



**МАТЕРИАЛЫ
XI МЕЖДУНАРОДНОЙ ШКОЛЫ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
им. А.Г. Колесника**

ФИЗИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Томск 2014

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. В.Е. ЗУЕВА СО РАН

ФИЗИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Материалы XI Международной Школы молодых ученых
им. А.Г. Колесника*

15 – 19 сентября 2014 г., г. Томск

Оргкомитет благодарит
Министерство образования и науки Российской Федерации,
Сибирское отделение Российской Академии наук,
Российский фонд фундаментальных исследований,
Томский государственный университет,
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
внесших свой вклад в проведение и публикацию материалов Школы

Томск
2014

УДК 551.508; 551.510; 551.521

Рецензенты:

Г.Г. Матвиенко, д-р физ.-мат. наук, проф., ИОА СО РАН

С.А. Колесник, канд. физ.-мат. наук, доцент, ТГУ

Физика окружающей среды:

Ф50 Материалы XI Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2014. – 196 с.

ISBN 978-5-91302-160-1

Сборник включает статьи участников XI Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований по следующим направлениям: физика атмосферы, ионосферы и магнитосферы, физика солнечно-земных связей, физическая экология, распространение электромагнитных волн в атмосфере, ионосфере и океане, физика и химия атмосферного аэрозоля, радиация и климат, физические основы, методы и аппаратура оптического, радиоволнового и акустического зондирования окружающей среды.

Для специалистов в области физики, оптики атмосферы и океана, радиофизики, метеорологии и экологии.

УДК 551.508; 551.510; 551.521

*XI Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды»
им. А.Г. Колесника проведена при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований (грант № 14-35-10113 - мол_г)*

ISBN 978-5-91302-160-1

© Авторы статей, 2014

© Томский государственный университет, 2014

© Издательство «ТМЛ-Пресс», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Авакян К.А., Закинян Р.Г. РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДВУМЕРНОЙ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ	7
Апексимов Д.В., Букин О.А., Голик С.С., Кучинская О.И., Петров А.В., Соколова Е.Б., Хорошаева Е.Е. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛАМЕНТАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА АТМОСФЕРНОЙ ТРАССЕ ПРИ ИХ РАЗЛИЧНОЙ НАЧАЛЬНОЙ ФОКУСИРОВКЕ	11
Апексимов Д.В., Голик С.С., Кучинская О.И., Майор А.В., Петров В.А., Соколова Е.Б., Хорошаева Е.Е. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОЖЕСТВЕННОЙ ФИЛАМЕНТАЦИИ КОЛЛИМИРОВАННЫХ ПУЧКОВ Ti:SAPPiRE-ЛАЗЕРА В ВОДЕ	16
Баклыкова Е.С., Бородин А.С., Тужилкин Д.А. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВАРИАЦИЙ ПЕРИОДА СЕРДЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ	20
Бочаров А.А., Соловьев А.В. АКУСТИЧЕСКИЕ ШУМЫ ИНФРАЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ В ГОРОДЕ ТОМСКЕ	24
Будак В.П., Шагалов О.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА СИСТЕМОЙ ПЛОСКИХ СЛОЕВ МУТНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ КВАЗИДВУХПОТОКОВОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ	28
Васильев И.А., Сарычев В.Т. АКТИВНЫЕ ДОЛГОТЫ И МЕЖПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ	32
Вьширайло Д.Н., Соловьев А.В., Побаченко С.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНФРАЗВУКА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА	36
Гоголева Н.Е., Федоров В.Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕОРАДИОЛОКАТОРА «ОКО-2 АБ-700»	41
Голенева Н.В., Лавринов В.В., Лавринова Л.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШЭКА-ГАРТМАНА	45
Гололобов А.Ю., Голиков И.А., Попов В.И. ЭФФЕКТЫ ТРЕХМЕРНОСТИ ПЕРЕНОСА ПЛАЗМЫ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ	50
Гуль Е.В., Ходанович М.Ю., Пан Э.С., Кисель А.А. ВЛИЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ПРЕБЫВАНИЯ В ТЕЧЕНИЕ 5 И 21 СУТОК В УСЛОВИЯХ ОСЛАБЛЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ВЫСШУЮ НЕРВНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЛАБОРАТОРНЫХ КРЫС	54
Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА ПО ДАННЫМ GPS ИЗМЕРЕНИЙ	59
Дементьев В.О., Когогин Д.А., Насыров И.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ РАДИОВОЛН ПРИ НАЛИЧИИ НЕОДНОРОДНОСТИ, СОЗДАННОЙ МОЩНОЙ РАДИОВОЛННОЙ НАГРЕВНОГО СТЕНДА «СУРА»	63

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ РАДИОВОЛН ПРИ НАЛИЧИИ НЕОДНОРОДНОСТИ, СОЗДАННОЙ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНОЙ НАГРЕВНОГО СТЕНДА «СУРА»

В.О. Дементьев, Д.А. Когогин, И.А. Насыров

vdemen@yandex.ru, dkogogin@kpfu.ru, Igor.Nasyrov@kpfu.ru

Описывается метод расчёта лучевых траекторий радиоволн в трехмерно-неоднородной ионосфере с использованием модели IRI-2012 и данных ионосферной станции «Циклон» для радиотрассы Москва–Казань, в которой присутствует ионосферная неоднородность, образованная во время работы нагревательного стенда «Сура». Вывод основан на результатах численного эксперимента для частот 5, 10, 15 МГц радиостанции точного времени РВМ. Результаты расчётов показывают, что искусственная ионосферная неоднородность, стимулированная мощной радиоволной стенда «Сура», не оказывает существенного влияния на распространение радиоволн радиостанции РВМ при выбранных условиях численного эксперимента.

Расчёт траекторий радиоволн в ионосфере является одним из важнейших разделов радиофизики. Особенности ионосферного распространения радиоволн во многом определяют эффективность построения и эксплуатации современных систем наземной дальней декаметрового связи, загоризонтной радиолокации и местоопределения.

Целью данной работы является разработка программы на основе метода Гамильтона для расчёта лучевых траекторий КВ радиосигналов, распространяющихся в трёхмерно-неоднородной ионосфере, а также определение влияния работы нагревательного стенда «Сура» (Россия, Нижегородская область) на распространение сигналов радиостанции точного времени РВМ (Россия, Москва, Менделеево) [1].

Для моделирования характеристик неоднородной среды была выбрана полуэмпирическая модель распределения электронной концентрации в ионосфере IRI-2012 [2]. Для наибольшего соответствия модели IRI-2012 реальной ионосфере были использованы данные ионосферной станции «Циклон» (параметр foF2), обработанные с помощью программы «Cyclon-M», и данные по солнечной активности (число солнечных пятен). Станция расположена в деревне Ореховка (Россия, РТ, Зеленодольский район). Так как радиотрасса находится в средней широте, то данные ионосферной станции можно считать схожими для выбранной области ионосферы.

Показатель преломления считается действительным и выражается через электронную концентрацию следующим образом:

$$n^2 = 1 - \frac{e^2}{4\pi^2 m \epsilon_0} \frac{N}{f^2}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона, ϵ_0 – проницаемость свободного пространства, f – частота, N – концентрация электронов.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая траекторию луча в геоцентрической системе координат r, θ, ϕ , представляется следующим образом [3, 4]:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{cn}{r_e} \cos \alpha_1, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{cn \cos \alpha_2}{r_e r}, \quad \frac{d\phi}{dt} = \frac{cn \cos \alpha_3}{r_e r \sin \theta}, \quad (2.1-2.3)$$

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = \frac{c}{r_e} \left(-\sin \alpha_1 \left(\frac{\partial n}{\partial r} + \frac{n}{r} \right) + \frac{\cos \alpha_1}{r} \left(\frac{\cos \alpha_2}{\sin \alpha_1} \right) \frac{\partial n}{\partial \theta} + \frac{\cos \alpha_1}{r \sin \theta} \left(\frac{\cos \alpha_3}{\sin \alpha_1} \right) \frac{\partial n}{\partial \phi} \right), \quad (2.4)$$

$$\frac{d\alpha_2}{dt} = \frac{c}{r_e} \left(\cos \alpha_2 \left(\frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_2} \right) \left(\frac{\partial n}{\partial r} + \frac{n}{r} \right) - \frac{\sin \alpha_2}{r} \left[\frac{\partial n}{\partial \theta} + n \cdot \operatorname{ctg} \theta \left(\frac{\cos \alpha_3}{\sin \alpha_2} \right)^2 \right] + \frac{\cos \alpha_2}{r \sin \theta} \left(\frac{\cos \alpha_3}{\sin \alpha_2} \right) \frac{\partial n}{\partial \phi} \right), \quad (2.5)$$

$$\frac{d\alpha_3}{dt} = \frac{c}{r_e} \left(\cos \alpha_3 \left(\frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_3} \right) \left(\frac{\partial n}{\partial r} + \frac{n}{r} \right) + \frac{\cos \alpha_3}{r} \left(\frac{\partial n}{\partial \theta} + n \cdot \operatorname{ctg} \theta \right) - \frac{\sin \alpha_3}{r \sin \theta} \frac{\partial n}{\partial \phi} \right). \quad (2.6)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы направляющих косинусов луча; $n(r, \theta, \phi)$ показатель преломления; r_e – радиус Земли.

Помимо расчёта траекторий через исходную модель ионосферы необходимо также рассмотреть влияние искусственной ионосферной неоднородности, возникающей при работе нагревательного стенда «Сура» во время излучения им мощной КВ радиоволны с частотой 4,54 МГц, в результате чего в возмущённой области ионосферы происходит уменьшение электронной концентрации в целом примерно до 10% [5]. Диаграмма направленности стенда «Сура» представляет собой конус с углом 6° , направленный вверх.

Поскольку в ионосфере плотность плазмы N изменяется с высотой z , то для мощной волны с заданной частотой ω существует целый резонансный слой: на нижней границе слоя достигается верхнегибридный резонанс $\omega = \omega_{UH}(z_{UH})$, на верхней границе – ленгмюровский резонанс $\omega = \omega_L(z_L)$. Частоты этих резонансов определяется следующими формулами:

$$\omega_{UH}(z_{UH}) = \left(\frac{4\pi e^2 N(z_{UH})}{m} + \omega_H^2 \right)^{1/2}, \quad \omega_L(z_L) = \left(\frac{4\pi e^2 N(z_L)}{m} \right)^{1/2}, \quad (2.7-2.8)$$

где e и m – заряд и масса электрона, $N(z_L)$ и $N(z_{UH})$ – плотность плазмы на высоте z_L и z_{UH} соответственно, $\omega_H = eH/mc$ – гироманнитная частота.

Для установления влияния работы стенда «Сура» необходимо, чтобы траектория радиоволны проходила как через область его диаграммы направленности, так и через слой возмущённой области плазменных резонансов.

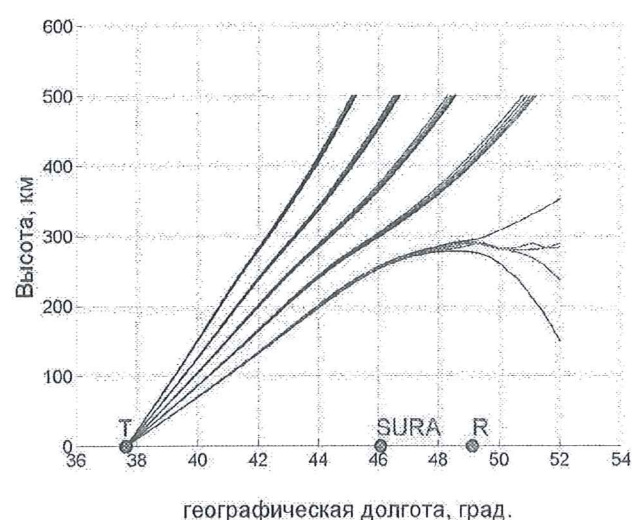
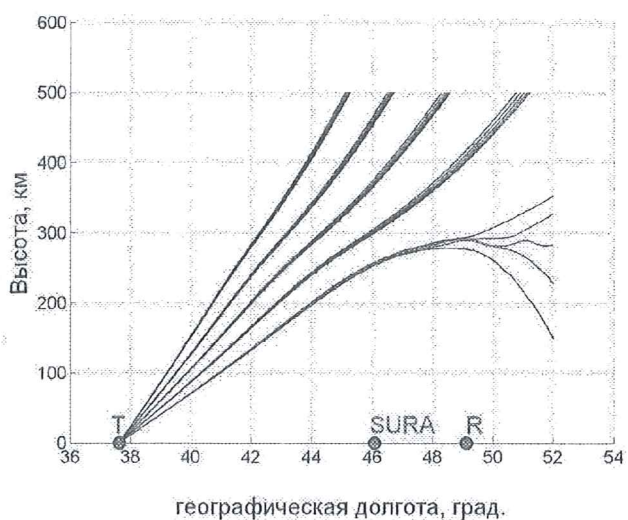
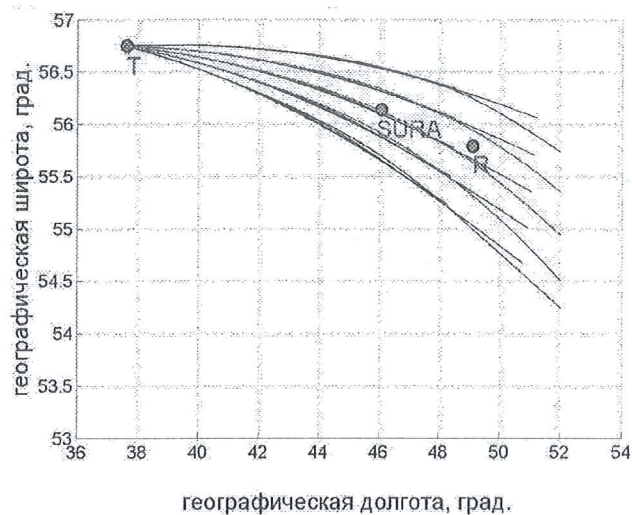
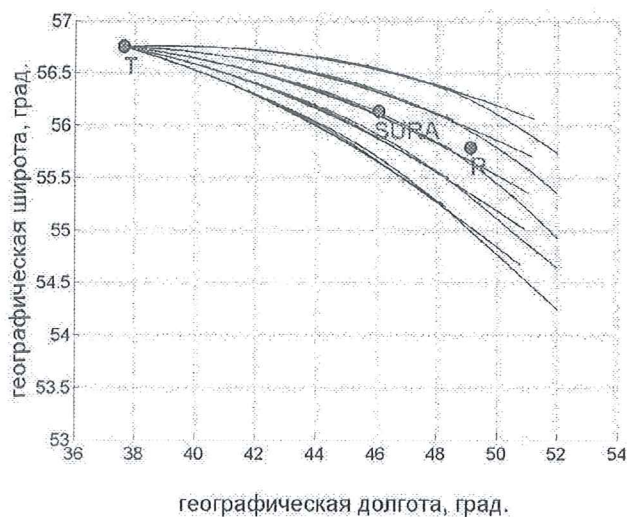


Рис. 1. Траектории лучей на радиотрассе «Москва-Казань» 7 ноября 2013 г. в 21:00 для частоты 10 МГц.

Слева – прохождение траектории без неоднородности; справа – прохождение той же траектории с наличием неоднородности

По данным международной справочной модели ионосферы IRI-2012 был произведён расчёт для 7 ноября 2013 г. с 18.00 до 22.00 MSK с интервалом 20 мин на радиотрассе Москва – Казань для трёх частот 5, 10, 15 МГц, на которых работает РВМ. Диаграмма направленности антенны, выбранная для расчёта: зенитные углы – 45°, 50°, 55°, 60°, 65°; азимутальные углы – 88,93°, 91,43°, 93,93°, 96,43°, 98,93°. Центральный азимутальный угол 93,93° направлен на стенд «Сура», остальные углы выбраны с отклонением $\pm 2,5^\circ$ и $\pm 5^\circ$ от центрального. Для каждого момента времени для конкретной частоты были рассчитаны 25 траекторий.

В качестве примера на рис. 1 показаны траектории лучей в двух проекциях, рассчитанные как без наличия, так и с наличием неоднородности. На рисунке видно, что траектории, попавшие в неоднородность, отклоняются достаточно мало, чтобы повлиять на приём сигнала радиостанции РВМ в данное время на текущей радиотрассе при выбранных начальных условиях.

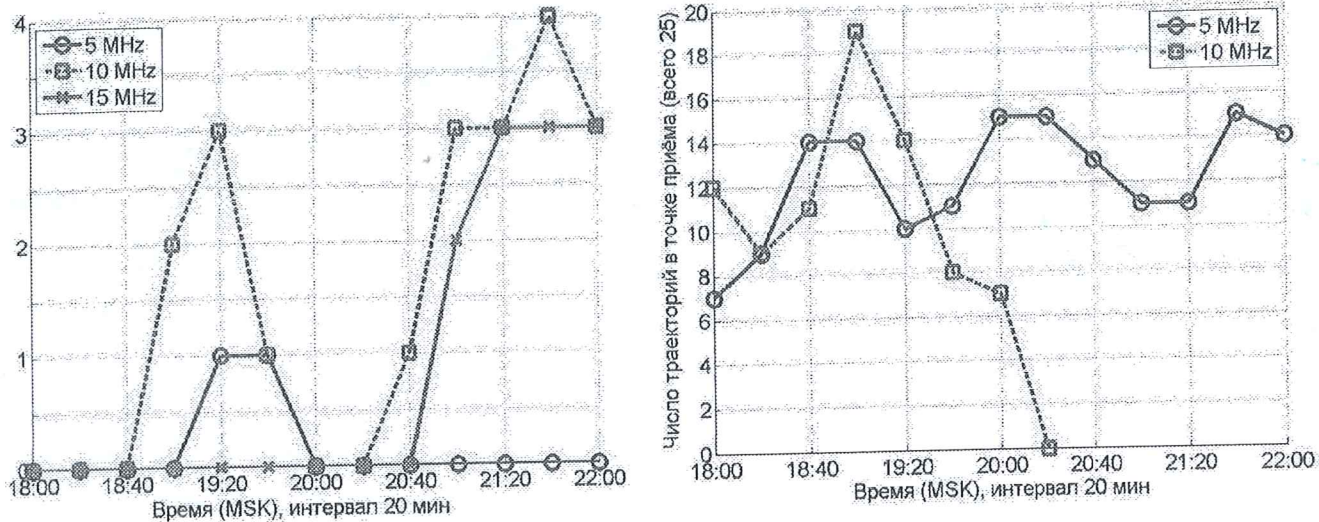


Рис. 2. Слева – количество траекторий, попавших в возмущённую область над стендом «Сура»; справа – изменение количества траекторий радиоволн со временем в окрестности точки приёма; 7 ноября 2013 г.

В результате численного эксперимента при заданных начальных условиях было установлено, что незначительная часть траекторий проходила через область диаграммы направленности стенда «Сура», и только 33 из общего числа всех рассчитанных траекторий (975) прошли через искусственную неоднородность (левая часть рис. 2). Отсюда можно сделать вывод, что работа нагревного стенда «Сура» не оказала значительного влияния на распространение сигналов радиостанции точного времени РВМ на данной радиотрассе при выбранных начальных условиях в данные моменты времени.

Также было определено количество лучей, попадающих в окрестность точки приёма с радиусом 50 км (правая часть рис. 2). Стоит отметить, что на частотах 5 и 10 МГц часть траекторий попала в окрестность точки приёма, что говорит о возможности приёма радиосигнала радиостанции РВМ для выбранных условий. Однако на частоте 15 МГц ни одна из траекторий не попала в окрестность точки приёма.

Литература

1. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/RWM> (Интернет-ресурс)
2. URL: <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/ionos/iri.html> (Интернет-ресурс)
3. Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. Пер. с англ.: под ред. М.П. Кияновского. М.: Наука, 1971. С. 11–37, 280–283.
4. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.
5. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177, № 11.