



**ХХV Всероссийская открытая научная конференция**  
**«РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН»,**  
**посвященная 80-летию отечественных**  
**ионосферных исследований**

**4–9 июля 2016 г.**

*Научное издание*

**ТРУДЫ  
XXIV ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН**

РРВ-25, Томск, 4-9 июля 2016 г., Т. 1

Научный редактор Куркин В.И.  
Технические редакторы Амбаева И.Г., Купрякова Н.В., Никонова М.В.

*Статьи приводятся в авторской редакции*

Сдано в набор 02.07.2016. Подписано к печати 03.07.2016  
Формат 60×90 1/8. Гарнитура *Times New Roman*  
Усл. печ. л. 39.5. Уч.-изд. л. 47.4. Тираж 65. Заказ № 165

---

*Отпечатано в издательском отделе ИСЗФ СО РАН,  
664033, Иркутск, а/я 291,  
и в БМБШ ГОУ ВПО « ИГУ »,  
664001, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1*

---

## **Организаторы конференции**

- Научный совет РАН «Распространение радиоволн»,
- Научный совет ОФН РАН «Физика солнечно-земных связей»,
- Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН),
- Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН),
- Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН (ИРЭ РАН),
- Московский физико-технический институт (государственный университет) (МФТИ),
- Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ),
- Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР),
- Российский новый университет (РосНОУ)

## **При участии и поддержке**

- Российской академии наук (РАН),
- Сибирского отделения Российской академии наук (СО РАН),
- Министерства образования и науки РФ,
- Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ),
- Национального комитета URSI,
- Российской секции IEEE,
- Объединенного физического общества РФ

приглашают вас принять участие в работе XXV Всероссийской конференции по распространению радиоволн, проводимой в соответствии с утвержденным Президиумом РАН Планом научных конференций, симпозиумов, съездов, семинаров и школ на 2016 г. К участию в работе Конференции приглашаются зарубежные ученые. Форма работы Конференции – пленарные и секционные заседания, стендовые сессии. В рамках Конференции планируется конкурс молодых ученых.

## **Научные направления**

**Секция 1.** Распространение радиоволн и дистанционное зондирование верхней атмосферы и космического пространства.

**Секция 2.** Распространение оптических волн в атмосфере и лазерное зондирование природных сред.

**Секция 3.** Распространение километровых и более длинных радиоволн.

**Секция 4.** Распространение радиоволн и нелинейные эффекты в ионосфере.

**Секция 5.** Физические проблемы радиолокации, радионавигации и радиосвязи.

**Секция 6.** Дистанционное зондирование атмосферы и земных покровов, радиометеорология.

**Секция 7.** Математическое моделирование проблем электродинамики и распространения радиоволн.

**Секция 8.** Проблемы атмосферного электричества.

## **Программный комитет**

### **Председатель:**

Геннадий Григорьевич Матвиенко, д.ф.-м.н., директор ИОА СО РАН, Томск

### **Сопредседатели:**

Александр Павлович Потехин, чл.-корр. РАН, директор ИСЗФ СО РАН, Иркутск

Дмитрий Сергеевич Лукин, д.ф.-м.н., проф., МФТИ, Долгопрудный

### **Заместители председателя:**

Борис Георгиевич Кутуза, д.ф.-м.н., профессор, ИРЭ РАН, Москва

Герман Сергеевич Шарыгин, д.т.н., профессор, ТУСУР, Томск

Сергей Анатольевич Колесник, к.ф.-м.н., доц., ТГУ, Томск

### **Учёный секретарь:**

Дмитрий Владимирович Растягаев, к.ф.-м.н., Российский новый университет, Москва

### **Члены программного комитета:**

Ю.Б. Башкуев, д.т.н., ИФМ СО РАН, Улан-Удэ

Е.Г. Бережко, чл.-корр. РАН, директор ИКФИА СО РАН, Якутск

М.А. Бисярин, д.ф.-м.н., профессор, СПбГУ, Санкт-Петербург

Н. Блаунштейн, доктор, профессор, Университет им. Бен-Гуриона, Израиль

В.В. Булкин, д.т.н., доцент, МИ ВлГУ, Муром

А.В. Гуревич, академик РАН, ФИАН, Москва

Н.П. Данилкин, д.ф.-м.н., профессор, ИПГ Росгидромет, Москва

М.Г. Деминов, д.ф.-м.н., профессор, ИЗМИРАН, Троицк

А.С. Дмитриев, д.ф.-м.н., профессор, ИРЭ РАН, Москва

П.Ф. Денисенко, д.ф.-м.н., профессор, НИИ физики ЮФУ, Ростов-на-Дону

Г.А. Жеребцов, академик РАН, ИСЗФ СО РАН, Иркутск

А.И. Захаров, д.ф.-м.н., профессор, ФИРЭ РАН, Москва

Н.Н. Зернов, д.ф.-м.н., профессор, СПбГУ, Санкт-Петербург

В.А. Иванов, д.ф.-м.н., профессор, ПГТУ, Йошкар-Ола

А.С. Крюковский, д.ф.-м.н., профессор, РосНОУ, Москва

В.И. Куркин, д.ф.-м.н., профессор, ИСЗФ СО РАН, Иркутск

В.Б. Лапшин, д.ф.-м.н., профессор, ИПГ Росгидромет, Москва  
Л. Лигтхарт, доктор, профессор, Дельфтский университет технологии,  
Нидерланды  
Е.А. Мареев, чл.-корр. РАН, ИФП РАН, Москва  
В.Л. Миронов, чл.-корр. РАН, ИФ СО РАН, Красноярск  
Е.А. Палкин, к.ф.-м.н., профессор, РосНОУ, Москва  
В.А. Пермяков, д.ф.-м.н., профессор, МЭИ, Москва  
Ю.Я. Ружин, д.ф.-м.н., профессор, ИЗМИ РАН, Троицк  
В.М. Смирнов, д.ф.-м.н., ФИРЭ РАН, Фрязино  
Е.Д. Терещенко, д.ф.-м.н., профессор, ПГИ РАН, Мурманск  
В.Л. Фролов, д.ф.-м.н., профессор, НИРФИ, Нижний Новгород  
И.В. Чашей, д.ф.-м.н., ПРАО АКЦ ФИАН  
В.А. Черепенин, чл.-корр. РАН, профессор, ИРЭ РАН, Москва  
Ю.Н. Черкашин, д.ф.-м.н., профессор, ИЗМИ РАН, Троицк  
Н.П. Чубинский, к.т.н., профессор, МФТИ, Москва  
Б.М. Шевцов, д.ф.-м.н., директор ИКИР ДВО РАН, Паратунка  
Э.И. Шустов, д.т.н., профессор, ОАО НПК НИИДАР, Москва  
Ю.Г. Щорс, д.ф.-м.н., профессор, ИС РАН «Радиофизические методы  
исследования морей и океанов», Москва  
Г.Г. Щукин, д.ф.-м.н., профессор, ВКА им. А.Ф. Можайского, Санкт-  
Петербург

## **Организационный комитет**

### **Председатель:**

Геннадий Григорьевич Матвиенко, [mgg@iao.ru](mailto:mgg@iao.ru)

### **Сопредседатели:**

Герман Сергеевич Шарыгин, [gssh@tusur.ru](mailto:gssh@tusur.ru)

Сергей Анатольевич Колесник, [serkol@mail.tsu.ru](mailto:serkol@mail.tsu.ru)

### **Ответственный секретарь:**

Ольга Владимировна Тихомирова, к.ф.-м.н., ученый секретарь ИОА СО  
РАН, Томск, [science@iao.ru](mailto:science@iao.ru)

Почтовый адрес: Россия, 634055, Томск, пл. Академика Зюева, 1

Телефон: (3822) 492-875, (3822) 492-738, Факс: (3822) 492-086

E-mail: [rwp25@iao.ru](mailto:rwp25@iao.ru)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ЧАСТОТ СТОЛКНОВЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ С МОЛЕКУЛАМИ В НЕВОЗМУЩЕННОЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ D-ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

**А.М. Гоков**

*Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця,  
г. Харьков, пр. Ленина 9а, Украина, 61166, E-mail: amg\_1955@mail.ru*

Приведены и проанализированы модельные представления основных особенностей высотно-временных изменений частот столкновений электронов с молекулами в невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы, полученные на основе длительных систематических экспериментальных исследований вблизи г. Харькова и в эпизодических целенаправленных наблюдениях вблизи г. Волгограда, выполненных методом частичных отражений и ракетными методами.

## **MODELING OF THE ELECTRON- MOLECULES COLLISION FREQUENCY VARIATIONS IN THE UNDISTURBED MIDLATITUDE D-REGION BASED ON THE EXPERIMENTS**

**A.M. Gokov**

There are given and analyzed the main features of the model distribution of the height-temporal variations of the electron collisions with neutral molecules in the undisturbed midlatitude D-region of the ionosphere, obtained through long-time systematic experimental studies near Kharkov and episodic purposeful observation near Volgograd performed by the partial reflection and rocket methods.

### **Введение**

В литературе до настоящего времени нет единого мнения об изменениях высотного профиля частот столкновений электронов с нейтральными молекулами  $\nu(z)$  в D-области ионосферы. По этой причине не существует надежной модели высотно-временных вариаций  $\nu(z)$ . Для решения различных задач обычно используют несколько моделей, в большинстве случаев сконструированных по профилю атмосферного давления той или иной модели стандартной атмосферы CIRA. В целом проблема вариаций  $\nu(z)$  в нижней ионосфере все еще не решена и требует продолжения исследований, в первую очередь экспериментальных, с учетом влияния региональных особенностей, источников возмущений естественного и антропогенного происхождения.

### **Цель работы**

Рассмотреть результаты моделирования вариаций профиля  $\nu(z)$  на основе банка экспериментальных данных, полученных методом частичных отражений (ЧО) с помощью аппаратуры ХНУ имени В. Н. Каразина в разные сезоны года в период 1980 – 2012 гг. вблизи гг. Харькова, Мурманска и Волгограда [1].

### **Решаемые задачи**

Моделирование вариаций высотного профиля  $\nu(z)$  на основе банка экспериментальных данных, полученных методом ЧО с помощью аппаратуры ХНУ имени В. Н. Каразина в разные сезоны года в период 1980 – 2012 гг. вблизи гг. Харькова, Мурманска и Волгограда.

### **Краткие сведения об экспериментах**

Изучение высотно-временных вариаций профиля  $\nu(z)$  в D-области проводилось тремя способами по наблюдениям, выполненным в двух среднеширотных регионах в разные сезоны года — в районе г. Харькова и г. Волгограда. Вариации  $\nu(z)$  в средней и верхней частях D-области (на высотах выше примерно 75 км) исследовались по измерениям методом ЧО с использованием методик, рассмотренных в работах [2; 3], и в совместных измерениях методом ЧО и метода-

ми когерентных частот и импедансного зонда в ракетных экспериментах [4; 5] (профили концентрации электронов  $N(z)$  измерялись в ракетных экспериментах с погрешностью  $\leq 10\%$  и использовались нами для получения профилей  $\nu(z)$  по методике дифференциального поглощения методом ЧО). Вариации  $\nu(z)$  в нижней части D-области (ниже 75 км) исследовались с использованием методики, рассмотренной в работе [6]. Профили  $\nu(z)$  вычислены с погрешностью  $\leq 30\%$ . Модели высотно-временных изменений профиля  $\nu(z)$  представлены в графическом виде.

### Основные результаты и их обсуждение

Изменения  $\nu(z)$  в среднеширотной D-области ионосферы в течение светлого времени суток вблизи г. Харькова исследовались по наблюдениям, выполненным методом ЧО в разные сезоны года. Общее количество суточных циклов (в светлые времена суток) измерений обработанных и проанализированных составило 9. В каждом цикле измерений получено по 6 – 8 профилей  $N(z)$  и  $\nu(z)$ . Вблизи г. Волгограда 19 – 20.08.1976 г. проводились одновременные измерения параметров нижней ионосферы методом импедансного зонда на ракетах и методом ЧО с помощью передвижного радиофизического комплекса аппаратуры [1].

Профили  $N(z)$  измерялись с помощью зондов в ракетных экспериментах с погрешностью  $\leq 10\%$  и использовались для получения высотных профилей  $\nu(z)$  по методике дифференциального поглощения магнитоионных компонент методом ЧО. Погрешность получаемых таким образом  $\nu(z)$ -профилей не превышала 20 %.

Результаты экспериментов показали, что изменения  $\nu(z)$  в среднеширотной D-области ионосферы в течение светлого времени суток находятся в пределах погрешностей измерений методом ЧО ( $\leq 30\%$ ), т.е. зависимость частот столкновений электронов с молекулами от зенитного угла Солнца отсутствует.

Относительно региональных различий  $\nu(z)$  в среднеширотной D-области было проведено сравнение профилей  $N(z)$  и  $\nu(z)$ , полученных одновременно и при одинаковом зенитном угле Солнца с помощью измерений методом импедансного зонда на ракетах и методом ЧО вблизи г. Волгограда (географическая широта – 48,4° N) и только методом ЧО вблизи г. Харькова (географическая широта – 49,9° N).

В табл. 1 приведены примеры таких измерений для экспериментов, выполненных 29.10.1995 г. Как видно из приведенных примеров, и других результатов, что не представлены в данной работе, региональная зависимость частот столкновений электронов с нейтральными молекулами на высотах  $z \geq 75$  в среднеширотной нижней ионосфере отсутствует, региональные же различия в  $N(z)$  имеют место и они четко прослеживаются

Таблица 1. Сравнение профилей  $N(z)$  и  $\nu(z)$ , полученных в разных регионах

z, км	Харьков (10.20 LT)		Волгоград		Харьков (11.00 LT)		Волгоград	
	$N, \text{см}^{-3}$	$\nu \times 10^{-7}, \text{с}^{-1}$	$N, \text{см}^{-3}$	$\nu \times 10^{-7}, \text{с}^{-1}$	$N, \text{см}^{-3}$	$\nu \times 10^{-7}, \text{с}^{-1}$	$N, \text{см}^{-3}$	$\nu \times 10^{-7}, \text{с}^{-1}$
72			240	0,181	210		280	0,192
75	420	0,128	590	0,115	510	0,101	650	0,111
78	680	0,087	780	0,071	720	0,078	870	0,069
81	890	0,038	1010	0,045	910	0,032	970	0,040
84	1210				1450			

На основе многочисленных экспериментов, выполненных в среднеширотной D-области ионосферы установлена отчетливая сезонная зависимость  $\nu(z)$ .

В табл. 2. в качестве примера приведены результаты расчетов для двух сезонов года значений  $\nu$  для высот  $z = 60 - 66$  км (количество реализаций – 170;  $\nu_{1,2}$  – усредненные по всем регистрациям значения  $\nu$  для летних и зимних условий соответственно;  $\langle \nu \rangle$  – среднее значение для  $\nu_1$  и  $\nu_2$ ). Они подтверждают наличие сезонных изменений в нижней части среднеширотной D-области ионосферы: летние значения частот столкновений превышают зимние приблизительно в 1,4 - 1,6 раза.

Таблица 2. Средние значения частот столкновений для летних и зимних условий

z, км	$\nu_1$ (лето)	$\nu_2$ (зима)	$\nu_1/\nu_2$	$\langle \nu \rangle$
60	$0,403 \cdot 10^8$	$0,274 \cdot 10^8$	1,47	$0,339 \cdot 10^8$
63	$0,250 \cdot 10^8$	$0,154 \cdot 10^8$	1,62	$0,202 \cdot 10^8$
66	$0,174 \cdot 10^8$	$0,164 \cdot 10^8$	1,07	$0,169 \cdot 10^8$

Региональные различия в значениях  $\nu(z)$  исследовались нами по измерениям при одинаковых зенитных углах Солнца вблизи гг. Волгограда и Харькова в разные сезоны года в совместных измерениях методами ЧО и методами когерентных частот и импедансного зонда в ракетных экспериментах. Установлено, что отличия значений  $\nu(z)$ , полученных в разных среднеширотных регионах, не превышают погрешностей измерений, что указывает на отсутствие региональных различий в вариациях  $\nu(z)$  в невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы (см. пример в таблице 2).

Следует однако отметить, что эксперименты показали, что они возможны при некоторых региональных возмущениях естественного и антропогенного характера.

Таблица 2. Примеры региональных изменений профиля  $\nu(z)$

z, км	Харьков	Волгоград	Харьков	Волгоград
	10.20 LT 29.10.1995		11.00 LT 29.10.1995	
	$\nu \times 10^{-7}, \text{c}^{-1}$			
72		0,181		0,192
75	0,128	0,115	0,101	0,111
78	0,087	0,071	0,078	0,069
81	0,038	0,045	0,032	0,040

Для установления возможных широтных вариаций  $\nu(z)$  в D-области выполнено сравнение усредненных  $\langle \nu(z) \rangle$ -профилей, полученных методом ЧО в течение светлого времени суток на средней широте 31.07.1981 вблизи г. Харькова (географическая широта  $49^\circ 38'$ ) и на высокой широте 02.07.1977 вблизи г. Мурманска ( $69^\circ$ ). Результаты расчетов приведены на рис. 1.

На этом рисунке кружками обозначены усредненный по 5 реализациям  $\langle \nu(z) \rangle$ -профиль для средней широты, точками  $\langle \nu(z) \rangle$ -профиль для высокой широты (усреднение проводилось по 6 регистрациям, равномерно распределенным в течение светлого времени суток). Вертикальными отрезками обозначен разброс полученных данных; сплошными линиями – оценка разброса экспериментальных профилей частот столкновений в невозмущенных условиях, полученная на основе обзора литературных данных, полученных экспериментально различными методами.

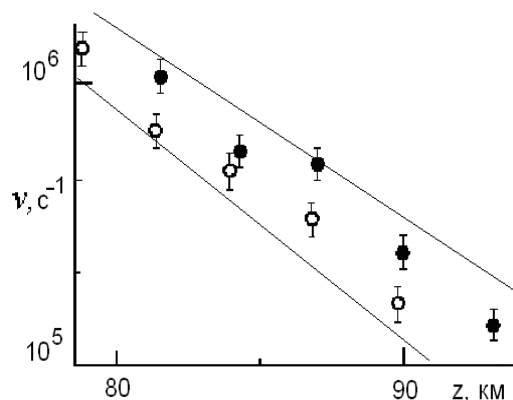


Рис. 1. Пример широтных изменений частот столкновений электронов в D-области

Из рис. 1 видно, что различия в полученных  $\langle \nu(z) \rangle$ -профилях имеются, – они небольшие, – значения  $\langle \nu(z) \rangle$  для высокой широты немного превышают значения для средней широты (как усредненные, так и индивидуальные). Разброс экспериментальных значений в профилях частот столкновений электронов с молекулами в невозмущенных условиях, полученных на ос-



нове обзора литературных данных, значительно больше. Обусловлено это, в первую очередь, ошибками измерений и, вероятно, возможными широтными вариациями частот столкновений.

Следует отметить, что вопрос о возможных широтных вариациях частот столкновений электронов с нейтралами в невозмущенной нижней ионосфере до сих пор является открытым. Исследование таких вариаций является сложной и дорогостоящей задачей, поэтому приведенные выше результаты представляют значительную ценность.

Особое значение среди ионосферных исследований имеет изучение возможных вариаций частот столкновений электронов с нейтралами в D-области в период некоторых природных возмущений. Эта задача является очень сложной. Вызвано это как сложностью проведения необходимых экспериментов, так и отсутствием или недостаточной точностью известных методов расчета частот столкновений. С другой стороны, знание таких вариаций необходимо как для правильной интерпретации результатов наблюдений, так и для решения прикладных и научных задач.

### **Заключение**

Построена предварительная эмпирическая модель высотно-временных вариаций частот столкновений электронов с молекулами в невозмущенной D-области ионосферы.

Экспериментально установлено, что региональные различия в вариациях  $\nu(z)$  в невозмущенной среднеширотной D-области ионосферы отсутствуют, но они возможны при некоторых региональных возмущениях.

Установлено, что изменения  $\nu(z)$  в невозмущенной среднеширотной D области в течение светлого времени суток находятся в пределах погрешностей измерений методом ЧО, т.е. зависимость частот столкновений электронов с молекулами от зенитного угла Солнца отсутствует.

Установлены сезонные изменения  $\nu(z)$  в среднеширотной D-области: летние значения  $\nu(z)$  превышают зимние примерно в 1,4 – 1,6 раза.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Tyrnov, O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., Gritchkin A. I., Dorohov V. L., Kontzevaya L. G., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Misyura V. A., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tsybmal A. M., Chernogor L. F., Shemet A. S. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // *Turkish Journal of Physics*. 1994. V. 18. P. 1260–1265.
2. Бенедиктов Е.А., Гришкевич Л.В., Иванов В.А. Одновременные измерения электронной концентрации и частоты соударений электронов в D-области ионосферы методом частичных отражений // *Известия вузов. Радиофизика*. 1972. Т. 15, № 5. С. 695–702.
3. Gokov A. M. Simultaneous Determination of Electron Density and Electron-Neutral Molecule Collision Frequencies in the Ionospheric D-region by a Partial Reflection Technique // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2003. V. 60, No 10–12. P. 145–158.
4. Синельников В. М. Структура N(h)-профилей зимней нижней ионосферы по измерениям на метеоракетах методом когерентных частот в период МАП // *Ионосферные исследования*. 1989. № 47. С. 120–136.
5. Пахомов С. В., Князев А. К. О сезонном ходе электронной концентрации среднеширотной D-области ионосферы // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1985. Т. 25, № 5. С. 750–754.
6. Gokov A. M. Development of the Method of Determining of the Electron Molecule Collision Frequencies in the Ionospheric D-region by Partial Reflection Technique // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2003. V. 59, № 3&4. P. 139–144.