

**Эффекты солнечной и геомагнитной активности при распространении необыкновенной моды коротких волн в ионосфере высоких широт**

В.Е.Захаров<sup>1</sup>, К.В.Раубо<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта*

*236041 г. Калининград, ул. Александра Невского, 14*

*E-mail: [vezakharov@outlook.com](mailto:vezakharov@outlook.com)*

*E-mail: [tatarinova180@bk.ru](mailto:tatarinova180@bk.ru)*

*В данной работе представлены результаты эффектов солнечной и геомагнитной активности при распространении необыкновенной моды коротких волн в ионосфере высоких широт. Ключевые слова: ионосфера; короткие волны; солнечная активность, геомагнитная активность, высокие широты.*

**Effects of solar and geomagnetic activity during the propagation of an unusual mode of short waves in the ionosphere of high latitudes**

V.E. Zakharov<sup>1</sup>, K.V. Raubo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Immanuel Kant Baltic Federal University*

*This paper presents the results of the effects of solar and geomagnetic activity during the propagation of an unusual mode of short waves in the ionosphere of high latitudes. Keywords: ionosphere; short waves; solar activity, geomagnetic activity, high latitudes*

**Введение**

При рассмотрении распространения коротких в ионосфере высоких широт следует учитывать влияние солнечной и геомагнитной активности на плазму среды распространения. Решение задач краткосрочного прогноза радиосвязи на высоких широтах является актуальной задачей.

Результаты вычислительных экспериментов дают дополнительную информацию для решения задач прогноза. Приближение геометрической оптики нашло широкое применение при решении задач ионосферного распространения радиоволн.

Интегрирование лучевых уравнений упрощается, если использовать известные из теории представления о нормальных волновых модах волнового поля. Актуально решение прикладных задач краткосрочного прогноза условий радиосвязи, зондирования ионосферы, и теоретической интерпретации результатов экспериментальных измерений характеристик коротковолновых сигналов.

Решение таких задач посредством моделирования требует применения адекватных моделей описания среды распространения радиоволн. Радиотрассы коротких волн могут иметь большую длину – сотни и тысячи километров. Возможно даже кругосветное распространение сигналов коротких волн в ионосфере.

Это значит, что адекватная модель среды распространения радиоволн обязана быть глобальной, а не локальной. Для сформулированных задач модель среды должна учитывать трехмерную неоднородность и анизотропию среды в зависимости от геофизических условий.

Модели среды, не учитывающие пространственную неоднородность геомагнитного поля, использующие одномерные однослойные или многослойные модели ионосферы с заданными геометрическими параметрами, могут иметь лишь локальное, а не глобальное применение.

### **Постановка задачи**

Целью работы является изучение эффектов солнечной и геомагнитной активности в задачах распространения коротких волн в ионосфере высоких широт.

Проведены численные эксперименты с применением комплекса прикладных программ, чтобы изучить, как изменения уровня солнечной и геомагнитной активности влияют на распространение коротких волн в ионосфере высоких широт.

В качестве исходной взята численная модель расчета лучевых траекторий нормальных мод коротких волн в ионосфере [1]. Расчет каждой лучевой траектории сводится к решению шести характеристических уравнений для координат и импульсов, соответствующих уравнению эйконала. Характеристические уравнения интегрируются численно методом Рунге—Кутты в сферической геомагнитной системе координат.

Показатели преломления нормальных мод в трехмерно неоднородной анизотропной ионосфере, на высотах от 60 до 1000 км, рассчитываются с использованием тензора диэлектрической проницаемости холодной плазмы.

Для определения параметров газа нейтральной атмосферы и плазмы ионосферы использованы экспериментальные модели ионосферы IRI2012[2] и нейтральной атмосферы MSIS86 [3]. Геомагнитное поле описано в дипольном приближении. Учтены эффекты мирового времени, обусловленные различием в положении географических и геомагнитных полюсов.

Алгоритмы моделей IRI2012 и нейтральной атмосферы MSIS86 содержат интерполяционные формулы. Это позволило, после программной адаптации интерфейса, найти практически непрерывную трехмерную картину распределения значений параметров ионосферы и нейтральной атмосферы, а также их первые производные по пространственным координатам методом конечных разностей.

Положение точечного излучателя гармонических сигналов и направление излучения опорного луча считается заданным. Излучение источника рассматривается в пучке с узким угловым раствором в окрестности опорного луча.

Угловые координаты излучения и координаты точечного излучателя гармонического сигнала опорного луча на поверхности Земли считаются заданными. В данной работе исследования ограничены модой необыкновенных волн.

Численный алгоритм интегрирования характеристических уравнений для уравнения эйконала, который можно применить к каждому из лучей пучка, представлен в [1]. В результате численного интегрирования получаем разностную сетку геомагнитных координат вдоль лучей пучка, а также значений вектора импульса, вектора поляризации, и показателя преломления для выделенной волновой моды в точках разностной сетки.

Лучевая трубка разделена на ячейки посредством сечений. Каждое сечение – кусочно-гладкая поверхность, составленная из треугольных элементов. Вершины треугольников соответствуют узлам разностной сетки. Текущее поперечное сечение  $S=S(s)$ , где  $s$  – длина вдоль опорного луча, находится как проекция вектора площади поверхности из треугольных элементов на направление вектора групповой скорости волны в узле опорного луча.

Затем проводится расчет полевых характеристик в точках разностной сетки опорного луча с учетом данных, полученных на первом этапе для всех лучей выделенного пучка.

При численном интегрировании уравнения переноса энергии волны в выделенной трубке силовых линий геомагнитного поля с узким угловым раствором в несколько градусов относительно опорного луча требуется проводить Численный расчет значений величин, содержащих вектор импульса  $\mathbf{p}$  и вектор поляризации волны  $\mathbf{f}$ , в узлах разностной сетки на опорном луче основан на применении конечно-разностной аппроксимации формулы Стокса:

$$\int_L \mathbf{A} d\mathbf{r} = \int_S \text{rot } \mathbf{A} \mathbf{n} dS, \quad (1)$$

где векторная функция  $\mathbf{A}$  зависит от  $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{f}$ .

Векторная формула проектируется на координатные плоскости декартовой геомагнитной системы координат и применяется для нахождения декартовых проекций вектора  $\mathbf{A}$  в каждом узле опорного луча.

Для большей точности представления поля волны можно увеличить число лучей в узком пучке. Широкий по угловому раствору пучок лучей можно представить совокупностью узких пучков.

### Результаты численных расчетов и выводы

Численные расчеты проводились для четырех вариантов: 1 - 4. Выбор значений геофизических параметров для варианта 1: 1969 год, номер дня в году 356 (зимнее солнцестояние), Мировое время 4,65 час, индекс солнечной активности  $F_{10,7} = 125,2$  (высокая солнечная активность), частота 10 МГц.

Этим условиям соответствовал высокий уровень авроральной геомагнитной активности (по АЕ индексу) и низкий уровень планетарной геомагнитной активности (по  $A_p$  индексу). Географические широта и долгота передатчика на поверхности Земли, соответственно заданы  $75^0$  и  $110^0$ . Направление излучения опорного луча задано углами места и азимута:  $30^0$  и  $60^0$ .

Рассматривается излучение передатчика в пучке с узким угловым раствором ( $\Delta\beta=2^0$ ,  $\Delta\gamma=2^0$ ) в окрестности опорного луча.

Обоснование выбора значений  $\Delta\beta$  и  $\Delta\gamma$  проведено посредством численных экспериментов. Учтено, что уменьшение значений  $\Delta\beta$  и  $\Delta\gamma$  повышает точность вычислений вплоть до достижения разрешающей способности используемых моделей ионосферы и нейтральной атмосферы.

Выбор значений геофизических параметров для варианта 2: 1965 год, номер дня в году 356 (зимнее солнцестояние), Мировое время 4,65 час, индекс солнечной активности  $F_{10,7} = 67,8$  (низкая солнечная активность), частота 5 МГц. Этим условиям соответствовал низкий уровень авроральной геомагнитной активности (по АЕ индексу) и низкий уровень планетарной геомагнитной активности (по  $A_p$  индексу). Географические широта и долгота передатчика на поверхности Земли, соответственно заданы  $75^0$  и  $110^0$ . Направление излучения опорного луча задано углами места и азимута:  $10^0$  и  $60^0$ .

На рис. 1, а показаны результаты расчета лучевых траекторий в координатах высота над поверхностью Земли и длина вдоль лучевой траектории (фиолетовая линия для варианта 1 и синяя линия для варианта 2).

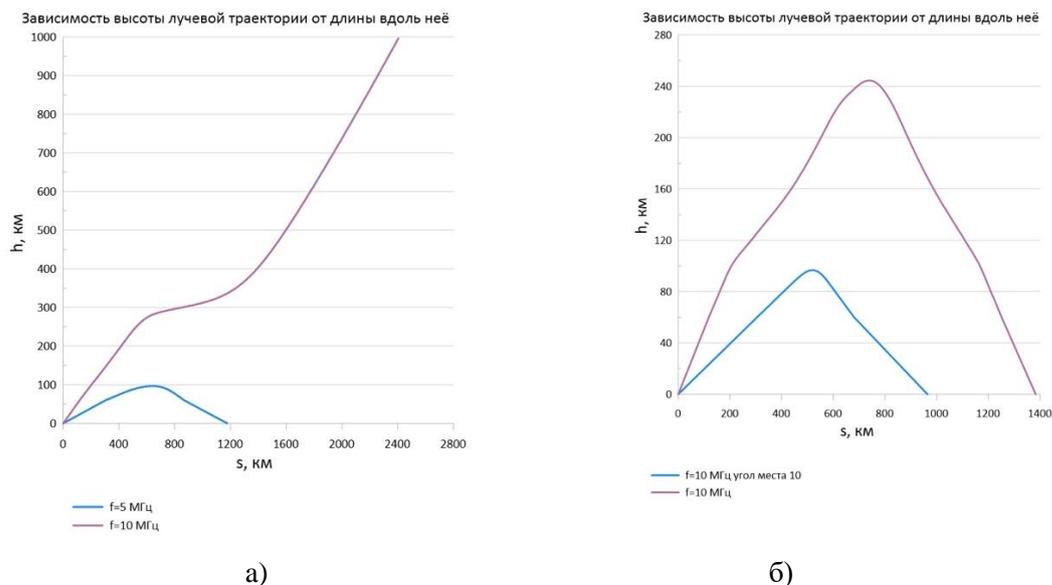


Рис. 1. Результаты расчета лучевых траекторий в координатах высота над поверхностью Земли и длина вдоль лучевой траектории:  
а) для вариантов 1 и 2, б) для вариантов 3 и 4

В отличие от варианта 1 расчеты для варианта 3 проводились для мирового времени 16.65 час вместо 4.65 час, и азимута  $0^0$  вместо  $60^0$ . На рис. 1, б показаны результаты расчета лучевых траекторий в координатах высота над поверхностью Земли и длина вдоль лучевой траектории (фиолетовая линия для варианта 3 и синяя линия для варианта 4).

В отличие от варианта 3 для варианта 4 расчеты проведены для частоты 5 МГц вместо 10 МГц и при низком уровне солнечной и авроральной геомагнитной активности.

Судя по кривым рис. 1, выделяются области не отклоняющего (на высотах  $D$  и  $E$  ионосферы) и области отклоняющего поглощения (в окрестности точки поворота на каждом из двух лучей). Указанные области проявляются в увеличения дифференциального поглощения вдоль лучевых траекторий.

### Литература

1. Захаров В. Е. Формирование амплитудных и поляризационных характеристик коротких волн при распространении в ионосфере // Радиотехника и электроника. - 2019. - Т. 64, - № 6. - С. 525–534.
2. Bilitza, D. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang et al. // Journal of Space Weather and Space Climate. - 2014. - V. 4. - A07.
3. Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. - 1991. - V. 96. - A1. - P. 1159–1172.
4. [http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic\\_indices.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_indices.ru.html)
5. ISGI - International Service of Geomagnetic Indices (unistra.fr)