

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.129-130

## АЛГОРИТМ ТРЕХМЕРНОЙ «ПРИСТРЕЛКИ» НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

Д.С. Котова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Калининград; e-mail: darshu@ya.ru

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

**Аннотация.** Трехмерная численная программа распространения коротких радиоволн в ионосфере была дополнена блоком «пристрелки» для нахождения КВ радиотрасс между передатчиком и приемником. Новый блок позволил получать модельные ионограммы наклонного зондирования.

### Описание методики

Численная модель распространения коротких радиоволн [Захаров и Черняк, 2007; Котова и др., 2015] была дополнена трехмерным блоком «пристрелки» для нахождения трасс. Трехмерная «пристрелка» работает в случае, когда приемник и передатчик расположен на Земле. В новом блоке итеративно изменяется азимут и угол места, таким образом, чтобы максимально приблизить к приемнику точку прихода сигнала на Землю. Критерием успешности пристрелки по углу места является равенство модельной и реальной дальностей распространения радиотрасс по дуге большого круга. Дальность распространения  $l$ , т.е. расстояние между двумя точками, находящимися на поверхности Земли, даётся формулой [Берже, 1984]:

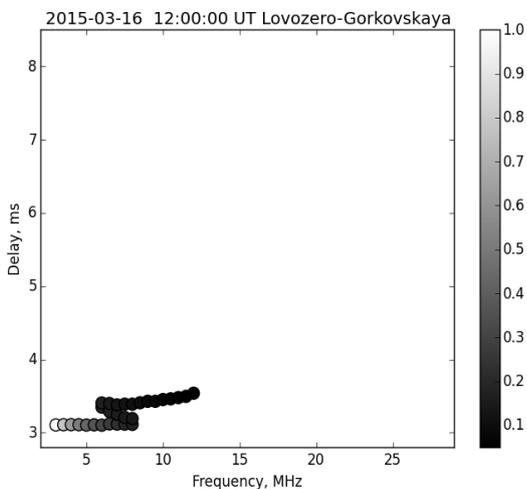
$$l = R \cdot \cos^{-1}(\cos a \cos b + \sin a \sin b \cos \theta),$$

где  $R = 6370$  км – радиус Земли,  $a$  и  $b$  – кошироты точек,  $\theta$  – разность долгот.

Совпадение координат точки прихода излучаемого сигнала на Землю и приемника определяет успешность пристрелки по азимуту. Рассматривается некоторая доверительная окрестность вблизи приемника. Учитываются только те лучи, которые не выходят за пределы окружности радиусом 10 км с центром в точке ожидаемого приема. Знание оптической длины пути радиолуча и изменения групповой скорости вдоль его лучевой траектории позволяет определить время группового запаздывания сигнала. Расчет времени группового запаздывания проводился по формуле [Брюнелли и Намгалдзе, 1988]:

$$t = \int \frac{dS}{V_{гр}} = \frac{1}{c} \int \left( N + \omega \frac{\partial N}{\partial \omega} \right) dS,$$

где  $dS$  – отрезок вдоль лучевой траектории,  $V_{гр}$  – групповая скорость,  $c$  – скорость света,  $N$  – показатель преломления среды,  $\omega$  – частота волны. Интегрирование ведется вдоль всей лучевой траектории по методу прямоугольников. Эта информация, а также расчет поглощения сигнала в среде используются для построения модельных ионограмм наклонного зондирования.



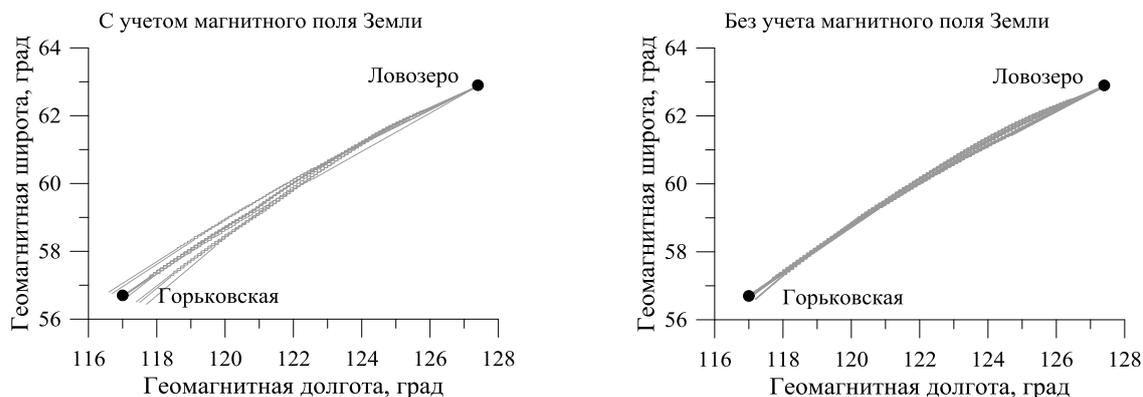
**Рисунок 1.** Модельная ионограмма наклонного зондирования на высокоширотной трассе Ловозеро-Горьковская в момент времени 12:02UT 16 марта 2015 г.

### Результаты

В качестве примера работы разработанного алгоритма на рис. 1 представлена модельная ионограмма наклонного зондирования, полученная с использованием в качестве среды распространения радиоволн Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протонносферы (ГСМ ТИП) [Namgaladze et al., 1988; Klimenko et al., 2018]. В модели ГСМ ТИП учет высыпания авроральных частиц задавался согласно эмпирической модели, разработанной в ПГИ [Vorobjev and Yagodkina, 2008]. Хорошо видно формирование отражений от  $E$  и  $F2$  слоев ионосферы. Градиентом черного цвета показано относительное поглощение радиоволны при распространении в среде, что может быть использовано для

изучения того, как поглощение влияет на вид ионограмм. За максимальное поглощение принято затухание сигнала, полученное на минимальной частоте зондирования  $f = 3$  МГц, порядка  $\sim 43$  дБ.

На рис. 2 показано влияние магнитного поля Земли на расходимость лучевых траекторий. Результаты получены алгоритмом пристрелки при моделировании распространения коротких радиоволн вдоль реально существующей высокоширотной трассы Ловозеро–Горьковская. Проекция лучевых траекторий на поверхность Земли показывают сильную азимутальную расходимость лучей в случае учета магнитного поля. Следовательно, получить трассы в случае трехмерной анизотропной среды методом стрельбы труднее. Расхождение лучей для изотропного случая практически отсутствует, поэтому метод стрельбы более устойчив.



**Рисунок 2.** Проекция лучевых траекторий на поверхность Земли в координатах геомагнитной долготы и широты с учетом (слева) и без учета (справа) магнитного поля Земли в момент времени 00:00 UT 17 марта 2015 года. Серыми линиями показаны результаты модельных расчетов при трехмерной пристрелке соответствующие разным частотам, углам места и азимутам излучения.

## Заключение

Посредством реализации алгоритма «пристрелки», учета поглощения в среде распространения и подсчета времени группового запаздывания вдоль траекторий радиотрасс исследуемого диапазона частот получен комплекс для построения наклонных ионограмм. В изотропной среде алгоритмом трехмерной пристрелки проще получить искомые трассы между передатчиком и приемником.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда проект №17-77-20009 и программы повышения конкурентоспособности «5-100» БФУ им. И. Канта.

## Список литературы

- Берже М. Геометрия. Т. 2. М.: Мир, 368 с. 1984.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 528 с. 1988.
- Захаров В.Е., Черняк А.А. Численная модель распространения радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере // Вестник РГУ им. И. Канта. Вып. 3. С. 36–40. 2007.
- Котова Д.С., Захаров В.Е., Клименко М.В., Клименко В.В. Развитие модели распространения коротких радиоволн в ионосфере // Химическая физика. Т. 34. № 12, С. 62–71. 2015.
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniakov S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. doi:10.1016/j.jastp.2017.12.017. 2018.
- Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Karpov I.V., Bessarab F.S., Surotkin V.A., Glushchenko T.A., Naumova N.M. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // PAGEOPH. Vol. 127 (2/3). P. 219–254. 1988.
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Empirical model of auroral precipitation power during substorms // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. Vol. 70. P. 654–662. 2008.