

## **Влияние нагрева ионосферной плазмы на прохождение радиоволн**

Е.С. Андреева<sup>2</sup>, М.А. Бутримов<sup>1</sup>, А.С. Крюковский<sup>1</sup>, В.Е. Куницын<sup>2</sup>, Д.С. Лукин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский новый университет»

Москва, ул. Радио, 22, [kryukovsky@rambler.ru](mailto:kryukovsky@rambler.ru)

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Москва, Воробьевы горы, [kunitsyn@phys.msu.ru](mailto:kunitsyn@phys.msu.ru)

*Выполнено численное моделирование, направленное на изучение характеристик распространения радиосигнала в возмущенной ионосфере. В качестве источника данных о распределении электронной концентрации использовались результаты радиотомографии ионосферы над радиокomплексом Сура, где осуществлялся эксперимент по нагреву ионосферной плазмы. В отличие от эмпирических моделей, данные, полученные методом радиотомографии, то есть экспериментально, позволяют с высокой точностью производить расчет лучевой структуры, что делает возможным изучение влияния положения источника, частоты сигнала, угла места и других характеристик на картину распространения сигнала в текущих условиях.*

*The numerical simulation of characteristics of radio-wave propagation in case of ionospheric disturbance was done. As a data source for the electron density were chosen radio-tomography results of the ionosphere above the Sura Ionospheric Heating Facility, where an experiment of ionosphere heating was held. Unlike empirical model, data, received from the radio-tomography (i.e. experimental data), provides enough accuracy to compute radio-wave signal structure, therefor it is possible to study how exact position, angle of elevation and other different characteristics of the source affect on radio-wave propagation.*

### **Введение.**

Существует множество областей физики, чье становление и развитие происходило различными темпами. Базовые принципы механики можно легко сформулировать используя лишь наблюдение невооруженным взглядом, в то время как квантовая физика требовала создания обширного физического, математического и инженерного аппаратов, давших необходимые инструменты и возможности для первых робких шагов в новых направлениях. Подобная история происходит и с изучением ионосферы – пока не существовало возможности и необходимости в передачи радиосигналов (да и само понятие радиосигнала было еще не открыто) – о существовании ионосферы как слоя атмосферы никто не задумывался.

Началось все с попытки объяснить некоторые особенности геомагнитного поля Земли в 1878 году английским ученым Стюартом. Позже было предположено, что для распространения радиоволн на большие расстояния (сам факт такого распространения к этому времени уже наблюдался) необходимо существование особого проводящего слоя в высоких слоях атмосферы. В 1925 году было доказано существование областей, отражающих радиоволны и положено начало изучению того, что сейчас называется ионосферой.

Позже были созданы первые установки по импульсному зондированию ионосферы и получены первые ее характеристики: например информация о том, что ионосфера не однородна и состоит из нескольких условных слоев, что начинаются области с повышенной электронной концентрацией примерно с 60 км днем (когда солнечное излучение нагревает ионосферу) и со 100 км ночью. Сейчас принято считать, что ионосфера состоит из слоев D, E и F (причем F разделяется на F1 и F2).

Слой D – слой слабой ионизации, к тому же значительно меняющий свои характеристики в зависимости от наличия или отсутствия солнечного излучения. Принято считать, что он начинается с высот около 60 км и заканчивается на высоте 90 км. Слой E простирается на высотах от 90 до 120 км и уже обладает достаточной электронной концентрацией (особенно в дневное время суток, в нем даже может образовываться сверхнасыщенный слой Es толщиной около километра). Он уже оказывает существенное влияние на распространение средних и иногда коротких радиоволн. Слоем F называют всю ионосферу выше 120 км, причем слой F разделяют на два слоя – F1 и F2. Причина этого следующая: максимум ионообразования возникает на высотах от 150 до 200 км, однако в следствие диффузного распространения, особенно днем, под действием солнечного света, образуется ступенька с максимальной ионной концентрацией на высоте 250-400 км, которую и называют слоем F1. Все, что лежит выше этой ступеньки получило название слоя F2 [1].

### **Распространение радиоволн в возбужденной ионосфере.**

В настоящее время исследования ионосферы проводятся с помощью множества различных инструментов и технологий. Например, существуют технологии низкоорбитальной и высокоорбитальной радиотомографии ионосферы, которые позволяют получать данные об электронной концентрации и ее распределении по слоям [2-5]. Существуют и комплексы для локального стимулирования (нагрева) и изучения ионосферы, например Сура или американский HAARP, позволяющие локально стимулировать ионосферу изменяя уровни концентрации ионов и электронов [6, 8].

Одним из интересных практических применений результатов такого стимулирования является изучение распространения радиоволн в ионосфере и сопоставление результатов до нагрева ионосферы и после нагрева.

Ионосфера оказывает существенное влияние на распространение декаметровых (коротких) волн. В отсутствие ионосферы короткие волны распространялись бы прямолинейно, однако огромное количество свободных электронов играет решающую роль в распространении декаметровых волн.

Механизм распространения радиоволн в ионосфере весьма сложен. Под действием радиоволн в ионосфере возникают как вынужденные колебания электронов и ионов, так и различные виды коллективных собственных колебаний.

Для того чтобы убедиться наглядно в том, как ионосфера влияет на распространение радиоволн, в настоящей работе было выполнено численное моделирование, направленное на изучение характеристик распространения радиосигнала в возмущенной ионосфере. Источником данных о распределении электронной концентрации являлись результаты радиотомографии ионосферы над радиокомплексом Сура, где осуществлялся эксперимент по нагреву ионосферной плазмы.

В качестве входных данных взяты различные результаты радиотомографии над установкой Сура после нагрева ионосферы. Источником сигнала являлся источник, находящийся на поверхности Земли в точке с координатами установки по нагреву, способный излучать волны с различными углами места. Расчеты выполнялись методом решения бихарактеристической системы уравнений [8-10] с применением системы компьютерной алгебры Wolfram Mathematica:

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \vec{r}} \bigg/ \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \omega}, \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \left( 2c^2 \vec{k} - \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \vec{k}} \right) \bigg/ \frac{\partial \omega^2 \varepsilon}{\partial \omega}, \quad (1)$$

где  $\vec{k}$  – волновой вектор,

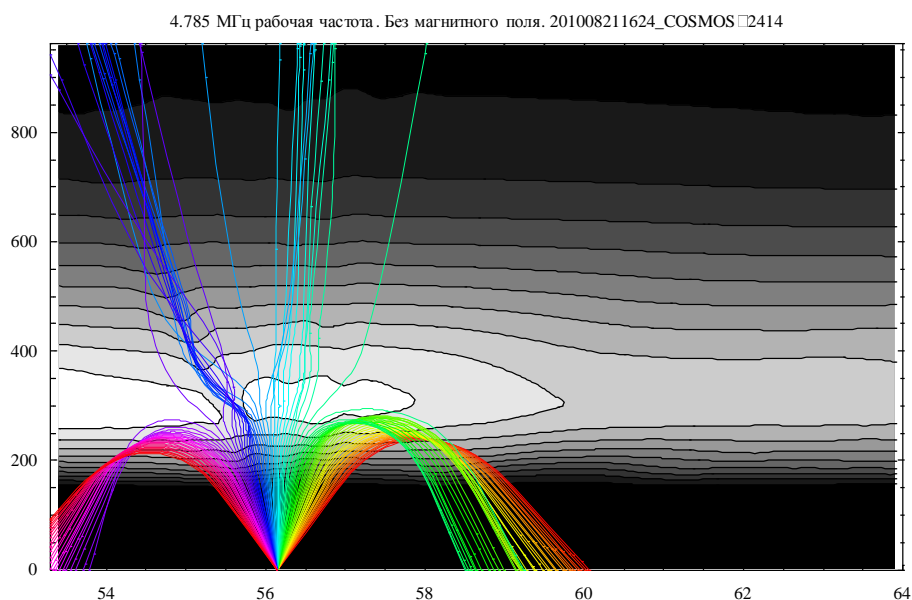
$t$  – параметр вдоль лучевой траектории,  
 $\omega$  – круговая рабочая частота излучения,  
 $\varepsilon$  – эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения,  
 $\vec{r}$  – координаты точки наблюдения,  
 $c = 2,997925 \cdot 10^{10}$  см/с – скорость света.

Частота излучения передатчика совпадает с частотой работы нагревного стенда 4,785 МГц.

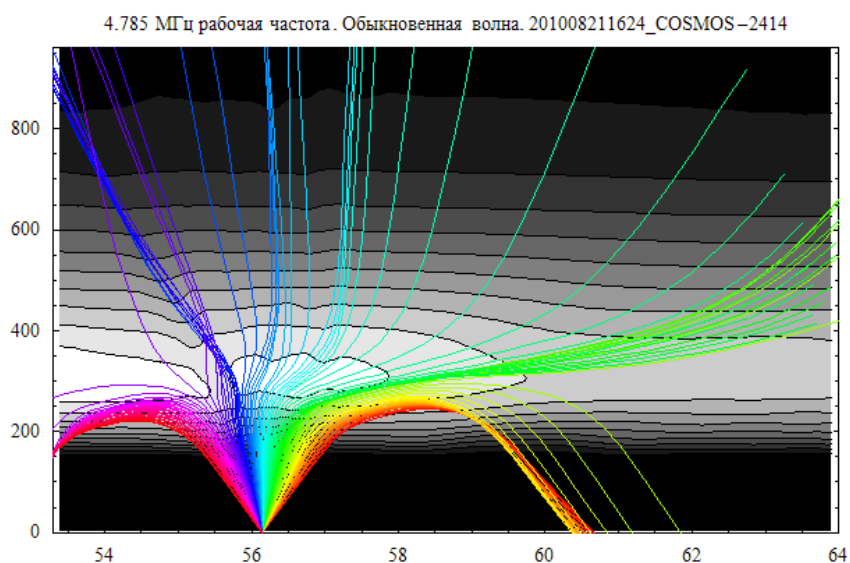
Рассмотрим результаты численного моделирования.

1) Эксперимент 201008211624\_COSMOS-2414.

На рис. 1. показаны разными цветами лучевые траектории, проходящие и отражающиеся от ионосферного слоя без учета магнитного поля. Видно, что левее источника в ионосфере благодаря работе нагревного стенда образовался волновой канал, куда и направился пучок фокусирующихся лучей. По горизонтальной оси – широта в градусах, по вертикальной – высота в километрах. Видно, что имеет место небольшое просачивание сквозь слой и вне ионосферного канала.



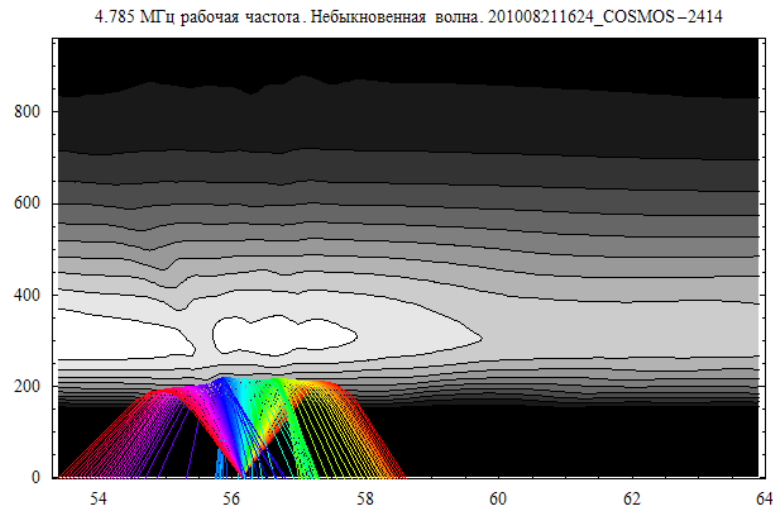
**Рис. 1. Фокусировка в ионосферном канале (синий) и небольшое просачивание сквозь слой**



**Рис. 2. Лучевое распространение с учетом магнитного поля (обыкновенная волна)**

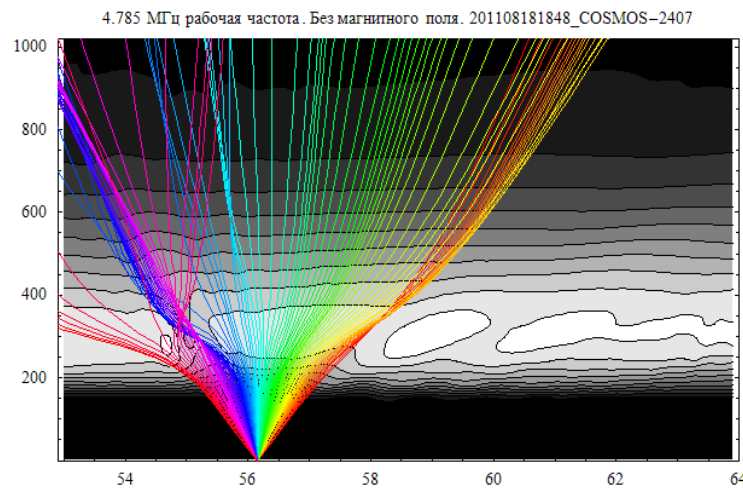
На рис.2. показана лучевая структура с учетом магнитного поля Земли. Видно, что помимо фокусировки в волновом канале, магнитное поле формирует поток лучей в северном направлении (зеленый цвет).

Рис. 2. описывает распространение обыкновенной волны. На рис. 3 рассмотрено распространение необыкновенной волны. Видно, что излучение с этой поляризацией на данной частоте полностью отражается от ионосферного слоя.



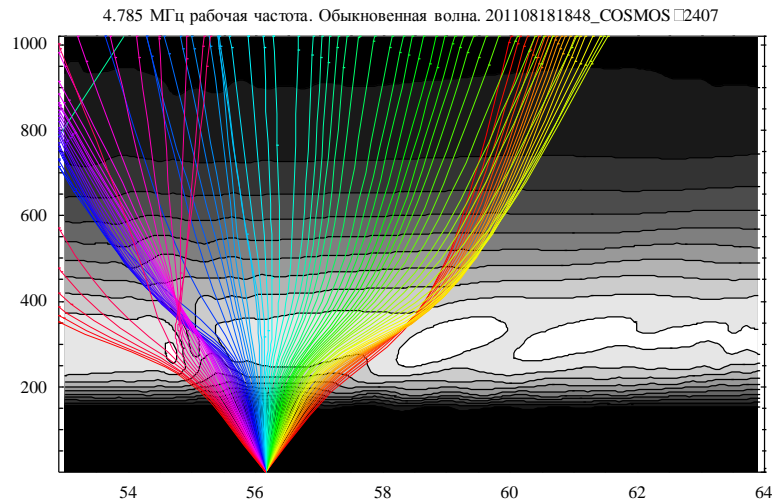
**Рис. 3. Лучевое распространение с учетом магнитного поля (необыкновенная волна)**

2) Эксперимент 201108181848\_COSMOS-2407



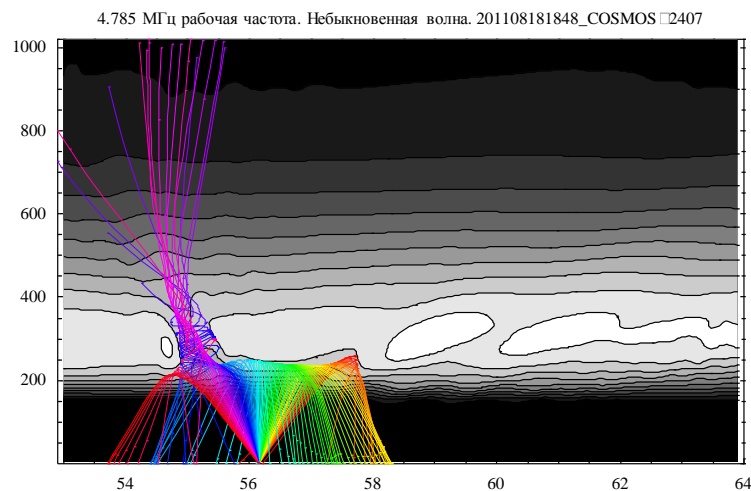
**Рис. 4. Лучевое распространение без учета магнитного поля**

Как и для предыдущего эксперимента, первый расчет (рис. 4) выполнен без учета магнитного поля. Хотя все лучи проходят ионосферу, фокусировка, связанная с каналом, все-таки наблюдается (синие и фиолетовые лучи).



**Рис. 5. Лучевое распространение с учетом магнитного поля (обыкновенная волна)**

Учет магнитного поля для обыкновенной волны не приводит к существенным, качественным изменениям лучевой структуры (рис. 5). Что же касается необыкновенной волны (рис.6), то она просачивается через ионосферный слой только



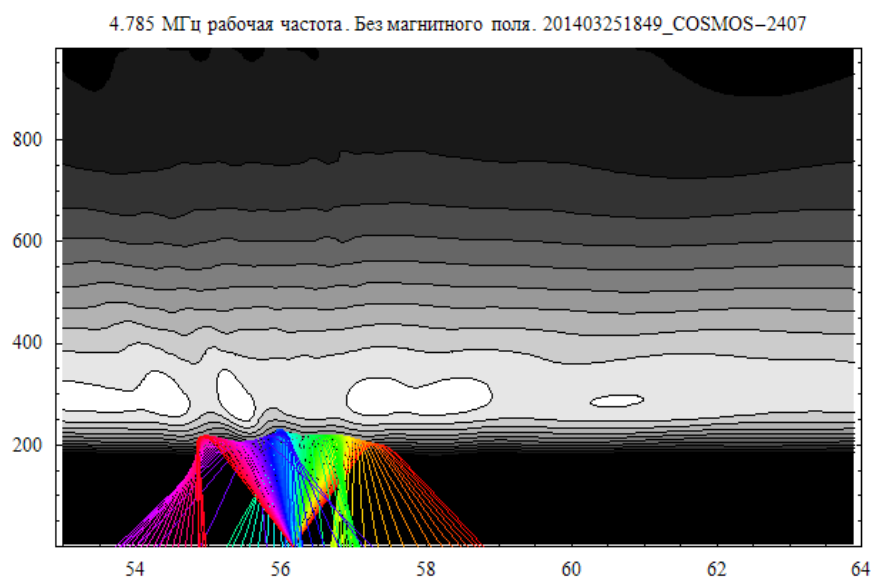
**Рис. 6. Лучевое распространение с учетом магнитного поля (необыкновенная волна)**

благодаря волновому каналу, вызванному искусственным нагревом плазмы. Практически идеальная картинка, иллюстрирующая весь сложный механизм распространения радиоволн. Большинство волн отражаются от слоя F1, в то время как незначительная часть, которая попала в ионосферный канал с удачными углами места, была сфокусирована и просочилась через ионосферу четко сфокусированным пучком. Дальнейшее увеличение частоты до 5 МГц приводит к просачиванию практически всех лучей с достаточно большим углом места через ионосферу. С увеличением частоты хорошо видно падение влияния ионосферных облаков на отклонение трассы луча при его прохождении через различные слои ионосферы.

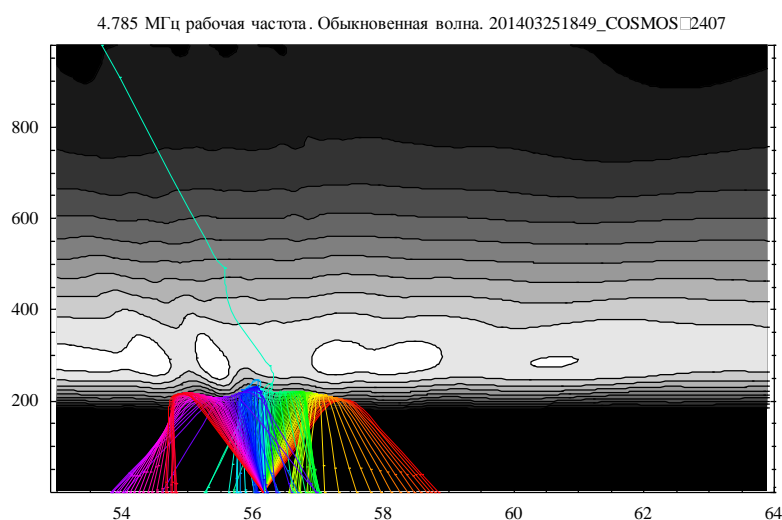
Следует отметить, что в отсутствии нагрева, канал в слое F не образуется, и просачивание сигнала возникает на более высоких частотах. Так же из-за отсутствия канала не возникают явления, связанные с фокусировкой волн.

3) Эксперимент 201403251849\_COSMOS-2407.

При данных условиях эксперимента просачивание волны через ионосферный слой практически не наблюдается. Это относится как к расчетам без учета магнитного поля (рис. 7), так и к случаю обыкновенной волны (рис. 8).



**Рис. 7. Лучевое распространение без учета магнитного поля**



**Рис. 8. Лучевое распространение с учетом магнитного поля (обыкновенная волна)**

Видно, что одинокий луч успешно пробивается через ионосферную плазму. Однако интенсивность электромагнитного поля, связанная с этим лучом, за счет расходимости крайне мала.

### **Заключение.**

Распространение сигнала в ионосфере, особенно когда речь идет о декаметровом сигнале имеет крайне сложный характер. В зависимости от различных условий (время суток, какие-либо аномалии, принесенные случайные локальные возмущения, такие как ионосферные пузыри) один и тот же сигнал может как отразиться от нижней границы слоя F1, так и получить возможность к просачиванию или к внутриионосферному распространению [11, 12]. В работах [13-16] исследовалось влияние различных моделей ионосферы Земли на лучевое распространение и было показано, что небольшие отклонения реальных данных от стандартных моделей

приводят к существенной перестройке лучевых траекторий. Все это приводит к необходимости уделять больше внимания вопросам точного изучения ионосферы, построения различных ионосферных моделей и их уточнения.

### Литература

1. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир. 1973. 502 с.
2. Куницын В.Е., Е.Д.Терещенко, Е.С.Андреева. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 345 с.
3. Andreeva E.S., Franke S.J., Kunitsyn V.E., Yeh K.C. Some features of the Equatorial Anomaly revealed by Ionospheric Tomography, *Geophysical Research Letters*, 2000. Vol.27. No 16. P. 2465-2468.
4. Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images, *Radio Science*, 2003. Vol. 38. No.1. P. 1011-1020.
5. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Franke S.J., Yeh K.C. Tomographic investigations of temporal variations of the ionospheric electron density and the implied fluxes // *Geophysical Research Letters*, 2003. Vol.30. No 16. P. 1851-1854.
6. Фролов В. Л., Митяков Н. А., Шорохова Е.А., Парро М. Структура электрического поля мощной короткой радиоволны во внешней ионосфере Земли. // *Известия вузов. Радиофизика*, 2013. Т. LVI. № 6. С. 361-381.
7. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Компаков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Рош Ж.Л., Парро М., Мишин Е.В. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // *Письма в ЖЭТФ*, 2008. Т. 88. № 12. С. 908-913.
8. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. // *Космические исследования*. 1967. Т. 5. Вып. 4. С.593 – 600.
9. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде. // *Радиотехника и электроника*, 1969. Т. 14. № 9. С. 1673–1677.
10. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме. // *Радиотехника и электроника*, М.: Наука. 2012. Т.57. №9. С. 1028-1034.
11. Крюковский А.С., Кирьянова К.С. Динамическое моделирование распространения радиоволн в окрестности экваториальной аномалии на основе метода бихарактеристик. // *Электромагнитные волны и электронные системы*, 2011, № 8, стр. 21-25.
12. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Исследование влияния локальных неоднородностей ионосферной плазмы на распространение коротких радиоволн. // *Вестник Российского нового университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика»* / М.: РосНОУ, 2010. Выпуск 3. С. 17-25.
13. Бутримов М.А., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Моделирование распространения радиоволн в ионосфере по данным радиотомографии и модели IRI // *IV Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы VI Всероссийской научной конференции (Муром, 27-29 мая 2014 г.)* – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2014. –296 с. ISSN 2304-0297 (CD-ROM) ISSN 2304-0254 (CD-ROM). С. 103-108.
14. Бутримов М.А., Крюковский А.С. Численное моделирование лучевого распространения радиоволн в ионосфере Земли на основе модели IRI. // *Труды XIV*

международной научной конференции «Цивилизация знаний: проблемы и смыслы образования», Москва, 26-27 апреля 2013 г. / М.: РосНОУ, 2013. Часть 2.— С. 167–170.

15. Бутримов М.А., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Сопоставление результатов численного моделирования распространения радиоволн на основе модели ионосферы Земли, основанной на данных радиотомографии, и модели IRI //Вестник Российского нового университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика» / М.: РосНОУ, 2013. Выпуск 4. – С. 7–11.

16. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Палкин Е.А., Растягаев Д.В. Методы моделирования распространения коротких радиоволн в ионосферной плазме на основе глобальных распределений электронной концентрации и магнитного поля Земли // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», (29 июня–5 июля 2014; Иркутск) / Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. Т.1. С. 27–37.