

*В. Е. Захаров, Е. В. Бахарь*

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЕРЕДАТЧИКА НА ФОРМИРОВАНИЕ ТРАСС КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

*Проведены численные расчеты лучевых траекторий и поглощения коротких радиоволн в ионосфере. Расчеты проведены для многоскачковых трасс в зависимости от высоты положения передатчика над поверхностью Земли и выбора геофизических условий.*

*The article presents calculations for ray traces and the absorption of short radio waves in the ionosphere. The multi-jump traces are examined on the basis of the altitude of the transmitter and geophysical conditions.*

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, ионосфера, численные эксперименты, уравнение эйконала.

**Keywords:** radio-wave propagation, ionosphere, numerical experiment, eikonal equation.

### Введение

Эффективное применение систем коротковолновой связи требует адекватного модельного описания среды. Трехмерная неоднородность среды приводит к необходимости численного моделирования. Обзор глобальных теоретических моделей ионосферы и нейтральной атмосферы приведен в [1]. Глобальная модель ионосферы и термосферы разработана в РГУ им. И. Канта [2].

В работе при разработке численной модели расчета радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере использованы экспериментальные модели: ионосферы – IRI [3] и нейтральной атмосферы MSIS [4]. Проведена коррекция высотных профилей концентрации электронов модели IRI в авроральной зоне. Коррекция учитывает эффекты корпускулярной ионизации атмосферы авроральными электронами, выпадающими из магнитосферы в ионосферу. Использовано уравнение баланса процессов ионизации и рекомбинации в ионосфере

$$(q_0 + \Delta q) = \alpha (N_{e0} + \Delta N_e)^2, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации,  $N_{e0}$  – фоновая концентрация электронов по модели IRI,  $\Delta q$  – функция корпускулярной ионизации молекул нейтральной атмосферы авроральными электронами, выпадающими из магнитосферы в ионосферу,  $q_0$  – фоновое значение функции ионизации, так что  $q_0 = aNe0^2$ , и с учетом (1) изменение электронной концентрации за счет корпускулярной ионизации равно

$$\Delta N_e = -N_{e0} + \sqrt{N_{e0}^2 + q/\alpha}. \quad (2)$$



Для каждой из двух нормальных мод решение уравнения эйконала методом характеристик сведено к интегрированию системы шести лучевых уравнений для координат и импульсов [5]:

$$\begin{cases} d\mathbf{r}/d\tau = \mathbf{p} - n \, dn/d\mathbf{p} \equiv \mathbf{s}(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \\ d\mathbf{p}/d\tau = n \, dn/d\mathbf{r}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\tau$  – параметр интегрирования вдоль каждой лучевой траектории,  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{s}$  – векторы импульса и луча соответственно,  $r$  – радиус-вектор точки наблюдения,  $n$  – показатель преломления среды.

Численное интегрирование проведено методом Рунге – Кутты [6] в сферических геомагнитных координатах. Алгоритм тестирован на примере плоской волны в параболическом слое:

$$n^2(z) = \begin{cases} 1 - \delta^{-2} \left[ 1 - (1 - z/z_m)^2 \right], & 0 \leq z \leq 2z_m, \\ 1, & z > 2z_m, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\delta = (1 - \varepsilon m) - 1/2$ ,  $\varepsilon m$ ,  $z_m$  и  $\delta$  – параметры слоя.

Комплексные показатели преломления обыкновенной и необыкновенной волн на ионосферных высотах от 60 до 1000 км рассчитаны на основе выражений тензора диэлектрической проницаемости холодной плазмы [7]. Тестирование модели отражено в [4; 8].

### Результаты численных экспериментов формирования многоскачковых трасс коротких радиоволн в волноводе Земля-ионосфера

Расчеты проведены для условий солнцестояния при высокой солнечной активности ( $F_{10,7} = 150$ ). Выбраны две гипотетические передающие станции на поверхности Земли. Одна из них – среднеширотная с географическими координатами (550, 2900), другая – низкоширотная с координатами (150, 2900). Для мирового времени UT=16,65 час положение каждой из станций соответствует полудню.

На рисунке 1 представлены некоторые результаты проведенных численных расчетов. В координатах местное геомагнитное время (ч) – высота (км) над поверхностью Земли показаны лучевые траектории обыкновенной и необыкновенной волн.

В координатах местное геомагнитное время (ч) – интегральное поглощение вдоль каждой из односкачковых траекторий (дБ) над поверхностью Земли показаны графики поглощения обыкновенной и необыкновенной волны. Номер дня в году задан  $N=172$ .

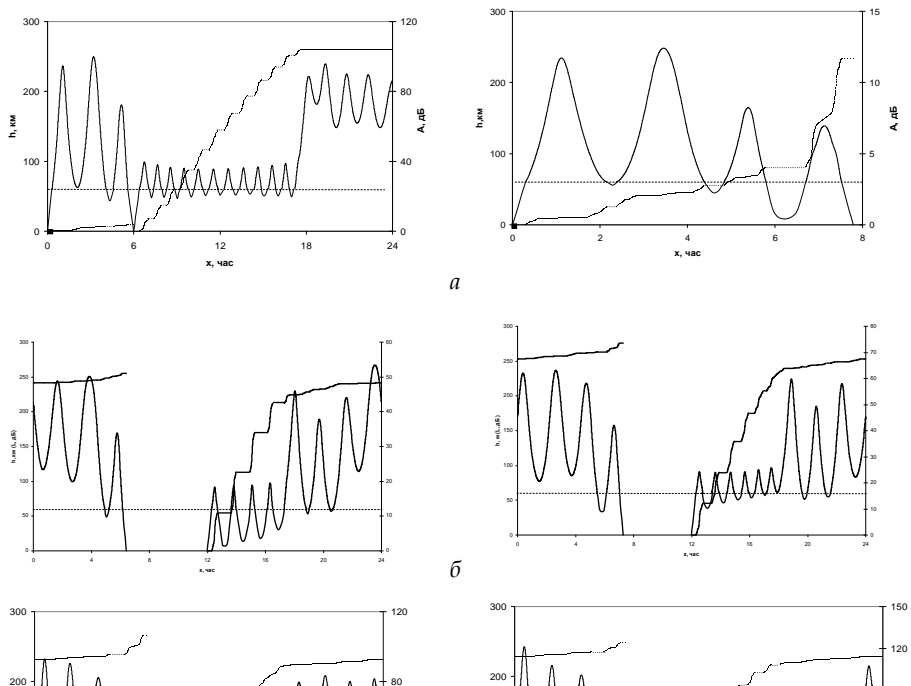




Рис. 1. Результаты численных расчетов траекторий и интегрального поглощения коротких радиоволн в ионосфере ( $f=15$  МГц,  $\alpha=50$ ,  $\beta=900$ ,  $\varphi=150$ ), слева – для обыкновенной волны, справа – для необыкновенной волны:  
 $a$  – UT=4,65 ч;  $b$  – UT=10,65 ч;  $b'$  – UT=16,65 ч;  $c$  – UT=22,65 ч

Приняты обозначения:  $\alpha$  и  $\beta$  – угол места и азимут излучения передатчика,  $\varphi$  – географическая широта передатчика,  $f$  – частота.

Для скачкового механизма распространения коротких радиоволн характерна колебательная зависимость высоты лучевой траектории от местного геомагнитного времени. Если передатчик не расположен в ночном секторе, то в ночных условиях в отличие от дневных нижние точки пологих траекторий, как правило, Земли не достигают. Это обусловлено увеличением среднего радиуса кривизны и подъемом по высоте траектории каждого луча при переходе с дневной на ночную сторону ионосферы. Регистрация сигналов необыкновенных волн при многоскачковом распространении, по сравнению с обыкновенными волнами, может быть затруднена их более сильным поглощением в ионосфере. На пологих траекториях лучей поглощение энергии коротких волн наиболее интенсивно в дневных условиях на высотах D и E-слоев ионосферы. Формирование траекторий радиоволн и их поглощение в ионосфере при прочих равных условиях существенно зависит от того, в каком секторе местного времени расположен передатчик. Наиболее значительные отличия, как видно из результатов расчетов, проявляются в вечернем секторе.



Результаты численных экспериментов по изучению влияния высоты расположения передатчика на формирование радиотрасс

На рисунках 2 и 3 представлены некоторые результаты проведенных численных расчетов.

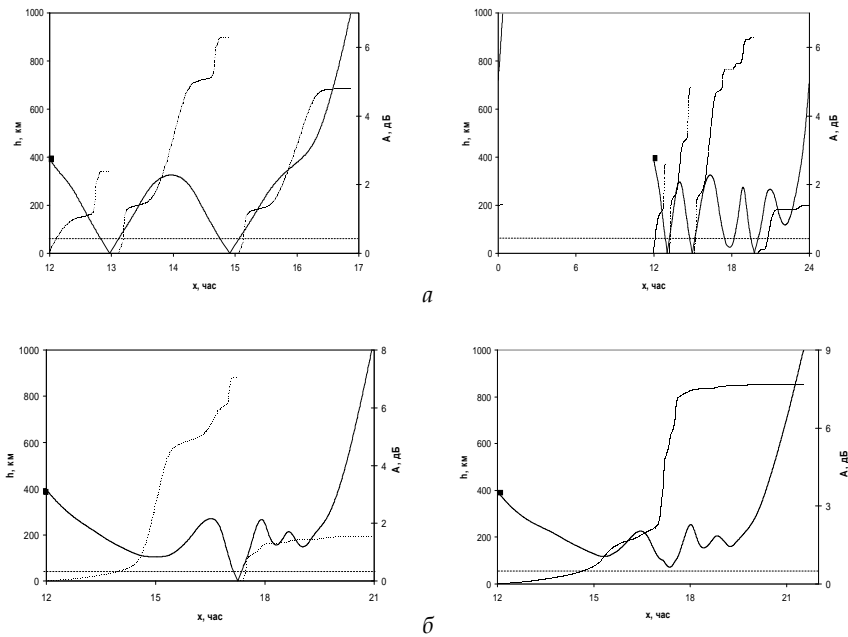


Рис. 2. Результаты численных расчетов траекторий и интегрального поглощения коротких радиоволн в ионосфере ( $f=30$  МГц,  $UT=16,65$  ч,  $\alpha=150$ ,  $\beta=900$ ,  $h=400$  км), слева — для обыкновенной волны, справа — для необыкновенной волны:  
 $a - \varphi=150$ ;  $б - \varphi=550$

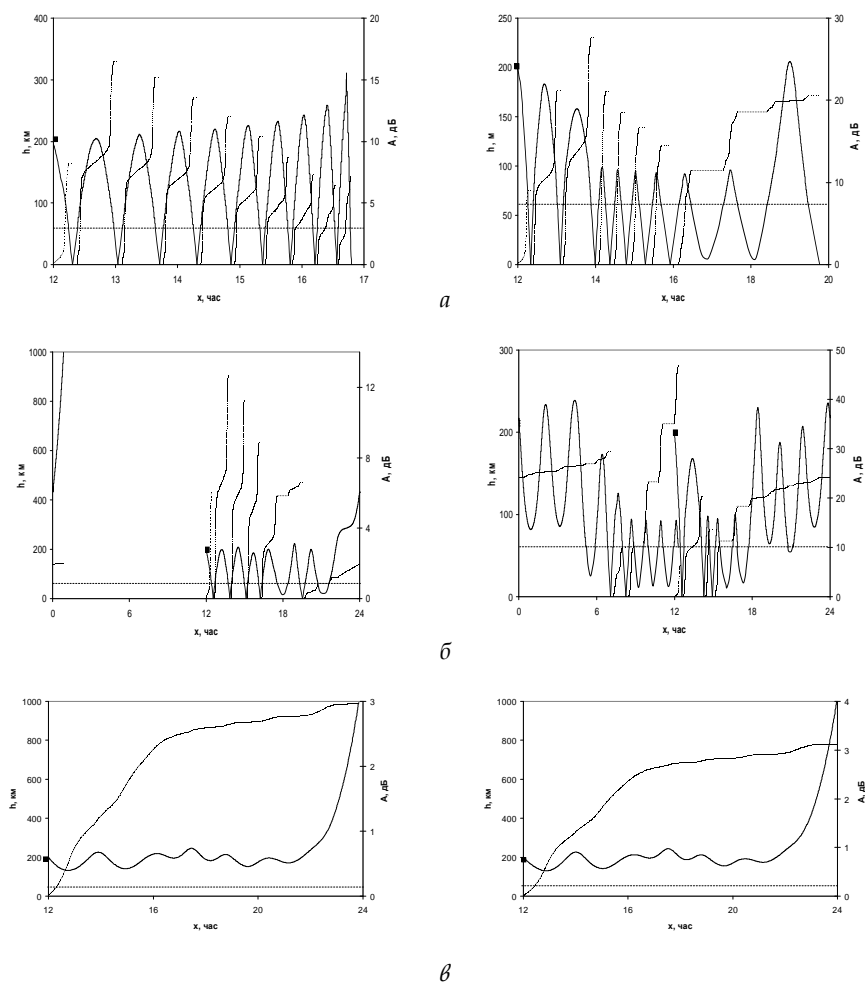


Рис. 3. Результаты численных расчетов траекторий и интегрального поглощения коротких радиоволн в ионосфере ( $UT=16,65$  ч,  $\alpha=50$ ,  $\beta=900$ ,  $\varphi=150$ ,  $h=200$  км), слева — для обыкновенной волны, справа — для необыкновенной волны:  $a - f=10$  МГц;  $б - f=15$  МГц;  $в - f=30$  МГц

Приняты обозначения:  $\alpha$  и  $\beta$  — угол места и азимут излучения передатчика,  $\varphi$  и  $\lambda$  — географическая широта и долгота передатчика, соответственно  $h$  — высота передатчика над поверхностью Земли,  $f$  — частота,  $UT$  — мировое время. Заданы значения  $\beta=900$ ,  $\lambda=2900$ .

При достаточно больших по модулю значениях угла места трассы имеют односкачковый характер. По мере уменьшения этого модуля траектории перестают достигать поверхности Земли за счет рефракции в ионосфере. В дневных условиях (при прочих равных условиях) такое изменение траекторий происходит при меньших по модулю значениях угла места, а уровень поглощения радиоволн — выше, чем в ночных условиях.

При некоторых промежуточных значениях угла места оказываются возможны многоскачковые траектории. Причем для обыкновенной и



необыкновенной мод переход к многоскачковому режиму распространения происходит не одновременно.

Многоскачковый режим может реализоваться в одинаковых условиях не только для одной из двух волновых мод, но и для обеих мод. Геометрически траектории данных мод различны. С ростом частоты происходит модификация траекторий и уменьшение поглощения радиоволн. Так, при положении передатчика в дневном секторе E-слоя ионосферы на более низких частотах ( $f \sim 10 \div 15$  МГц) траектории имеют многоскачковый характер. С ростом частоты ( $f \sim 30$  МГц) пологое распространение волн в E-слое ионосферы сменяется выходом траекторий из ионосферы через F-слой.

### Выводы

- Для скачкового механизма распространения коротких радиоволн характерна колебательная зависимость высоты лучевой траектории от местного геомагнитного времени.
- Регистрация сигналов необыкновенных волн при многоскачковом распространении, по сравнению с обыкновенными волнами, может быть затруднена их более сильным поглощением в ионосфере.
- На пологих траекториях лучей поглощение энергии коротких волн наиболее интенсивно в дневных условиях на высотах D- и E-слоев ионосферы.
- При достаточно больших по модулю значениях угла места трассы имеют односкачковый характер.
- В дневных условиях (при прочих равных условиях) такое изменение траекторий происходит при меньших по модулю значениях угла места, а уровень поглощения радиоволн — выше, чем в ночных условиях.
- При некоторых промежуточных значениях угла места оказываются возможны многоскачковые траектории.
- Многоскачковый режим может реализоваться в одинаковых условиях не только для одной из двух волновых мод, но и для обеих мод. Геометрически траектории данных мод различны.
- С ростом частоты происходит модификация траекторий и уменьшение поглощения радиоволн. Так, при положении передатчика в дневном секторе E-слоя ионосферы на более низких частотах ( $f \sim 10 \div 15$  МГц) траектории имеют многоскачковый характер. С ростом частоты ( $f \sim 30$  МГц) пологое распространение волн в E-слое ионосферы сменяется выходом траекторий из ионосферы через F-слой.

### Список литературы

1. Namgaladze A. A., Martynenko O. V., Volkov M. A., Namgaladze A. N., Yurik R. Yu. High-latitude version of the global numerical model of the Earth's upper atmosphere // Proc. MSTU. 1998. V. 1, №2. P. 23–84.
2. Zakharov V. E., Kaschenko N. M. A study of the coupling between ionospheric convection and thermospheric circulation disturbed by magnetic storm // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXVII Annual Seminar/ ed. Kozelov B. V. Apatity: Kola Sci. Centre, RAS, 2004. P. 21–24.



3. Захаров В.Е., Черняк А.А. Численная модель расчета радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере // Региональная XIII конференция по распространению радиоволн: тез. докл. СПб., 2006. С. 32.
4. Bilitza D. International reference ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001. V. 36, №2. P. 261 – 275.
5. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М., 1980.
6. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / под ред. Дж. Холла [и др.] М., 1979.
7. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М., 1988.
8. Захаров В.Е., Черняк А.А. Исследование многоскачковых радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере // Региональная XIII конференция по распространению радиоволн: тез. докл. СПб., 2007. С. 95.

#### **Об авторах**

В.Е. Захаров – д-р физ.-мат. наук, проф., РГУ им. И. Канта.  
Е.В. Бахарь – асп., РГУ им. И. Канта.

#### **Authors**

V. Zakharov – Prof., IKSUR.  
Ye. Bakhar – PhD student, IKSUR.