + \psi_0\right), \quad (5)$$

где $\Delta\psi(t)$ – величина изменения фазы КМН с учетом движения КМН по времени. $\Delta\psi(t) = \frac{v \cdot \Delta t \cdot 2 \cdot \pi}{\lambda_m} = \frac{v \cdot (T_S - T_0) \cdot 2 \cdot \pi}{\lambda_m}$, где v – скорость движения КМН, T_0 – начальное время для расчета, h_{cp} – среднее значение высоты отражающего слоя, λ_m – длина волнового возмущения; ψ_0 – начальная фаза волнового возмущения, x – дальность от передатчика до рассмотренной точки, A – амплитуда возмущений высоты отражающего слоя.

Из (1) следует выражение угла наклона отражающего слоя $\varepsilon(x,t)$:

$$\varepsilon(x,t) = \arctan\left(\frac{h_{02} - h_{01}}{D}\right) - \varepsilon_m \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda_m} - \Delta\psi(t) + \psi_0\right), \quad (6)$$

где ε_m – амплитуда возмущений угла наклона отражающего слоя; h_{02} , h_{01} – критические частоты отражающего слоя над передатчиком и приемником; D – длина трассы.

Критическая частота в регулярной неоднородной ионосфере с учетом перемещающегося квазисинусоидального возмущения высоты отражения радиоволн определяется формулой:

$$f_o(x,t) = f_{o1} + \frac{(f_{o2} - f_{o1}) \cdot x}{D} + \Delta f_o \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda_m} - \Delta\psi(t) + \psi_0\right) \quad (7)$$

где Δf_o – амплитуда возмущения критических частот, D – длина трассы.

В правой части уравнения (7) член $f_{o1} + \frac{(f_{o2} - f_{o1}) \cdot x}{D}$ – это выражение, учитывающее линейное изменение критической частоты отражающего слоя от пункта передатчика до пункта приемника. Член $\Delta f_o \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x}{\lambda_m} - \Delta\psi(t) + \psi_0\right)$ учитывает влияние КМН на значение критической частоты отражающего слоя. Рисунок 3 показывает возможность отражений радиоволн областями ионосферы с положительными возмущениями критических частот f_o после прохождения радиоволн через случайно-неоднородную среду.

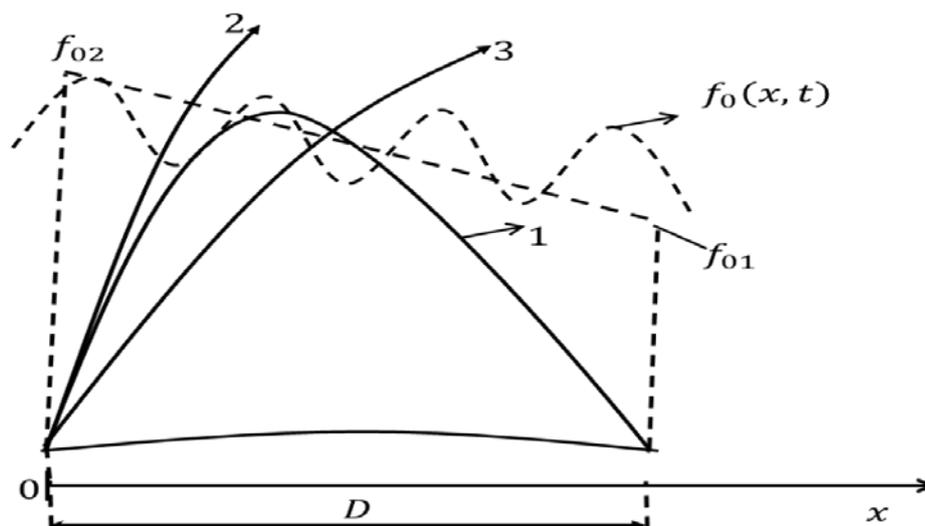


Рисунок 3 – Влияние случайных крупномасштабных неоднородностей

В этом конусе часть лучей преломляется, а часть отражается от областей с критической частотой больше среднего значения $f_o > f_{cp}$, что повышает МНЧ по сравнению с МПЧ, рассчитанными по усредненным значениям f_{cp} .

Сопоставление результатов расчета с результатами измерений углов прихода радиоволн мод 2F2, 3F2

Вышенаписанные методы и алгоритмы расчета МНЧ применялись для расчета МНЧ и углов прихода радиоволн мода 2F2, 3F2 по трассе Хабаровск – Иркутск. Результаты расчета используются для интерпретации результатов измерений углов прихода радиоволн мода 2F2 и 3F2 по этой трассе в [Агарышев, 2009].

При расчете были использованы следующие входные данные: дата 30.01.1979, время проведения расчетов: от 8 ч 15 мин до 10 ч 45 мин, географические координаты пункта передачи (Хабаровск – X): широта 48.55° , долгота 135.25° , пункта приёма (Иркутск – И) с широтой 51.82° , долготой 103.07° , число Вольфа в день проведения эксперимента – 167 по данным из [График среднемесячных чисел Вольфа]. Были использованы следующие параметры КМН: $\epsilon_m = 2.5^0$, $\lambda_m = 380$ км, $\Delta f_o = f_{0F2}(X) - f_{0F2}(И)$ и результаты измерений параметров ионосферы (критическая частота f_{0F2} и высота максимума h_{mF2}) для времени

с 8 ч до 12 ч методом вертикального зондирования. Значение скорости движения КМН составляет 540 км/час [Walton, 1976].

Для определения значения начальной фазы ψ_0 КМН в (5), (6) и (7) мы составим таблицу данных, в которой значение ψ_0 изменится от 0^0 до 360^0 с шагом по углу 10^0 и проводится расчет значения МНЧ2F2 и углов прихода этого мода. Из данных расчета найдено значение ψ_0 , которое равно 80^0 , при котором обеспечено наибольшее соответствие результатов расчета с результатами измерений в [Агарышев, 2009]. В таблице 1 представлены результаты расчета углов прихода мода 2F2 и сравнение результатов расчета и эксперимента.

Таблица 1 – Результаты расчета и измерений углов прихода радиоволн мода 2F2

Время	8ч.	8ч. 15м	9 ч.	10 ч.
По расчетам	14.72 ⁰	14.72 ⁰	19.12 ⁰	22.06 ⁰
По измерениям	Не наблюдался	15 ⁰	19 ⁰	22 ⁰

Из таблицы 1 видно, что результаты расчета углов прихода радиоволн мода 2F2 соответствуют с результатами измерений с погрешностью не более 1^0 для 9ч и 10ч. По результатам расчета МПЧ методом равных скачков и методом равных МПЧ без учета КМН значение МПЧ2F2 в 8 ч.15 мин меньше 16,8 МГц.

Таблица 2 – Результаты методом равных скачков и методу равных МНЧ

Время	Метод равных скачков	Метод равных МНЧ с учетом регулярных неоднородностей	Метод равных МНЧ с учетом регулярных неоднородностей и КМН
8:15	10,92 МГц	12,77 МГц	22,77 МГц
9:00	13,84 МГц	15,10 МГц	28,07 МГц
10:00	16,16 МГц	16,85 МГц	26,85 МГц
11:00	17,04 МГц	17,68 МГц	33,09 МГц

Из таблицы 2 мы видим, что метод равных МНЧ с учетом регулярных неоднородностей и КМН дает наблюдаемые МНЧ. По результатам измерений в [Агарышев, 2009] мод 2F2 начинался наблюдаться с 8 ч 15 мин при рабочей частоте 16.8 МГц.

Для расчета мода 3F2 мы используем такие же исходные данные для расчета мода 2F2 кроме следующих отличий: радиоволны мода 3F2 отражаются от ионосферы на высоте выше, чем мода 2F2. Длина волны и скорость движения КМН для мода 3F2 также больше, чем для мода 2F2. Поэтому при расчете мы зададим следующие параметры КМН:

Длина волны λ_m	390 км
Скорость движения	580 км/ час
Высота отражения волны	$h_{3F2} = h_{2F2} + 30$ км
Начальная фаза	70^0

Результаты расчета характеристик мода 3F2 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты измеренных и рассчитанных углов прихода мода 3F3

Время	8 ч	9 ч	9 ч 15	9 ч 30	9 ч 45	10 ч	10 ч 30
МНЧ3F2(МГц)	10,40	15,37	15,02	12,68	18,60	18,05	19,36
β_{3F2} по расчетам	х	х	х	х	$29,29^0$	$31,9^0$	$29,35^0$
β_{3F2} по измерениям	х	х	х	х	29^0	30^0	$27,5^0$

Обозначение: х – мод не наблюдался.

Таблица 3 показывает, что по расчетам значение МНЧ3F2 больше 16,8 МГц с момента 9 ч 45 мин. Это результаты расчета соответствуют результатам наблюдения мода 3F2. При сравнении результатов расчета с результатами измерений углов прихода радиоволн мода 3F2 в таблице 3 показано, что с учетом КМН и регулярных неоднородностей ионосферы погрешность расчета углов прихода радиоволн мода 3F2 не превышает 2^0 .

Выводы

1) Разработан и экспериментально проверен метод расчета МНЧ мод 2F2, 3F2 с учетом регулярных неоднородностей ионосферы и КМН.

2) Показано, что для радиоволн с частотами, близкими к максимально наблюдаемой частоте углы прихода и МНЧ мод 2F2,3F2 на трассах с регулярной горизонтальной неоднородностью ионосферы определяются равенством МПЧ отдельных скачков, а не скачком с минимальной МПЧ, как считалось ранее.

3) Показана возможность использования радиоволн с частотами больше классической МПЧ за счет увеличения значений МНЧ2F2 и МНЧ3F2 в регулярных и случайных средах.

Библиографический список

1. *Агарышев А. И.* Системы коротковолновой радиосвязи с подавлением многолучевости сигнала: монография / А. И. Агарышев и др. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 160 с.
2. График среднемесячных чисел Вольфа // [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo-dv.ru/geospace/AverageMonthW> (дата обращения: 10.10.2018).
3. *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере / Пер. с англ. под ред. А. А. Корчака. М.: Мир, 1973. 502 с.
4. *Куркин В. И.* Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи / В. И. Куркин, И. И. Орлов, В. Н. Попов. М. : Наука, 1981. 124 с.
5. *Хазельгров Д. Ж.* Лучевая теория и новый метод расчёта траектории // Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. М. : Наука, 1971. С. 36–50.
6. A simple HF propagation method for MUF and field strength: Document CCIR 6/288. – CCIR XVI-th Plenary Assembly. Dubrovnik, 1986. 34 p.
7. Walton, E.K. Observation of seasonal effects in traveling ionospheric disturbances by the directional deviation technique/ E.K. Walton, A.D. Bailey// Radio Sci. – 1976. – V. 11. – P. 175–178.

References

1. A simple HF propagation method for MUF and field strength: Document CCIR 6/288. – CCIR XVI-th Plenary Assembly. Dubrovnik, 1986. 34 p. (in English)
2. *Agaryshev A. I.* (2009). Systems of shortwave radio communication with signal antimultipath: monography / A. I. Agaryshev et al. Irkutsk: ISTU, 2009. 160 p. (in Russian)
3. *Davies K.* (1973). Ionospheric Radio Propagation / Translated by A. A. Korchak. M.: Mir, 1973. 502 p. (in Russian)
4. Diagram of average monthly Wolf numbers // [Electronic resource]. URL: <http://meteo-dv.ru/geospace/AverageMonthW> (accessed date: 10.10.2018). (in Russian)
5. *Hazel'grov D. Zh.* (1971). Ray-path theory and a new method of calculating a trajectory // Ray approximation and issues of radio waves propagation. M. : Nauka, 1971. P. 36–50. (in Russian)
6. *Kurkin V. I.* (1981). Modal-analysis method in shortwave radio communication / V. I. Kurkin, I. I. Orlov, V. N. Popov. M. : Nauka, 1981. 124 p. (in Russian)

7. Walton, E.K. (1976). Observation of seasonal effects in traveling ionospheric disturbances by the directional deviation technique/ E.K. Walton, A.D. Bailey// Radio Sci. – 1976. – V. 11. – P. 175–178. (in English)