

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Северо-Восточный федеральный университет  
им. М.К. Аммосова»

Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс»

## **Современные методы и материалы радиофизики**

Сборник материалов  
Всероссийской научной конференции  
молодых ученых, аспирантов и студентов,  
посвященной 120-летию дня изобретения радио

Якутск – Чебоксары 2016

УДК 621.37  
ББК 32.841  
С56

**Рецензенты:** **Яковлев Борис Васильевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры теоретической физики Физико-технического института ФГАОУ ВПО «СВФУ им. М.К. Аммосова»

**Христофоров Иван Иванович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (ИМЗ СО РАН), г. Якутск

**Шейкин Трифон Юрьевич**, канд. техн. наук, специалист ООО «Якстар».

**Редакционная**

**коллегия:** **Тимофеев Аял Михайлович**, главный редактор, д-р физ.-мат., зам. директора по научной работе Физико-технического института ФГАОУ ВПО «СВФУ им. М.К. Аммосова»

**Голиков Иннокентий Алексеевич**, д-р физ.-мат., главный научный сотрудник Института космофизических исследований и аэрономии им Ю.Г. Шафера СО РАН (ИКФИА СО РАН)

**Неустроев Ефим Петрович**, канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой радиофизики и электроники Физико-технического института ФГАОУ ВПО «СВФУ им. М.К. Аммосова»

**С56 Современные методы и материалы радиофизики** : материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 120-летию дня изобретения радио (Якутск, 19–20 мая 2015 г.) / редкол. А. М. Тимофеев. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2016. – 64 с.

**ISBN 978-5-9907548-9-8**

В сборник вошли избранные статьи научно-практической конференции в рамках 120-летия дня изобретения радио (19–20 мая 2015 г.). В конференции приняли участие молодые ученые, аспиранты и студенты.

Предназначен для широкого круга читателей.

Сборник размещен в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ).

ISBN 978-5-9907548-9-8

УДК 621.37

ББК 32.841

© Коллектив авторов, 2016

ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный  
федеральный университет  
им. М.К. Аммосова», 2016

© Центр научного сотрудничества  
«Интерактив плюс», 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Гололобов А.Ю., Голиков И.А.</i> Моделирование высокосиротной ионосферы с учетом явления «полной тени» .....	5
<i>Афанасьева Р.И.</i> Тренд основных параметров слоя F в периоды слабой геомагнитной активности 2002–2012 гг. по данным ионосферной станции Якутск.....	8
<i>Зубова Н.С., Петухов И.С.</i> Понижение интенсивности космических лучей, вызванное магнитным облаком.....	11
<i>Коркина В.Н., Козлов В.И.</i> Калибровка уровня естественных радиошумов ОНЧ диапазона в г. Якутск.....	14
<i>Сутакова Я.Г., Козлов В.И.</i> Калибровка сигналов ОНЧ радиостанций с помощью дипольной активной антенны П6-51 .....	17
<i>Жирнова Е.В.</i> Исследование работы фотоэлектрических модулей в климатических условиях города Якутска .....	19
<i>Попов В.В., Мельчинов В.П., Павлов А.А.</i> Расчет функции ослабления поля диполя над плоской поверхностью земли.....	22
<i>Федоров В.Н., Гоголева Н.Е.</i> Устройство для подавления перекрестных помех в многопроводных линиях связи .....	25
<i>Петров И.В.</i> Разработка программы автоматической калибровки данных солнечного фотометра SP-9 по измерениям фотометра СЕ-318 сети «AERONET» для исследования основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля .....	28
<i>Мельчинов В.П., Степанов А.Н.</i> Устройство слежения за объектами на территории действия сотовой связи .....	31
<i>Мельчинов В.П., Кладкин В.П.</i> Метод измерения модуля функции ослабления в движении.....	32
<i>Мельчинов В.П., Кладкин В.П.</i> Эффективность излучения антенн расположенных на мерзлоте .....	35
<i>Павлов А.А., Жебсаин В.В.</i> Прикладная программа инвентаризации приборов, оборудования, деталей радиолаборатории .....	39
<i>Мельчинов В.П., Кладкин В.П., Прокопьев А.Р.</i> Исследование распространения УКВ на реальных трассах .....	41

<i>Елгина Г.А., Ивойлов Е.В., Слободян С.М.</i> Моделирование деформации витков обмоток индуктивности при их замыкании .....	45
<i>Сычикова Я.А., Вамболь С.А.</i> Пористый фосфид индия – перспективный материал радиоэлектроники.....	46
<i>Слепцов И.А.</i> Возможные методы синтеза якутского языка.....	47
<i>Ефремов А.В., Неустроев Е.П.</i> Воздействие плазменной обработки на свойства частичного восстановленного оксида графена .....	50
<i>Бурцева Е.К., Неустроев Е.П.</i> Исследование механизма электропроводности и оценка его параметров в восстановленном оксиде графена .....	53
<i>Васильева Ф.Д., Капитонов А.Н., Катанова А.Г.</i> Получение графеновых чешуек путем расслоения графита блендером .....	56
<i>Винокуров П.В., Яковleva Р.М.</i> Исследование пленок оксида графена, восстановленных с помощью лазерного излучения.....	58
<i>Матанинанов П.П., Антонов С.Р.</i> Создание транзисторной структуры на основе графена CVD-48 .....	61

**Гололобов Артем Юрьевич**  
ведущий инженер  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)  
**Голиков Иннокентий Алексеевич**  
главный научный сотрудник  
ИКФИА им. Ю.Г. Шафера СО РАН  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ «ПОЛНОЙ ТЕНИ»

**Аннотация** представлены результаты численного моделирования пространственно-временного распределения скоростей ионообразования, нагревания, электронной концентрации и температуры на высоте F области ионосферы (300 км), полученных с помощью трехмерной модели высокоширотной ионосферы в переменных Эйлера. Учитывается несовпадение географического и геомагнитного полюсов, обуславливающее возникновение явления «полной тени» в атмосфере Земли в зимний период в восточном полушарии. Показано, что на высоте 300 км в 06 часов мирового времени (UT) в области полной тени «вблизи терминатора» повышается электронная температура из-за нагревания коротковолновым излучением при больших зенитных углах Солнца и уменьшения скорости охлаждения электронного газа. Сделано предположение, что явление «полной тени» является одной из причин формирования «горячих пятен» в зимнее время в восточном полушарии.

**Ключевые слова:** высокоширотная ионосфера, трехмерная модель, скорости нагревания и охлаждения ионов и электронов, температура электронов и ионов, «горячие пятна», явление «полной тени».

### Введение

В [1] показано, что в зимний период в восточном полушарии вследствие несовпадения географического и геомагнитного полюсов в субавроральной ионосфере формируется область без эффективных источников ионизации, возбуждения и нагревания в течение всей полярной ночи (явление «полной тени»), имеющая серпообразную форму. Область полной тени (ПТ) заключена между границами конвекции и областей, недоступной для солнечного электромагнитного излучения. В связи с этим в численном моделировании высокоширотной ионосферы (ВШИ) необходимо учитывать данное явление в зимний период как при расчете пространственного распределения электронной (ионной) концентрации, так и электронной и ионной температуры.

### Модель высокоширотной ионосферы

В [2; 3] реализована численная трехмерная модель ВШИ в переменных Эйлера, состоящая из трех трехмерных уравнений – уравнений непрерывности для ионов  $O^+$  и теплопроводности для электронов и ионов, позволяющая описывать пространственно-временное распределение концентрации электронов (ионов), температуру электронов и ионов в интервале высот  $120 \div 500$  км, географических широт  $-40 \div 90^\circ$  и долгот  $-0 \div 360^\circ$  северного полушария. В модели также учитывается несовпадение географического и геомагнитного полюсов, которое обуславливает возникновение явления ПТ.

### Результаты численных расчетов

В настоящей работе представлены результаты расчетов пространственно-временного распределения электронной концентрации и температуры в различные моменты мирового времени на высоте F области ионосферы (300 км).

Расчеты выполнены с помощью численной модели ВШИ в переменных Эйлера [2] для условий зимнего солнцестояния ( $\delta = -23^\circ$ ), минимума солнечной ( $F_{10.7} = 65$ ) и геомагнитной активности ( $K_p = 3$ ).

На рис. 1 приведены в экваториальной плоскости результаты расчетов распределения концентрации электронов на высоте 300 км в координатах местное время (долгота) – географическая широта для разных моментов мирового времени UT. Плазмосферный и тепловой потоки на верхней границе заданы равными нулю, что соответствует спокойным геомагнитным условиям [4].

Видно, что в 06 UT в днище провала  $n_e$  составляет около  $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , на верхних краях обеих стенок – около  $2 \cdot 105 \text{ см}^{-3}$ . А в остальное время в 12, 18, 00 UT  $n_e$  в области ПТ составляет менее  $10 \text{ см}^{-3}$  (рис. 1).

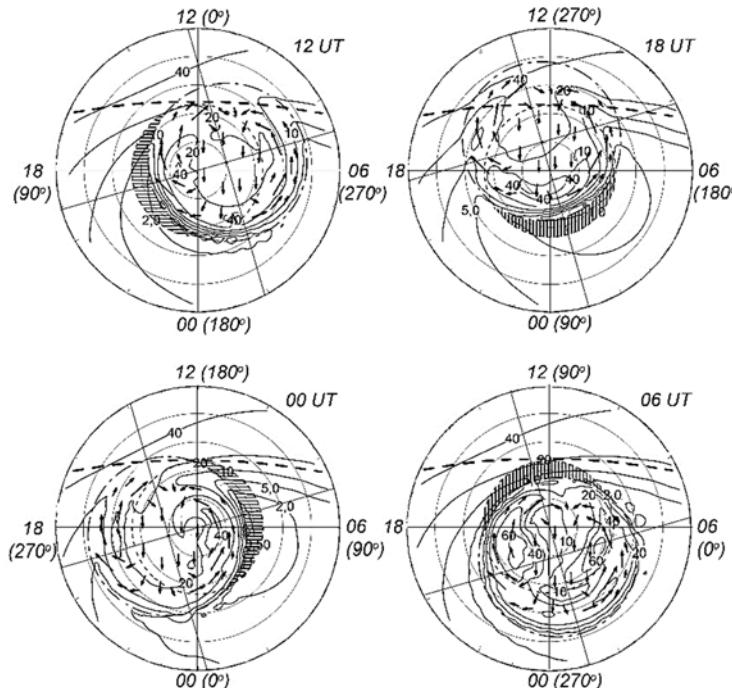


Рис. 1. Распределение концентрации электронов (в ед.  $10^4 \text{ см}^{-3}$ ) на высоте 300 км. Концентрические окружности соответствуют географическим широтам, проведенным через  $10^\circ$ . Цифры у внешнего круга – местное время, а рядом в скобках – географическая долгота. Штриховая линия – положение терминатора при зенитном угле  $\chi = 90^\circ$ . Точка с двумя взаимно перпендикулярными линиями – геомагнитный полюс. Стрелками даны скорости ионов (электронов), обусловленные электрическим полем магнитосферного происхождения. Штрихпунктир – положение плазмопаузы. Штриховая кривая в виде окружности – полярный круг. Заштрихованная серпообразная область – область полной тени, где не производится ионизация нейтральных частиц.

Распределение температуры электронов на высоте 300 км показано на рис. 2. В 06 UT на ночной стороне вблизи терминатора в области ПТ, где производится фотоионизация при  $\chi > 90^\circ$ , происходит нагревание электронного газа с одновременным уменьшением скорости его охлаждения  $L$ , связанного с падением концентрации электронов в провале, т.к.  $L$  пропорциональна  $n_e^2$ . Такая ситуация приводит к повышению  $T_e$  до 1300 К. По экспериментальным данным для аналогичных гелио-геофизических условий также наблюдаются области повышенных значений  $T_e$  [4; 5]. Таким образом, явление «полной тени» может быть одной из возможных причин формирования «горячих пятен» [6] в субавроральной ионосфере в зимний период в восточном полушарии.

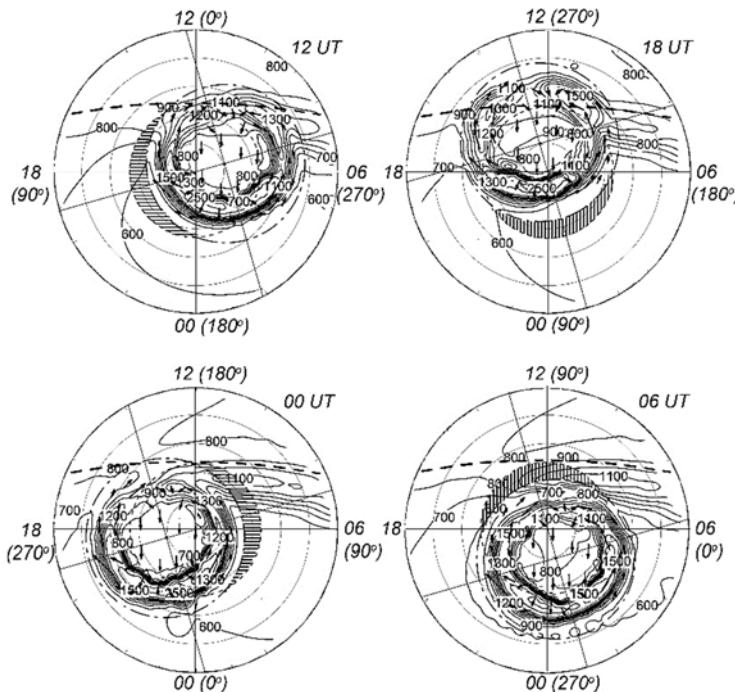


Рис. 2. Распределение температуры электронов (в К) на высоте 300 км

#### *Выходы*

1. На высоте 300 км в 06 UT, когда область ПТ оказывается вблизи терминатора в дневные часы, электронная температура повышается в ней из-за нагревания солнечным излучением электронного газа со стороны экваториального края области ПТ и одновременного уменьшения скорости охлаждения вследствие падения электронной концентрации за терминатором.

2. Явление «полной тени», по-видимому, является одной из причин формирования «горячих пятен» в субавроральной ионосфере в восточном полушарии в зимний период.

### **Список литературы**

1. Колесник А.Г., Голиков И.А. Явление «полной тени» в верхней атмосфере Земли // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 279. – №4. – С. 832–834.
2. Голиков И.А., Гололобов А.Ю., Попов В.И. Численное моделирование теплового режима высокосиротной ионосферы // Вестник Северо-Восточного федерального университета. – 2012. – Т. 9. – №3. – С. 22–28.
3. Гололобов А.Ю., Голиков И.А., Попов В.И. Моделирование высокосиротной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов // Вестник Северо-Восточного федерального университета. – 2014. – Т. 11. – №4. – С. 46–54.
4. Prölls G.W. Ionospheric F-region storms: unsolved problems, in Characterizing the Ionosphere, pp. 10.1 – 10.20, RTO Scientific Report RTO-MP-IST-056, RTO, Neuilly-sur-Seine. – France, 2006.
5. Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // J. Adv. Space Res. – 2008. – V. 42. – №4. – P. 599–609.
6. Клименко В.В., Коренъков Ю.Н., Намгладзе А.А., Карпов И.В., Суроткин В.А., Наумова Н.М. Численное моделирование «горячих пятен» в ионосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31. – №3. – С. 554–557.

**Афанасьева Раиса Ионовна**

студентка 5 курса

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **ТRENД ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ F В ПЕРИОДЫ СЛАБОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ 2002–2012 гг. ПО ДАННЫМ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ ЯКУТСК**

**Аннотация:** в данной статье автором рассматривается вопрос долговременных трендов в средней и верхней атмосфере и ионосфере. В работе проведен анализ данных по станции Якутск с 2002 по 2012 гг. в периоды слабой геомагнитной активности.

**Ключевые слова:** ионосферная станция, параметры слоя.

В последнее десятилетие резко возрос интерес к проблеме долговременных трендов в средней и верхней атмосфере и ионосфере. Во-первых, наличием изменений в различных параметрах этих слоев, вызванных увеличением парникового газов в атмосфере, является подтверждением того, что рост этих газов действительно происходит и влияет не только на нижние атмосферные слои, но и на всю толщу атмосферы в целом.

Во-вторых, изучение трендов параметров верхней атмосферы и ионосферы на основе имеющихся экспериментальных данных позволяет оценить масштабы изменений электронной концентраций в ионосферных слоях. Если изменения этих важных параметров будут продолжаться, рано или поздно эти изменения придется учитывать при решении прикладных вопросов движения низкоорбитальных спутников, входа в атмосферу спускаемых космических аппаратов, радиосвязи, радионавигации и др. Уменьшение электронной концентрации в верхней части этой области уже сейчас может влиять на точность определения местоположения с помощью радионавигационных систем.

Проведен анализ данных по станции Якутск с 2002 по 2012 гг. в периоды слабой геомагнитной активности за один цикл солнечной активности.

Рассмотрены основные параметры слоя F:

- f0F2 – критическая частота;
- hmF – максимальная высота.

Данные выбраны за один и тот же период: декабрь месяц.

За сутки взяты два значения каждого параметра:

- t(восх+2ч) и t(зах+2ч) (по работам Данилова).

Из ряда данных были выбраны значения, удовлетворяющие следующим условиям: суточное значение  $K_p \leq 22$  и значение  $K_p$  в момент времени  $t(\text{восх}+2\text{ч})$  и  $t(\text{зах}+2\text{ч}) \leq 3$ .

По месячным данным взяты медианные значения  $f0F2$  и  $hmF$ .

В данной работе был выбран период слабой геомагнитной активности, удовлетворяющие следующим условиям: суточное значение  $K_p \leq 22$  и значение  $K_p$  в момент времени  $t(\text{восх}+2\text{ч})$  и  $t(\text{зах}+2\text{ч}) \leq 3$ . Таким образом из ряда данных были исключены значения не удовлетворяющие указанным критериям.

Таблица 1  
Процент оставшихся данных с учетом геомагнитной активности

Год	Восход (дни)	%	Заход (дни)	%
2002	10	32	9	29
2003	10	32	10	32
2004	10	32	10	32
2005	13	42	13	42
2006	13	42	11	35,5
2007	19	61,3	14	45
2008	24	77,4	10	32
2009	12	38,7	10	32
2010	12	38,7	12	38,7
2011	15	48,4	15	48,4
2012	15	48,4	15	48,4
		44,8		37,7

Из таблицы 1 можно утверждать:

- после удаления данных, не удовлетворяющих спокойным геомагнитным условиям, ряд данных сохранил статистическую значимость (сохранилось более 30% от исходного ряда данных);
- максимальное значение в момент времени  $t(\text{восход}+2\text{ч})$ : 2008 г. – 24 дня (77,4%);
- максимальное значение в момент времени  $t(\text{заход}+2\text{ч})$ : 2011–2012 гг. – 15 дней (48,4%).

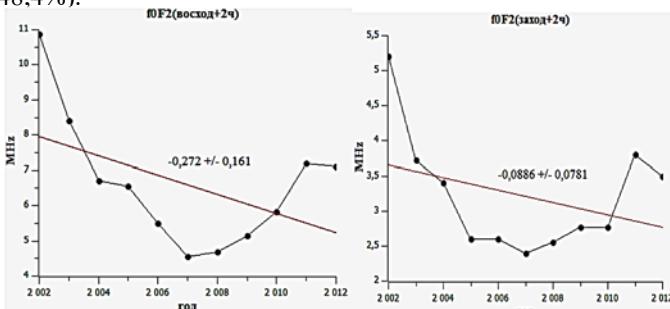


Рис. 1. Отрицательные тренды критических частот  
в моменты времени  $t(\text{восход}+2\text{ч})$  и  $t(\text{заход}+2\text{ч})$

На рис. 1 приведены линейные тренды критических частот  $f0F2$  для восхода+2ч и захода+2ч. Линейные тренды в значениях  $f0F2$  составили

$-0,272$  МГц/год  $+/-0,161$  для  $t(\text{восх}+2\text{ч})$  и  $-0,0886$  МГц/год  $+/-0,0781$  для  $t(\text{зах}+2\text{ч})$ . Уровень ночной ионизации почти не меняется по сравнению с дневной.

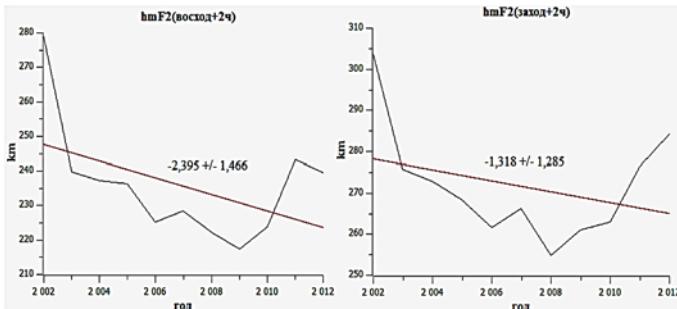


Рис. 2. Отрицательные тренды максимальных высот слоя F2 на восходе и заходе

Из рис. 2 видно, что тренды максимальных высот восхода+2ч и захода+2ч, также отрицательны и составили  $-2,395 +/- 1,466$  км/год для  $t(\text{восх}+2\text{ч})$  и  $-1,318 +/- 1,285$  км/год для  $t(\text{зах}+2\text{ч})$ .

Тренд в вариациях критических частот  $f_0$  слоя F2 коррелирует с трендом в вариациях солнечной активности  $W$  ( $\approx 0,64$  для  $t(\text{восх}+2\text{ч})$  и  $\approx 0,706$  для  $t(\text{зах}+2\text{ч})$ ).

Из полученных данных можно утверждать, что при увеличении значения одной переменной увеличивается значение другой переменной.

Из графиков видно, что более отрицательные тренды видны на максимальных высотах:

- на восходе начиная с 278,75 км опускается до 218 км;
- на заходе с 303,6 км опускается до 254,85 км.

Критическая частота также имеет менее значимую тенденцию к уменьшению, чем высота:

- $-0,272$  МГц/год  $+/-0,161$  в момент времени  $t(\text{восх}+2\text{ч})$ ;
- $-0,0886$  МГц/год  $+/-0,0781$  в момент времени  $t(\text{зах}+2\text{ч})$ .

Из всех данных, которые были получены при исследовании, можно сформулировать следующим образом:

1. Бремер первым коррелировал между солнечной активностью и критической частотой.

Аналогично по методу Бремера были получены следующие данные: тренд в вариациях критических частот слоя F2 коррелирует с трендом в вариациях солнечной активности ( $\sim 0.938$  для 00LT и  $\sim 0.948$  для 12LT) и температуре в приземном слое атмосферы. И, хотя представленные результаты наблюдений, возможно носят региональный характер, не исключено, что это связано с вариациями в космической погоде и с общим потеплением климата на Земле.

2. Полученные данные так же, как и в работах А.Д. Данилова, подтверждают о концепции охлаждения верхней атмосферы. Ластовичка и Крижан в 2006 г. первыми высказали предположение, что возможно в это время происходит изменение трендов динамики во всей среднеширотной средней атмосфере северного полушария.

3. Стало ясно, что вековые изменения геомагнитного поля, которые некоторые исследователи рассматривали как основную причину долговременных изменений параметров верхней атмосферы и ионосферы, не вносят существенного вклада в термосферные и ионосферные тренды. На территории Республики Саха (Якутия) нет крупных промышленных производств (например, хи-

мических заводов), т.е. находится в экологически «спокойной» зоне. Последние, возможно, являются результатом антропогенных эффектов, вызывающих охлаждение и оседание средней и верхней атмосферы.

4. Проблема долговременных изменений параметров средней и верхней атмосферы стала уже настолько очевидной, что ставится вопрос о новом подходе к созданию моделей атмосферных и ионосферных параметров.

**Список литературы**

1. Бонч-Бруевич В.Д. Материалы к изучению русского сектантства и раскола. – П.Б., вв. I–IV, в. VII. – СПб., 1909–1918.
2. Георгиевская В. Русские духовные стихи: исполнительство и бытование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://soundball.ru/article\\_duh\\_stih.htm](http://soundball.ru/article_duh_stih.htm) (дата обращения: 30.10.15).
3. Ранчин А.М. Духовные стихи // Большая российская энциклопедия. – Т. 9. – М., 2007. – С. 439–440.
4. Сперанский М.Н. Русская устная словесность. – М., 1917.
5. Энциклопедический словарь Брокгауза и Эфрона: в 86 т. (82 т. и 4 доп.). – СПб., 1890–1907.

**Зубова Наталья Сергеевна**

студентка 3 курса

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

Научный руководитель:

**Петухов Иван Станиславович**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

ИКФИА им. Ю.Г. Шафера СО РАН

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **ПОНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, ВЫЗВАННОЕ МАГНИТНЫМ ОБЛАКОМ**

**Аннотация:** в данной статье авторами рассматривается вопрос понижения интенсивности галактических космических лучей. Исследователи анализируют взаимодействие космических лучей и магнитного облака.

**Ключевые слова:** интенсивность, космические лучи, магнитное облако.

Форбуш-эффект – кратковременное и резкое понижение интенсивности галактических космических лучей. Эффект объясняется повышенным рассеянием галактических космических лучей возмущениями межпланетного магнитного поля, переносимыми солнечным ветром от Солнца к границам гелиосферы. Возмущения солнечного ветра имеют сложную внутреннюю структуру: внутри выброса коронального вещества может находиться магнитное облако, если скорость выброса выше скорости солнечного ветра, то перед ним образуется область обтекания, если же скорость выброса выше скорости магнитного звука, то возникает ударная волна. Каждая из этих областей может воздействовать на космические лучи и давать вклад в эффект Форбуша. До сих пор точно не установлена природа Форбуш эффекта. Есть гипотеза, что это понижение вызвано адиабатическим охлаждением из-за расширения выброса коронального вещества. Другая гипотеза заключается в том, что магнитное поле выброса сильнее поля в межпланетной среде и это препятствует проникновению частиц внутрь. В данной работе рассматривается взаимодействие космических лучей и магнитного облака.

При рождении коронального выброса массы (КВМ) вблизи поверхности Солнца плазма оказывается заключенной внутри петлевой структуры скрученного солнечного магнитного поля. Затем эта петля вытягивается в межпланет-

ное пространство и, если условия способствуют сохранению упорядоченности, образуется жгут магнитных силовых линий, обвивающих сгусток плазмы, - магнитное облако (МО).

По теореме Лиувилля, интенсивность частиц вдоль траектории в шестимерном фазовом пространстве не меняется. Изменение интенсивности может быть вызвано или изменением энергии частиц (ускорение) вследствие их стечения спектра или наличием «запрещенных» траекторий. Поэтому для расчета интенсивности космических лучей на Земле, нам необходимо рассчитать множество траекторий частиц, приходящих в ее окрестности. Для расчета траекторий космических лучей используется метод Рунге-Кутта 4-го порядка точности.

Главная проблема, это определить магнитное поле, в котором распространяются частицы. Для межпланетного пространства используется модель Паркера, в которой магнитные линии имеют форму спирали Архимеда. На рисунке 1 для примера приведены траектории частиц в межпланетном магнитном поле.

В настоящее время нет общепринятой модели динамики магнитного облака в межпланетном пространстве. Мы предлагаем в качестве такой использовать кинематическую модель, поскольку: 1) влияние бессилового магнитного поля мало; 2) кинетическая энергия течения значительно превышает тепловую энергию.

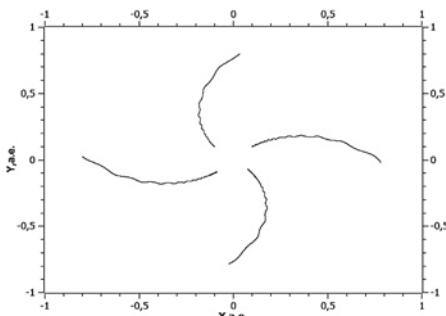


Рис. 1. Траектории частиц в паркеровском поле. Полагаем, что в точке с координатами  $(0,0)$  – начале отсчета – расположено Солнце

В предлагаемой модели магнитного облака для определения магнитного поля в облаке предполагаем, что в начальный момент времени облако имеет форму сегмента тора и его магнитное поле соответствует решению Миллера и Тернера. В последующие моменты времени магнитное поле определяется условием вмопрежности, представленным в виде сохранения магнитного потока через площадку, связанную с лагранжевыми частицами течения. Предлагаемая модель динамики магнитного облака в общем соответствует измерениям, поскольку в наблюдаемых событиях распределение скорости лагранжевых частиц течения, как правило, находится в ограниченном диапазоне, что является причиной сохранения магнитной структуры поля облака.

Траектории частиц в магнитном облаке считаются так же методом Рунге-Кutta. В каждый момент времени необходимо установить местонахождение частицы и определить находится она в межпланетном магнитном поле или в магнитном облаке, задать соответствующее магнитное поле, и определить новые координаты и скорость частицы. Для удобства расчет ведется обратно по времени.

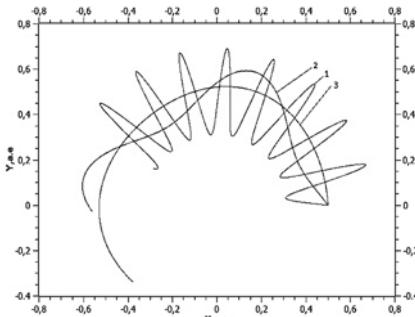


Рис. 2. Линии магнитного поля внутри МО на различной глубине:  
1 — 0,01 а.е.; 2 — 0,1 а.е.; 3 — 0,2 а.е.

Таким образом, мы рассчитываем траектории частиц, приходящих на Землю с различных направлений и определяем, откуда приходит частица, если из внешней гелиосферы то считаем ее невозмущенной и интенсивность таких частиц не изменяется. Если это траектории, которые приходят из торцов сегмента тора, то считаем такие траектории «запрещенными». Если считать «вес» невозмущенной траектории = 1, а «запрещенной» = 0, то можно оценить интегральную интенсивность, которая будет регистрироваться в различных точках магнитного облака.

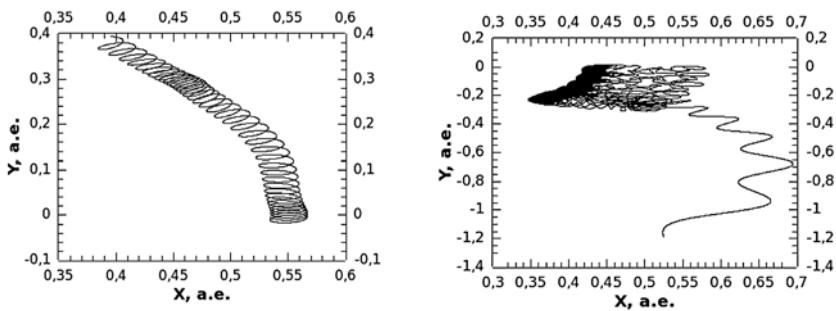


Рис. 3. Траектории частиц внутри МО.

Результаты расчета приведены на рисунке 4. Выделенные линии иллюстрируют не возмущенные частицы, тонкие - пришедшие из области торцов. Расчеты показали, что чем выше энергия частицы, тем глубже в магнитное облако она может проникать. Поэтому даже в центре тора значительная часть частиц может приходить извне, для частиц с малыми энергиями в центр тора они могут попасть только из области торцов. Так же стоит обратить внимание на разницу интенсивности космических лучей в области перед магнитным облаком и за ним. Эта разница объясняется тем, что вблизи Солнца магнитное поле очень сильное и космические лучи не могут прийти с другой стороны.

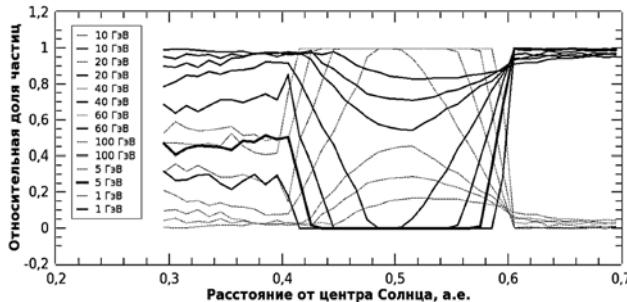


Рис. 4. Относительная доля частиц, прошедших внутрь МО

Полученная картина согласуется с экспериментальными данными: амплитуда Форбуш понижения для частиц с низкой энергией больше, наблюдается резкое падение и постепенное восстановление интенсивности космических лучей.

В дальнейшем необходимо задать магнитное поле в областях за торцами сегмента тора и рассчитать в них траектории частиц. Задать магнитное поле выброса коронального вещества, в области обтекания и на ударной волне. Это позволит определить вклад каждой частицы возмущения и получить значение интенсивности галактических космических лучей во время Форбуш эффекта.

#### *Список литературы*

1. Защенкер Г.Н., Зеленый Л.М. Магнитные облака [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.federalspace.ru/182/>
2. Кичигин Г.Н. Магнитное поле Паркера и релятивистские джеты // ЖЭТФ. – 2014. – Т. 146. – Вып. 4 (10). – С.747–753.
3. Miller G., Turner L. Force free equilibria in toroidal geometry, Phys. Fluids, 24. – 1981. – Р. 363–365.

**Коркина Валентина Николаевна**

студентка 4 курса  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)  
Научный руководитель:  
**Козлов Владимир Ильич**  
канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник  
ИКФИА им. Ю.Г. Шафера СО РАН  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## КАЛИБРОВКА УРОВНЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОШУМОВ ОНЧ ДИАПАЗОНА В Г. ЯКУТСК

**Аннотация:** в представленной работе описано проведение калибровки уровня естественных радиошумов ОНЧ диапазона в г. Якутск сертифицированной измерительной дипольной активной антенной ПБ-51. Коэффициент пересчета относительных значений данных регистратора в значения электрического поля составляет  $K = 632 \text{ мкВ}/(\text{В}^* \text{м}^* \text{Гц}^{1/2})$ .

**Ключевые слова:** радиошум, ОНЧ диапазон, временная синхронизация, суточная вариация величины радиошума.

В ФТИ СВФУ совместно с ИКФИА СО РАН (Якутск) ведутся многолетние непрерывные мониторинговые наблюдения уровня естественных радиошумов ОНЧ диапазона в г. Якутск на частотах 11,9 кГц, 12,6 кГц и 14,88 кГц. Измерения и данные анализа произведены в относительных единицах. Стоит задача

проводить абсолютную калибровку этих измерений. Для этого используется сертифицированная активная дипольная антенна П6-51 и спектроанализатор, состоящий из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) Е14-440, подключенного к ноутбуку и программного обеспечения (ПО) спектроанализатора «LGraph2», позволяющего с помощью данного АЦП производить абсолютные спектральные измерения относительно уровня  $1 \text{ В}/(\text{м}^*\text{Гц}^{1/2})$ .

Актуальность работы в том, что с помощью наблюдения уровня радиошумов в ОНЧ диапазоне можно получить данные о вариациях параметров распространения и плотности грозовых разрядов, поскольку радиошумы в ОНЧ диапазоне состоят в основном из перекрывающихся радиоимпульсов молниевых разрядов – атмосфериков.

Новизна работы определяется тем, что наблюдения радиошумов в ОНЧ диапазоне, ведущиеся в основном в европейской части России. В наших исследованиях рассматривается радиошумы на Севера-Востоке Азии.

Решаемые задачи: калибровка спектроанализатора, состоящего из АЦП Е14-440, компьютера (Windows 7) и ПО Lgraph2; измерение спектра радиошума в ОНЧ диапазоне в Якутске, за городской чертой (5 км от края города) и на радиополигоне ИКФИЯ (23 км от г. Якутска); сравнение данных регистрации уровня радиошума и абсолютной калибровки в диапазоне частот 11–15 кГц.

В диапазоне 9 кГц – 30 МГц источником радиошума является атмосферный шум грозовых разрядов – широкополосный некоррелированный импульсный шум [1]. При измерениях естественного радиошума в ОНЧ диапазоне необходимо учитывать, что радиошум состоит из флюктуационной и импульсной составляющих – радиоимпульсов, излучаемых грозовыми разрядами – атмосфериками. Флюктуационные радиошумы – непрерывная случайная последовательность накладывающихся друг на друга небольших импульсов дальних грозовых разрядов, испытавших большое затухание при распространении. Согласно рекомендаций Международного союза электросвязи на частотах ниже 30 МГц частота (или полоса) измерения не свободна в течение всего периода измерений. Поэтому рекомендуется проводить измерения на нескольких частотах [2]. В нашем случае мы проводим измерения на трех близких частотах 11,9 кГц, 12,6 кГц и 14,88 кГц. От импульсной составляющей избавляемся, используя переход к единицам измерения в дБ, учитывая логарифмически-нормальный закон распределения уровней радиошумов, и вычисляя при каждом этапе усреднения медианное значение. На первом этапе проводится медианное усреднение на одной посылке пакета (0,4 сек.), а на втором этапе проводится медианное усреднение на интервале 3 минут. Поправка определяется проведенной калибровкой при помощи подключения к приемнику источника белого шума (калибровка от генератора шума Г2-12), сбора нескольких выборок измерения и определения среднего среднеквадратичного уровня из выборок.

Анализ спектра радиошума, измеренный 08.05.15 спектроанализатором на основе измерительной антенны П6-51 и АЦП Е14-440 с ПО спектроанализатора «Lgraph2», на частоте 11,9 кГц показал, что средний уровень радиошума равен – 122 дБср.квадр.В/(Гц<sup>1/2</sup>). С учетом Кант = 20,1 дБ/м получаем – 101,9 дБср.квадр.В/(м<sup>\*Гц<sup>1/2</sup>), что соответствует значению поля 8 мкВ/(м<sup>\*Гц<sup>1/2</sup>). Большая вариабельность радиошума обусловлена короткими реализациями, используемыми в спектральном анализе ПО спектроанализатора «Lgraph2».</sup></sup>

Для частоты 14,88 кГц средний уровень радиошума равен – 117 дБср.квадр.В/(Гц<sup>1/2</sup>). С учетом Кант = 20,1 дБ/м получаем – 96,9 дБср.квадр.В/(м<sup>\*Гц<sup>1/2</sup>), что соответствует значению поля 14,3 мкВ/(м<sup>\*Гц<sup>1/2</sup>) для частоты 14,88 кГц.</sup></sup>

Одновременно проводилась регистрация радиошумов на частотах 11,9 и 14,88 кГц регистратором в ФТИ, данные которого и необходимо прокалибровать. График суточной вариации радиошума на частоте 11,9 кГц приведен на рис. 1, а для частоты 14,88 кГц приведен на рис. 2. Зачеркнутым кружочком на рис. 1 и рис. 2 показано значение, соответствующее по времени измереннымами в полевых условиях.



Рис. 1. График суточной вариации радиошума на частоте 11,9 кГц

Показания спектроанализатора с измерительной антенной П6-51 для 12,649 кГц составляют 8 мкВ/(м<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>), а показания регистратора в ФТИ 7 мкВ/(м<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Отличие составляет 12 %, что укладывается в погрешность измерения. Для 14,881 кГц показания спектроанализатора с измерительной антенной П6-51 составляют 14,3 мкВ/(м<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>), а показания регистрация в КФЕН ФТИ 18 мкВ/(м<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Показания довольно близки и отличаются на 25%, что соответствует погрешности измерений.

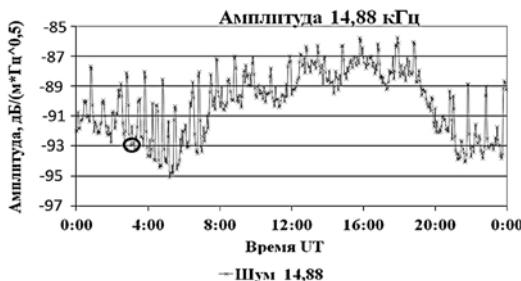


Рис. 2. График суточной вариации радиошума на частоте 14,88 кГц

Проведено сравнение данных измеренных спектроанализатора Lgraph2 и регистратора радиошума и сигналов радиостанций «Альфа».

Выводы. Получен суточный ход радиошума 08.05.2015 приведенный к значениям поля на входе антennы в дБВ/(м<sup>2</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Коэффициент пересчета от показаний регистратора в вольтах (В) к значению электрической составляющей электромагнитного поля на входе антennы равен  $K = 632 \text{ мкВ}/(V^2 \cdot m^2 \cdot Гц^{1/2})$ . Коэффициент пересчета определяется действующей высотой штыревой антennы, равным  $h_d = h/2$ , где  $h$  – геометрическая высота штыревой антennы, измеренная в метрах, коэффициентом усиления предварительного (антенного) усилителя,  $K_{пу} = 41$  и шириной полосы пропускания, используемой при спектральном анализе и ранней 372 Гц.

#### *Список литературы*

1. Рекомендация МСЭ-R P.372-11 (09/2013). Радиошум. Серия Р. Распространение радиоволн. ITU. Международный союз электросвязи. – Женева, 2014. – 76 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>
2. Рекомендация МСЭ-R SM.1753-2 (09/2012). Методы измерения радиошума. Серия SM. Управление использованием спектра. ITU. Международный союз электросвязи. – Женева, 2013. – 36 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>

**Сутакова Яна Григорьевна**

студентка 4 курса

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

Научный руководитель:

**Козлов Владимир Ильич**

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

ИКФИА им. Ю.Г. Шафера СО РАН

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## КАЛИБРОВКА СИГНАЛОВ ОНЧ РАДИОСТАНЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ДИПОЛЬНОЙ АКТИВНОЙ АНТЕННЫ П6-51

**Аннотация:** в данной работе описано проведение калибровки регистратора сигналов РСДН-20 радиостанций ОНЧ диапазона принимаемых в г. Якутске с помощью, сертифицированной измерительной дипольной активной антенны П6-51. Коэффициент пересчета относительных значений данных регистратора в значения электрического поля составляет  $K = -57 \text{ дБ/(м}^*\text{Гц}^{1/2}\text{)}.$

**Ключевые слова:** радиостанция, ОНЧ диапазон, временная синхронизация, амплитудная вариация сигналов радиостанций.

В ФТИ СВФУ совместно с ИКФИА СО РАН (Якутск) ведутся многолетние непрерывные мониторинговые наблюдения сигналов навигационных радиостанций с 2009 г. Измерения и данные анализа произведены в относительных единицах. Для исследования затухания сигналов необходимо провести абсолютную калибровку этих измерений. Для этого используется сертифицированная активная дипольная антенна П6-51 и спектроанализатор, состоящий из АЦП E14-440, подключенного к ноутбуку и программы спектроанализатора LGraph2, позволяющей с помощью данного АЦП производить абсолютные спектральные измерения относительно уровня  $1 \text{ В/м}^*(\text{Гц})^{1/2}$ .

Актуальность работы в том, что с помощью наблюдения амплитудных и фазовых вариаций сигналов радиостанций системы «Альфа», работающих в ОНЧ диапазоне можно получить данные о вариациях параметров распространения радиосигналов на этих частотах. Литературные данные о распространении радиосигналов в ОНЧ диапазоне весьма ограничены.

Новизна работы определяется тем, что наблюдения о распространении радиосигналов в ОНЧ диапазоне, ведущиеся в России на кафедре радиофизики в СПбУ производятся для сигналов, распространяющихся с Востока на Запад. В наших исследованиях рассматривается распространение Запад-Восток, причем как приблизительно по параллели, так и в меридиональном направлении.

Решаемые задачи: калибровка спектроанализатора на АЦП E14-440 и программы LGraph2; абсолютные измерения амплитуды сигналов навигационных радиостанций в гг. Хабаровск и Новосибирск на частотах 11,9 кГц, 12,6 кГц и 14,88 кГц с помощью измерительной антенны в полевых условиях; сравнение данных амплитуды сигналов навигационных радиостанций, измеренных с помощью сертифицированной антенны, АЦП E14-440 (штатная программа спектроанализатора «LGraph2») и комплекса измерения амплитудных и фазовых вариаций сигналов радиостанций системы «Альфа», собранной на основе АЦП USB3000 со специальным программным обеспечением и работающего в ФТИ СВФУ.

Система РСДН-20 состоит из трех радиостанций, мощностью передатчиков 50 кВт: в Новосибирске, в Краснодаре и в Хабаровске, каждая из которых излучает на трех частотах, 11,9 кГц, 12,6 кГц, 14,88 кГц. Длительность радиоимпульсов, заполненных гармоническим сигналом одной из трех частот, равна 0,4 с. Задержка между радиоимпульсами равна 0,2 с. Пакет сигналов с периодичностью повторяется каждые 3,6 секунд. Период повторения пакета равен  $6 \times 3,6 = 21,6$  секунды.

Сигнал принимается на электрическую штыревую антенну, высотой 4 м, и после предварительного усиления в 40 раз, поступает на вход 14-ти разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) типа USB 3000. Привязка к абсолютному времени и высокостабильная частота дискретизации АЦП, необходимые для регистрации фазы радиосигналов и запуска сбора данных в соответствии с режимом работы ФРНС организованы при помощи GPS часов (Trimble Thunderbolt). Сигнал 10 МГц, в переходном устройстве GPS2500 превращается в меандр 2,5 МГц и используется как сигнал тактового генератора [2]. Оцифрованный сигнал подаётся на ноутбук со специальной программой регистрации [1].

Получены следующие результаты. Разница в измерениях между селективным микровольтметром, среднеквадратичным милливольтметром и анализатором LGraph2 составляет не более 0,4 дБ или 5%, что не превышает нормативную погрешность селективного и среднеквадратичного вольтметров. Проведены абсолютные измерения амплитуды сигналов навигационных радиостанций в гг. Хабаровск и Новосибирск на частотах 11,9 кГц, 14,88 кГц принятых на 5 км от края города, 16-17 июля и 24 сентября 2014 г, 8 мая 2015 г.

08.05.2015 года проводилась регистрация амплитудных значений принимаемых сигналов радиостанций системы «Альфа» регистратором установленном в ФТИ СВФУ (Якутск). Данные регистрации за эти сутки представлены для частоты 14,88 кГц на рисунке. При расчете амплитудных значений электрического поля на входе антенны, учтен коэффициент усиления антенного усилителя и рассчитанная действующая высота штыревой антенны  $h_d = h/2 = 2$  м. Получится значение в единицах В/м. Для получения значения поля в единицах  $\text{мкВ}/(\text{м}^*\text{Гц}^{1/2})$  нужно в перевести в мкВ и разделить на корень из полосы пропускания 372 Гц.

Одновременно были проведены абсолютные измерения электрической составляющей электромагнитного поля на этих же частотах с помощью, сертифицированной дипольной активной антенны П6-51 и АЦП Е14-440 с программным обеспечением «LGraph2». Значения величины сигналов радиостанций в эти моменты времени на рисунках обозначены кружочками.

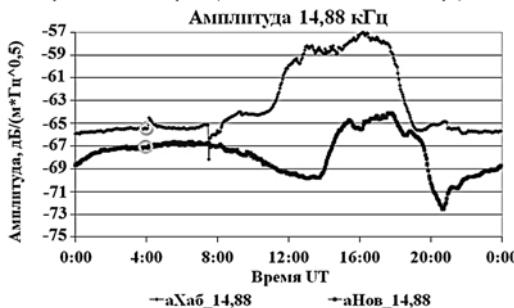


Рис.1. Суточная вариация амплитудных значений сигналов Хабаровской и Новосибирской радиостанций 08.05.2015 на частоте 14,88 кГц

Проведено сравнение данных регистрации амплитуды сигналов навигационных радиостанций и их абсолютной калибровки. Для 14,88 кГц для радиостанции Новосибирск значение показания регистратора составляет –

67 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), а показание спектроанализатора – 66,7 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), отличие 0,3 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Для 11,904 кГц для радиостанции Новосибирск значение показания регистратора составляет – 68,8 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), а показание спектроанализатора – 63,4 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), отличие на 5,4 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Для 14,88 кГц для радиостанции Хабаровск значение показания регистратора составляет – 65,5 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), а показание спектроанализатора – 61,9 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), отличие на 3,6 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Для 11,904 кГц для радиостанции Хабаровск значение показания регистратора составляет – 63,7 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), а показание спектроанализатора – 61,7 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>), отличие на 2 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>). Различия в рамках по-грешности приборов.

Полученный коэффициент пересчета данных регистратора в электрическое поле составляет К=–57 дБ/(м<sup>\*</sup>Гц<sup>1/2</sup>).

#### *Список литературы*

1. Каримов Р.Р., Козлов В.И., Корсаков А.А., Муллаяров В.А., Мельчинов В.П. Вариации параметров сигналов радионавигационных станций, регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – №4. – С. 57–62.
2. Козлов В.И., Каримов Р.Р., Муллаяров В.А. Регистратор сигналов сверхдлинноволновых радиостанций с синхронизацией от GPS-часов // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – №5. – С. 153–154.

**Жирнова Екатерина Викторовна**  
студентка 5 курса  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ГОРОДА ЯКУТСКА

**Аннотация:** целью данной работы является мониторинг солнечной инсоляции в городе Якутске и исследование зависимости работы тонкопленочного и кристаллического фотоэлектрических модулей (ФЭМ) от погодных условий.

**Ключевые слова:** солнечная инсоляция, солнечная батарея, фотоэлектрический модуль, тонкопленочный ФЭМ, кристаллический ФЭМ, мониторинг, солнечная радиация, температура, погодные условия, мощность, КПД, энергия.

С середины июня 2013 г. ФТИ СВФУ проводит совместные работы с «НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе» в области возобновляемой солнечной энергетики. Для целей реализации проекта по созданию совместной системы мониторинга солнечной инсоляции в г. Якутске на здании корпуса факультетов естественных наук (КФЕН) СВФУ установлена тестовая фотоэлектрическая система (ТФЭС) для мониторинга фотоэлектрических модулей.

#### Исследуемые модули:

- панель солнечных батарей из микроморфных тонкопленочных фотоэлектрических элементов (ММ СБ);
- панель солнечных батарей из монокристаллических фотоэлектрических элементов (МК СБ).

Для получения общей картины взяты средние месячные значения за отчетный период следующих параметров: среднедневная солнечная радиация; среднесуточная температура окружающей среды; среднедневная энерговыработка ФЭМ.

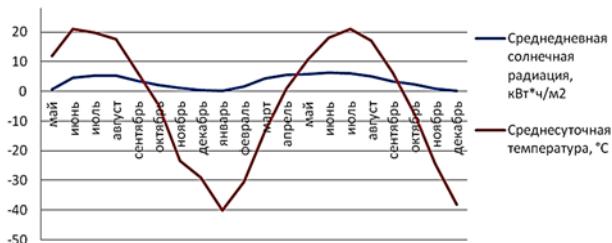


Рис. 1. Среднедневная солнечная радиация и среднесуточная температура окружающей среды за отчетный период

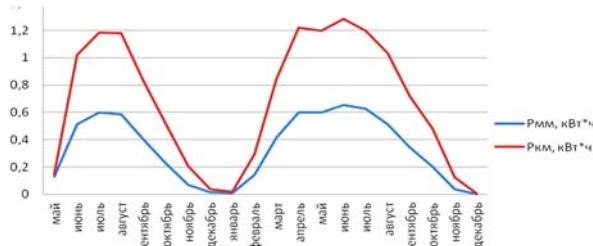
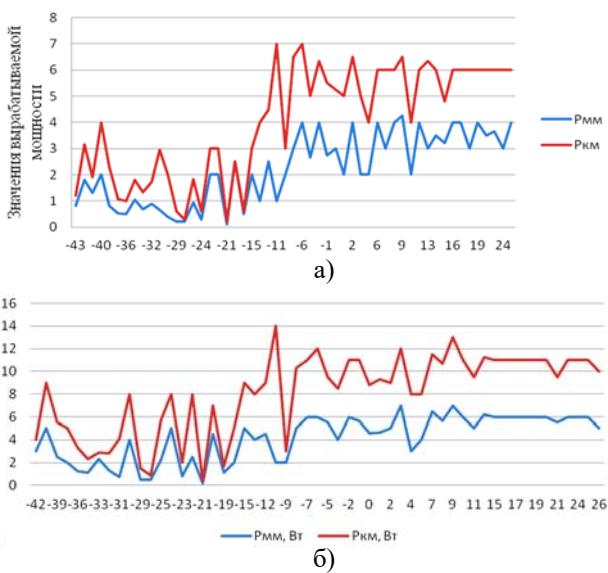


Рис. 2. Среднедневная энерговыработка модулей за отчетный период

На рисунках 1 и 2 показана зависимость энерговыработки от солнечной радиации и температуры окружающей среды. Вырабатываемая мощность микроморфного модуля (РММ) ниже чем у кристаллического (РКМ).



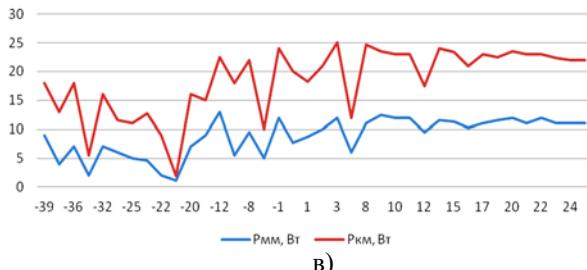


Рис. 3. Выработка мощности в моменты времени при солнечной радиации 30 Вт на кв.м. (а), 50 Вт на кв.м. (б) и 100 Вт на кв.м. (в) в зависимости от температуры

б)

Влияние слоя снега на получаемую ФЭМ солнечную радиацию и вырабатываемую мощность

Таблица 1

Слой снега	Солнечная радиация, Вт*м <sup>2</sup>	РММ, Вт	Ркм, Вт
15-20 мм	4	0,01	0,01
отсутствует	33	0,1	4,6
Разность значений:	в 8,25 раз увеличилась	в 10 раз увеличилась	в 460 раз увеличилась

На рисунке 3 показана зависимость вырабатываемой мощности от температуры окружающей среды. Данные были сняты при постоянной солнечной радиации в 30, 50 и 100 Вт\*м<sup>2</sup> и различных температурах за год. Наилучшие показания мощности получены в температурном диапазоне от -12°C до 12°C. Можем предположить, что резкие скачки вырабатываемой мощности связаны с осадками, туманами и облачностью, препятствующими попаданию солнечной радиации на поверхность ФЭМ, что представлено в таблице 1.

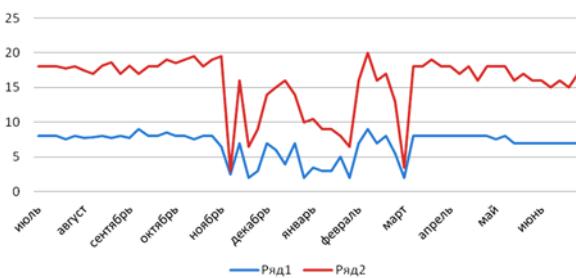


Рис. 4. Дневные значения КПД в течение года

Зафиксированный максимум значения КПД (рис. 4) кристаллического модуля (Ряд 2) – 20%, минимум – 3%, для микроморфного модуля (Ряд 1) максимумом является значение – 9%, минимумом – 2%. Опираясь на эти данные, выведем среднее значение и разброс КПД:

- для кристаллического модуля:  $8,5 \pm 35,3\%$ ;
- для микроморфного:  $7 \pm 28,6\%$ .

В результате выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Выработка ФЭМ зависит от температуры окружающей среды. Наилучшие показания энерговыработки получены в температурном диапазоне от  $-12^{\circ}\text{C}$  до  $12^{\circ}\text{C}$ .

2. Энерговыработка модулей пропорциональна получаемой солнечной радиации. В широтах города Якутска активность работы ФЭМ проявляется с первой декады февраля и до последней декады октября.

3. КПД монокристаллического модуля достигает 20%, мироморфного – 9%. Т.е. КПД кристаллического модуля выше в 2,2 раза выше во временном промежутке активной работы ФЭМ.

4. На выработку энергии сильно влияет осадок в виде слоя снега, резко препятствующий попаданию солнечной радиации на поверхность ФЭМ.

**Попов Василий Васильевич**

доцент-исследователь

Институт математики и информатики

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

**Мельчинов Виктор Петрович**

доцент кафедры радиотехники

и информационных технологий

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

**Павлов Айсен Афанасьевич**

студент 5 курса

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **РАСЧЕТ ФУНКЦИИ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ДИПОЛЯ НАД ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ**

**Аннотация:** Проведены расчеты функции ослабления радиоволн над плоской поверхностью земли путем численного решения интегрального уравнения. Полученные результаты сравнены с расчетами функции ослабления по классическим приближенным формулам.

**Ключевые слова:** функция ослабления радиоволн, приближенное решение интегрального уравнения, строгое численное решение интегрального уравнения.

Задача расчета напряженности поля диполя над землей сводится к определению функции ослабления для заданной частоты излучения.

Для вертикального электрического диполя интегральное уравнение для функции ослабления в полярной системе координат записывается в виде [1]:

$$w(R) = 1 - \frac{ikR}{2\pi\sqrt{\epsilon'}} \int_0^{R''} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-ik(r+R'-R)}}{r} w(R') dR' d\phi, \quad (1)$$

здесь  $\epsilon'' = \epsilon' + 1$ ,  $\epsilon' = \epsilon - i\sigma'\omega\omega$  – комплексная диэлектрическая проницаемость однородной модели земли,  $r = \sqrt{R^2 + R'^2 - 2RR'\cos\phi}$ .

Остальные обозначения приведены на рис. 1 для расположения излучателя в начале системы координат.

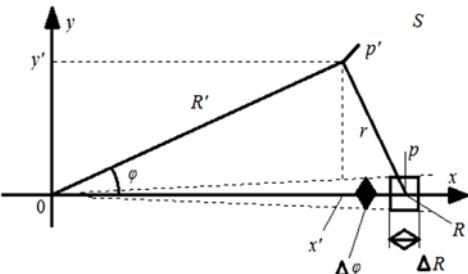


Рис. 1. Геометрия граничной плоскости  $S$

Следуя работе [2] разобьем площадь интегрирования на тонкие кольцевые участки шириной  $B_N$ , в пределах кольца функцию ослабления считается постоянной (рис. 2).

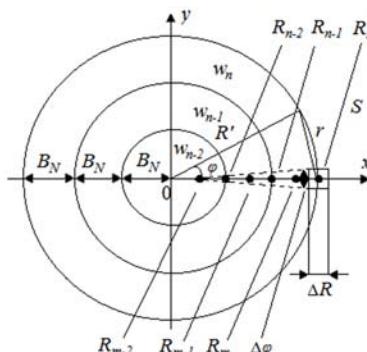


Рис. 2. Разбиение площади интегрирования на кольцевые участки

Функция ослабления вычисляется в середине кольцевых участков  $R_n$ ,  $R_{n-1}$ ,  $R_{n-2}$ .

Тогда ИУ (2) заменяется системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_{n=1}^N C_{m,n} w_n = 1, \quad (2)$$

где  $n = m = 1 \dots N$ .

Коэффициенты  $C_{m,n}$  вычисляются интегрированием:

$$C_{m,n} = \delta_{m,n} - \frac{ikR'm}{2\pi\sqrt{\varepsilon''}} \int_{R_{n-1}}^{R_n} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-ik(r+R'-R''m)}}{r} dR' d\varphi \quad (3)$$

Здесь возникает особая точка при  $m=n$  и  $R'=R''m$ ,  $r \rightarrow 0$ , которая вычисляется отдельно.

Программа вычисления интеграла (3) написана на языке СИ+ с разбиением площади интегрирования на 5000 кольцевых участков.

Результаты строгого решения интегрального уравнения (1) сравнивались с результатами вычислений по приближенной формуле решения интегрального уравнения для больших численных расстояний [1]:

$$w(R) = - \sum_{n=1}^N \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots 2n-1}{2 \left( \frac{ikR}{\varepsilon} \right)} \quad (4)$$

На рис. 1 приведены результаты сравнения модуля функции ослабления для различных моделей земли.

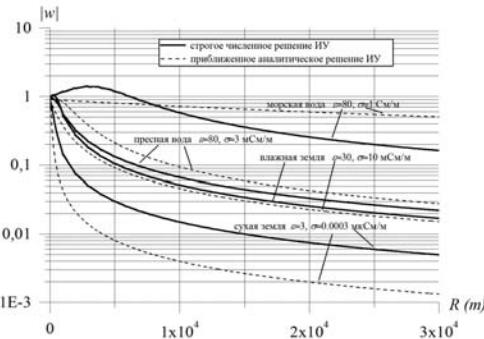


Рис. 1. Зависимости модуля функции ослабления от расстояния (5 МГц)

На рис. 2. приведены результаты сравнения фазы функции ослабления.

Как видно из рис. 1 хорошее совпадение строгого решения интегрального уравнения наблюдается только для влажной земли и пресной воды. Удовлетворительное совпадение фазы функции ослабления с приближенной формулой наблюдается только для модели влажной земли (рис. 2.). Значительное расхождение результатов строгого и приближенного методов требует дополнительных исследований.

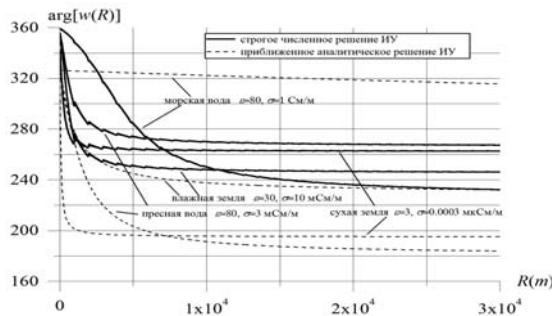


Рис. 2. Зависимости фазы функции ослабления от расстояния на частоте 5 МГц.

#### *Список литературы*

1. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. – 2-е изд. – М.: Наука. Физматлит, 1999. – 496 с.
2. Федоров С.А. Новые результаты по расчету ослабления электромагнитной волны вертикальной поляризации над плоской полупроводящей землей // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2014. – №11. – С. 53–60.

**Федоров Вячеслав Николаевич**  
 канд. техн. наук, доцент кафедры  
 радиотехники и информационных технологий  
**Гоголева Ньюргуяна Егоровна**  
 студентка 5 курса  
 Физико-технический институт  
 СВФУ им. М.К. Аммосова  
 г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ В МНОГОПРОВОДНЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

**Аннотация:** предложен способ подавления перекрестных помех путем подключения многопроводной линии связи к источникам/приемникам через преобразователь мод электромагнитных волн, выполненный на многообмоточных трансформаторах. В результате каждый абонент передает/принимает сигналы только на своем типе мод. Описано устройство преобразователя мод и приведены экспериментальные результаты и расчет для 4-х проводных линий связи.

**Ключевые слова:** многопроводные линии связи, подавление перекрестных помех, преобразователь мод.

Передача данных на большие расстояния по кабелям из витых пар на скоростях выше 100 Мбит/с практически невозможна из-за сильной электромагнитной связи между парами.

Если для многопроводной линии связи (ЛС) можно записать матрицу передачи  $[\alpha]$ , то в ней распространяются связанные электромагнитные волны (моды), которые не взаимодействуют друг с другом. Поэтому на этих модах возможна высокоскоростная передача/прием на большие расстояния.

Матрица передачи для n-проводной ЛС можно представить в виде [1]:

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} K & K \\ J & -J \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{-\gamma x} \\ e^{\gamma x} \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $K$  – матрица коэффициентов передачи по напряжению; матрица  $J$  проводимости линий 1,2...n для связанных волн (мод)  $A$  и  $B$ ;  $[e^{-\gamma x}, e^{\gamma x}]$  – матрица вектор постоянных распространения падающих и отраженных волн;  $A$  и  $B$  падающие и отраженные моды, соответственно.

В работе [2] было показано, что можно представить в виде произведения трех матриц:

$$[\alpha] = [\alpha]_T \cdot [\alpha]_d \cdot [\alpha]_T^{-1} \quad (2)$$

где  $[\alpha]_T$  – матрица передачи трансформатора мод;  $[\alpha]_d$  – матрица передачи несвязанных линий (мод). Следовательно, если по концам ЛС подключить устройства, матрицы передачи которых равны  $[\alpha]_d$ , то передача будет идти только на несвязанных линиях [3]:

$$[\alpha]_T^{-1} [\alpha] \cdot [\alpha]_T = [\alpha]_d \quad (3)$$

Например, для 4-х проводной ЛС матрица  $[\alpha]$  запишется:

$$[\alpha]_T = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Для симметричных ЛС с четным числом пар коэффициенты матрицы  $K$  являются элементами ортогональной матрицы Адамара и принимают значения

+1 и -1. Для симметричных ЛС с нечетным числом пар проводов эти коэффициенты являются элементами ортогональной матрицы Белевича и принимают значения 0, +1 и -1.

На рис 1 показана схема устройства для 4-х проводной ЛС с матрицей передачи равной  $[\alpha]_d$ .

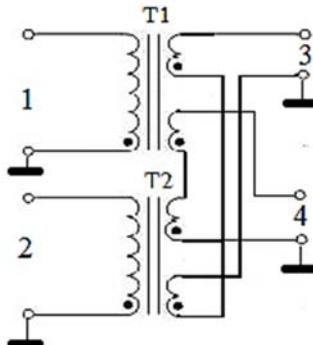


Рис. 1. Схема устройства, где 1, 2 – входы, 3, 4 – выходы,  
T1, T2 – трансформаторы

На рис.2 приведен макет такого устройства, где в качестве сердечников трансформаторов T1 и T2 используются ферритовые кольца.

Для экспериментальных исследований был выбран кабеля КСПВ-4х0,4 длиной 50 м нагруженный по концам на нагрузки 90 Ом.

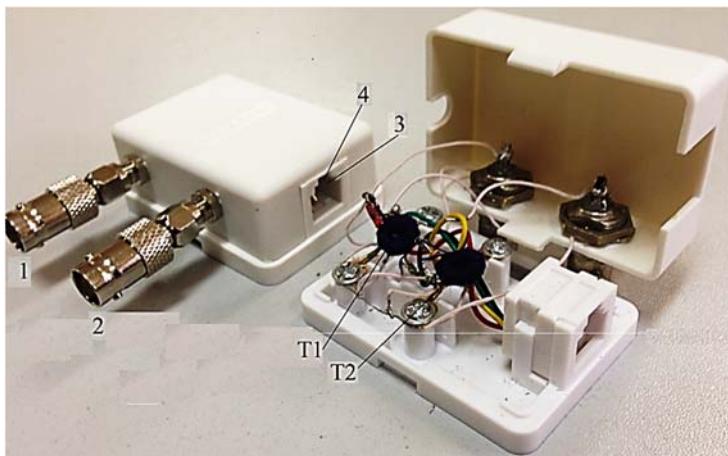


Рис. 2. Макет устройства, где 1, 2 – гнезда GSA-11 (входы 1, 2),  
3,4 – гнездо RJ-11 (выходы 3, 4)

С входа 1 на выход 3 генератором Г5-54 подавался импульс 1 В длительностью 200 нс. На выходах 2 и 4 сигнал регистрировался осциллографом GDS-70162.

На рис. 3 приведены осциллограммы сигналов на выходе 2 (ближний конец) с устройством подавления и без него.

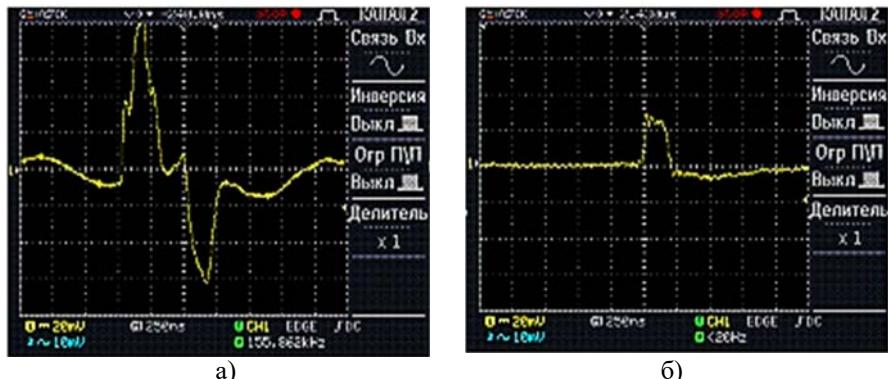


Рис. 3. Сигналы на выходе 2:  
а) без устройства подавления; б) с устройством

На рис. 4 приведены осциллограммы сигналов на выходе 4 ( дальний конец) с устройством подавления и без него. Из осциллограмм видно, что полного подавления помех на ближнем и дальнем конце кабеля не происходит. Это вызвано тем, что трансформаторы с ферритовыми сердечниками имеют нелинейный коэффициент трансформации и в ВЧ области работает плохо. Кроме того, расчеты показали, что даже незначительное отклонение погонных параметров от их симметричности приводит к ухудшению работы устройства.

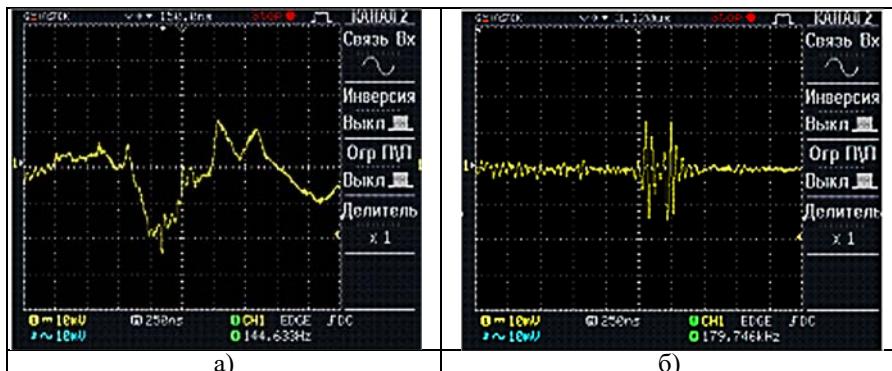


Рис. 4. Сигналы на выходе 4:  
а) без устройства подавления; б) с устройством

Таким образом, предложенный способ подавления перекрестных помех в ЛС позволит, после доработки, эффективно и достаточно просто подавить перекрестные помехи, не требуя априорного знания параметров сигнала, наличия опорного сигнала, упростить их производство и существенно увеличивает скорость передачи и дальность связи по существующим многопроводным линиям связи.

**Список литературы:**

1. Малютин Н.Д. Многосвязные полосковые структуры и устройства на их основе / Н.Д. Малютин. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1990. – 164 с.
2. Федоров В.Н. Исследование волновых процессов в связанных полосковых линиях и разработка на их основе быстродействующих аттенюаторов и динамических корректоров: Диссертация канд. техн. наук / В.Н. Федоров. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. 1999. – 169 с.
3. Федоров В.Н. Патент 145020 (РФ). Устройство для подавления перекрестных помех в многопроводных линиях связи. Опубл. в Б.И. – 2014. – №25.

**Петров Иван Владимирович**

студент 5 курса

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ  
КАЛИБРОВКИ ДАННЫХ СОЛНЕЧНОГО ФОТОМЕТРА  
SP-9 ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ФОТОМЕТРА CE-318 СЕТИ  
«AERONET» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ**

*Аннотация:* в данной статье автором рассматривается вопрос исследования основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля.

**Ключевые слова:** SP-9, аэрозоль, Cimel CE-318, NASA, AOT.

**Проблематика**

В настоящее время является уже установленным фактом, что средняя температура Земли возрастает. Среди различных факторов, вызвавших это изменение температуры, значительную роль играют парниковые газы, такие как CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, окислы азота, фреоны и др. Считается, что в этом списке заметную роль играет атмосферный аэрозоль, а также водяной пар – главный на сегодня парниковый газ. Поэтому знание свойств и содержания последних внесло бы существенный вклад в понимании и изучению формирования климата.

Под аэрозолем понимают совокупность взвешенных в атмосфере воздуха твердых или жидкого частиц с характерным размером от 0,01 до 10 мкм, которые могут находиться в атмосфере неопределенно долгое время. Атмосферные аэрозоли, образованные как атмосферными (например, сульфат, горящая биомасса, дым, сажа, черный углерод), так и естественными источниками (минеральная пыль и морская соль), характеризуются значительной региональной изменчивостью и могут давать заметный вклад в баланс тепла Земли. Это обусловлено тем, что аэрозоль менее изучен, и, кроме того, крайне недостает данных наземных измерений на региональном уровне. В настоящее время NASA располагает широкой сетью солнечных фотометров, число которых достигает более 100 [проект AERONET ([http://aeronet.gsfc.nasa.gov/nasa\\_menu.html](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/nasa_menu.html))] [1], расположенных в различных точках мира. Данные, полученные с солнечного фотометра SP-9, послужили основой для создания аэрозольных моделей [2]. Однако результаты наблюдений над территорией суши позволяют получить лишь две характеристики: аэрозольная оптическая толщина

(AOT) на длине волны 0,55 мкм и параметр Ангстрема. Два этих параметра позволяют описать поведение AOT в спектральном диапазоне, ограниченном 0,3–2,2 мкм.

#### *Методы исследования*

Для решения проблемы недостающих исследовательских данных, был разработан метод калибровки мобильного фотометра SP-9 под формат данных CIMEL CE-318. Метод калибровки заключается в следующем: разработка программного обеспечения с алгоритмом калибровки для работы с исходными файлами обоих фотометров и в дальнейшем поддержка автоматизации процесса обработки данных.

Формула калибровки данных:

$$AOT\ CE-318 / AOT\ SP-9 = Calibration\ Coef \quad (1)$$

Берем среднюю величину показателей изменения аэрозольной оптической толщины фотометра CIMEL CE-318 за сутки по отдельным каналам, делим на аналогично обработанные данные фотометра SP-9 и получаем калибровочный коэффициент за день. Программа автоматически проводит эту процедуру по обоим файлам полностью, обрабатывает за все совпадающие дни и совпадающие по длинам волн каналы.

#### *Описание работы алгоритма*

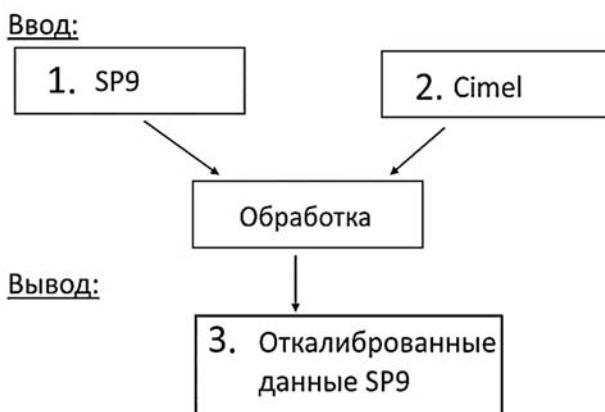


Рис. 1. Описание калибровочного процесса

#### *Результаты*

Было разработано оконное приложение под Windows с дружественным интерфейсом для пользователя.

Программа, в конечном итоге, не только способна на калибровку, а также она показывает график суточные изменения аэрозольной оптической толщи за указанный день обоих фотометров и может переводить время, что весьма также актуально, ибо фотометры работают по стандарту времени GMT+0.

Исходный код программы можно скачать по адресу:  
<http://github.com/Iwanmwn/SP-9-to-NASA-data-calibration>

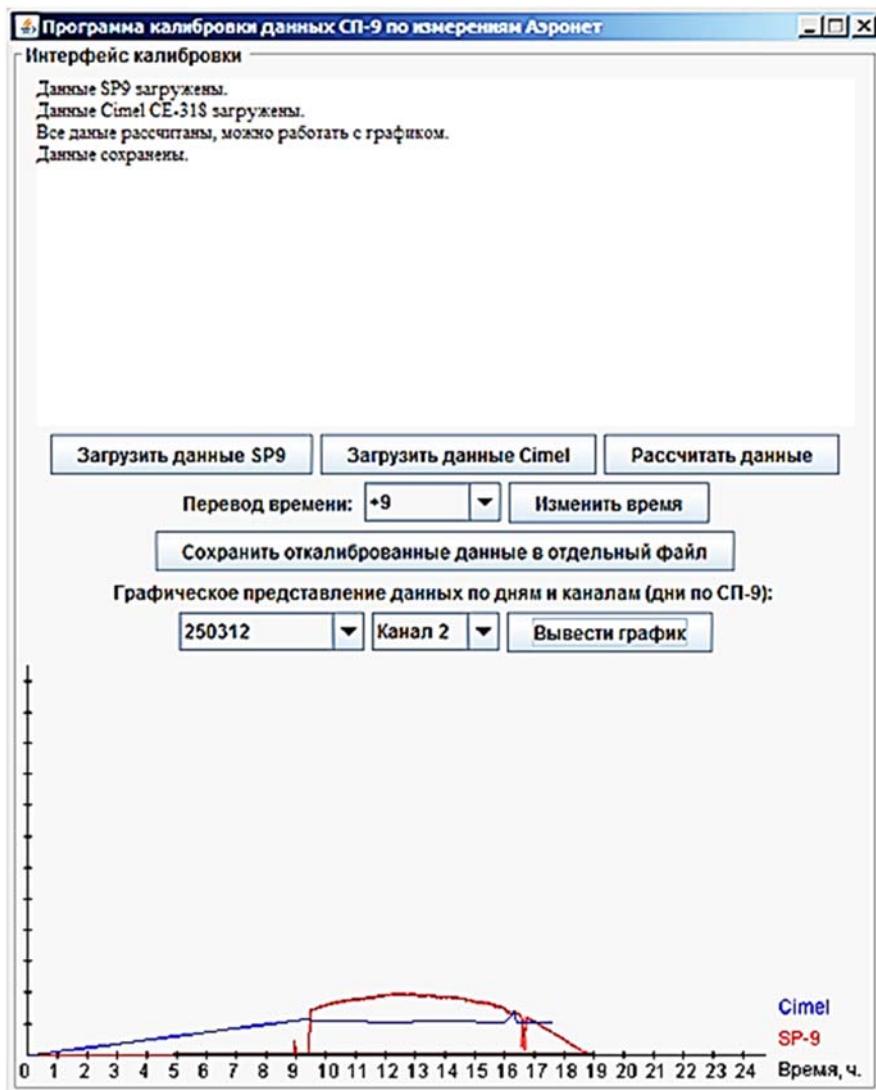


Рис. 2. Скриншот программы калибровки данных SP-9 по измерениям Аэронет

#### *Список литературы*

1. Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
2. Николашкин С.В., Тимофеева Г.А., Титов С.В. Оптические свойства атмосферного аэрозоля над Якутском // Наука и образование. – 2010. – №1 (57). – С. 12–16.

**Мельчинов Виктор Петрович**

канд. физ.-мат. наук, доцент

кафедры радиотехники и информационных технологий

**Степанов Арсен Николаевич**

студент 4 курса

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## УСТРОЙСТВО СЛЕЖЕНИЯ ЗА ОБЪЕКТАМИ НА ТЕРРИТОРИИ ДЕЙСТВИЯ СОТОВОЙ СВЯЗИ

**Аннотация:** в связи с внедрением спутниковой системы глобального позиционирования GPS расширяется область его использования. Возрастает актуальность использования системы GPS для определения местонахождения автомобилей, определения нахождения крупных домашних животных. Данная работа посвящена разработке устройства слежения за автомобилями и крупными домашними животными на территории действия сотовой связи.

**Ключевые слова:** спутниковая навигационная система, сотовая связь, модули GPS+GSM, программирование микроконтроллеров.

В состав устройства слежения за объектами входит трекер, который принимает сигналы спутниковой навигационной системы GPS с последующей передачей данных о местоположении в сеть Интернет посредством услуг, предоставляемых сотовыми операторами. Данные из сети Интернет поступают на сервер организации (СВФУ), представляющую услуги слежения за объектами. Эти данные могут храниться на сервере определенное время, задаваемое предприятием. Любой пользователь, имеющий доступ в Интернет, может запросить данные с сервера и на Веб -странице специально созданного сайта определить местонахождение интересующего его объекта слежения.

На рис.1 представлена структурная схема системы слежения за объектами. На объекте слежения, которое представляет собой транспортное средство или домашнее животное, установлен трекер со встроенными антеннами на частоты GPS и GSM. Количество трекеров может быть любое количество.

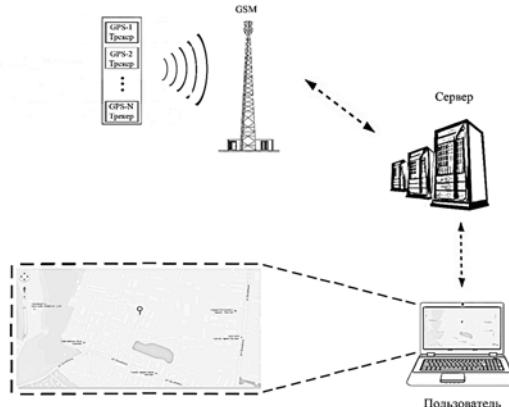


Рис. 1. Система отслеживания географических координат местонахождения объекта

Каждый трекер передает координаты своего местонахождения через сеть Интернет сотового оператора, который обозначен в виде антенны сотовой связи (GSM), на сервер организации. На сервере располагается обработчик, который записывает в базу данных поступающую информацию о координатах всех трекеров.

После авторизации на сайте, любой пользователь получает возможность отслеживания объекта со своего компьютера, имеющего выход в Интернет.

В трекере использован модуль SIM5320e со встроенным GPS приемником. Модуль SIM5320e является двухдиапазонным HSDPA/WCDMA и Quad-BandGSM/GPRS/EDGE модулем в SMT корпусе, который поддерживает HSDPA со скоростью до 3,6 Мбит для передачи данных по линии связи [1]. В данном модуле поддерживается работа встраиваемых пользовательских скриптов, написанных на языке LUA, а также работа в рамках технологий Embedded AT [2].

Для Sim – модуля написана программа на языке LUA, позволяющая передавать данные о состоянии трекера и его географические координаты на сервер Физико-технического института СВФУ. Эти данные хранятся на сервере до их обновления.

Отображение географических координат, хранящихся на сервере, в виде определенного значка на карте Google производится с помощью стандартных библиотечных программ Google. Веб-сайт разработан на системе управления контентом «Drupal 7». Реализованы программы обработки поступающих данных на сервер и возможность наблюдения за объектом на карте Google.

Обработка данных поступающих с трекеров, выполняется посредством PHP – скрипта, на котором написаны программы для хранения поступающей информации о местоположении и данных о состоянии трекера в базу данных MySQL [3]. Информация о состоянии трекера включает следующие данные: включен трекер или нет, номер sim-карты в трекере, номер sim-карты владельца, остаток средств на балансе sim-карты трекера, напряжение источника питания трекера.

### *Список литературы*

1. <http://www.mt-system.ru>
2. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Lua>
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/MySQL>

**Мельчинов Виктор Петрович**

доцент кафедры радиотехники  
и информационных технологий

**Кладкин Василий Павлович**

заведующий лабораторией кафедры РТиИТ  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МОДУЛЯ ФУНКЦИИ ОСЛАБЛЕНИЯ В ДВИЖЕНИИ**

**Аннотация:** предложен метод радиокомпариования в диапазоне средних и длинных волн с использованием измерительного комплекса, установленного на борту автомобиля. Измерительный комплекс состоит из селективного микровольтметра FSM-11, блока оцифровки регистрируемого сигнала и навигационного спутникового приемника для привязки по расстоянию.

**Ключевые слова:** метод радиокомпариирования, распространение радиоволн вдоль земной поверхности, функция ослабления, спутниковая навигация, импеданс подстилающей среды.

Известно, что при прогнозировании характеристик распространения земных радиоволн широко используется метод радиокомпариирования, сущность

которого состоит в сравнении экспериментальных и расчетных значений модуля функции ослабления радиоволны над импедансной поверхностью земли. Расчеты модуля и фазы функции ослабления проводятся численными методами на основе решения интегрального уравнения и связаны с выбором геоэлектрической модели подстилающей поверхности [1].

Экспериментальные значения модуля функции ослабления обычно определяются по измерениям напряженности поля вдоль исследуемых радиотрасс в пунктах наблюдений, отстоящих на несколько километров друг от друга. В работе [2] приведена методика радиокомпариования при измерениях с борта самолета. В данной работе приведено описание измерительного комплекса, установленного на автомобиле при непрерывных измерениях функции ослабления с использованием современных методов регистрации сигналов. Приведены результаты, полученные методом радиокомпариирования с борта автомобиля по трассе, проходящей через реку Лена.

Блок-схема радиоизмерительного комплекса приведена на рис. 1.

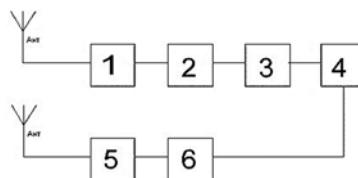


Рис. 1. Блок-схема измерительного комплекса для метода радиокомпариирования с борта автомобиля

Принимаемый радиосигнал с вертикальной антенны, установленной на автомобиле, поступает в антенный блок 1 селективного микровольтметра (FMA 6.2). Затем сигнал поступает на селективный микровольтметр 2 (SMV-11), представляющий собой супергетеродинный приемник с высокой чувствительностью. Низкочастотный сигнал с выхода микровольтметра SMV-11 поступает на АЦП 3 и далее на USB порт компьютера 4.

С выхода GPS-приемника 5 данные через адаптер 6 поступают на второй USB-порт ноутбука. Нами написана компьютерная программа для считывания географических координат с выхода GPS Alan Map 500 и записи в отдельный файл.

Напряжение на входе селективного микровольтметра прямо пропорционально напряженности принимаемого электромагнитного поля и определяется показаниями ступенчатого аттенюатора микровольтметра и выходного напряжения, записанного в память компьютера. При изменении уровня принимаемого антенной сигнала проводилось переключение ступенчатого аттенюатора вручную с шагом 5 dB. С помощью градуировочного графика записанные значения выходного напряжения переводятся в децибелы и складываются с показаниями ступенчатого аттенюатора микровольтметра. Эти показания соответствуют уровню сигнала в dB относительно 1 мкВ на входе селективного микровольтметра.

Экспериментальные значения модуля функции ослабления определяются нормированием произведений измеренных значений напряженности вертикальной составляющей электрического поля  $E_i$  на расстояние до передающей антенны  $R_i$  к величине произведения  $E_0 R_0$  на «базисном» пункте наблюдения, где  $|W| = 1$  [3]:

$$|W| = \frac{E_i \cdot R_i}{E_0 \cdot R_0} \quad (1)$$

Расстояние  $R_0$ , на котором определяется базисное значение напряженности поля  $E_0$ , находится из условия:  $1,5\lambda \leq R_0 \leq 3\lambda$ .

Точность определения модуля функции ослабления зависит от значения произведения  $E_0R_0$  на «базисных» пунктах – в нашем случае от произведения  $U_0BXR_0$ . Для определения модуля функции ослабления достаточно взять разность между значениями ( $U_{iBX}R_i - U_{0BX}R_0$ ) дБ.

Зная координаты передающей антенны и координаты текущей точки наблюдения, можно определить расстояние по известной формуле:

$$R_i = R_3 \cdot 2 \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \left( \frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right), \quad (2)$$

где  $\varphi_1, \lambda_1$ ,  $\varphi_2, \lambda_2$  – широта и долгота двух точек в радианах;  $\Delta \lambda$  – разность координат по долготе;  $R_3$  – радиус Земли.

На рис.1 приведены результаты сравнения измеренных и расчетных значений модуля функции ослабления на трассе Тулагино-Борогонцы на частоте 171 кГц.

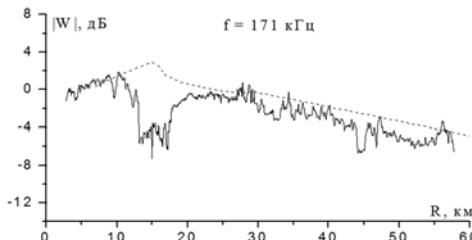


Рис. 1. Зависимости измеренных и расчетных значений модуля функции ослабления от расстояния на частоте 171 кГц

Расчеты модуля функции ослабления были проведены по алгоритму, описанному в [1] методом решения интегрального уравнения.

Значения модуля  $|\delta|$  и фазы  $\varphi_\delta$  импеданса были определены путем усреднения измеренных значений импедансметром ИПИ-100 в долине р. Лены:  $|\delta| = 0,107$  и  $\varphi_\delta = -62^\circ$ . При измерениях на льду:  $|\delta| = 0,046$  и  $\varphi_\delta = -170$ . На правом берегу р. Лены значения импеданса оказались следующими:  $|\delta| = 0,09$  и  $\varphi_\delta = -480$ .

Как видно из рис. 1, на расстоянии 12–18 км наблюдается уменьшение  $|W|$ , связанное с тем, что радиотрасса проходит по подножью горы. Однако, в среднем, экспериментальные значения  $|W|$  достаточно хорошо совпадают с результатами расчетов.

На рис. 2 приведены аналогичные зависимости для частоты 549 кГц. Для частоты 549 кГц электрические характеристики 3-хкусочный трассы на данной частоте оказались следующими:  $|\delta| = 0,177$  и  $\varphi_\delta = -46^\circ$ ;  $|\delta| = 0,007$  и  $\varphi_\delta = -30^\circ$ ;  $|\delta| = 0,18$  и  $\varphi_\delta = -34^\circ$ . Как видно из рис. 2, функция ослабления принимает достаточно большие отрицательные значения на конце трассы, что соответствует более сильному затуханию радиоволн данной частоты. Расстояния от 18 км до 28 км (участок русла реки) соответствует увеличению модуля функции ослабления из-за восстановления поля над хорошо проводящими структурами.

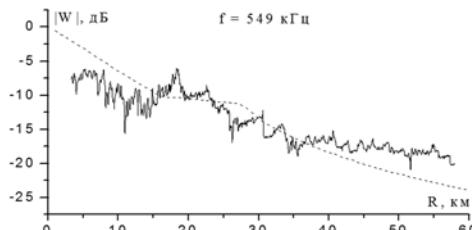


Рис. 2. Зависимости измеренных и расчетных значений модуля функции ослабления от расстояния на частоте 549 кГц

Таким образом, получены положительные результаты по использованию автоварианта метода радиокомпираивания на многокусочных трассах. В процессе измерений выяснилось, что уровень радиополя вдоль дорог с линиями электропередач и телеграфных проводов, по дорогам в населенных пунктах подвержен значительным флуктуациям при приеме на вертикальную электрическую антенну и интерпретировать изменения модуля функции ослабления  $|W|$  становится весьма сложной задачей.

#### *Список литературы:*

1. Проскурин Е.П. Распространение радиоволн над электрически и геометрически неоднородными трассами. Распространение радиоволн над земной поверхностью и ионосфере: Сборник статей / Е.П. Проскурин, А.А. Пылаев, Н.П. Тихомиров, А.А. Штейнберг. – 1981. – С. 171–183.
2. Жиряков В.Н., Рубинштейн В.И., Штейнберг А.А. Измерение модуля функции ослабления с борта самолета. Проблемы дифракции и распространения волн: Сборник статей / В.Н. Жиряков, В.И. Рубинштейн, А.А. Штейнберг. – 1990. – С. 185–188 с.
3. Курганов Л.С., Шаров Э.Э. Техника измерения напряженности поля радиоволн: Сборник статей. – М.: Радио и связь. – 1982.

**Мельчинов Виктор Петрович**  
доцент кафедры радиотехники  
и информационных технологий

**Кладкин Василий Павлович**  
старший преподаватель кафедры  
радиотехники и информационных технологий  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕНН РАСПОЛОЖЕННЫХ НА МЕРЗЛОТЕ

**Аннотация:** электрические свойства подстилающей среды оказывают существенное влияние на возбуждение и распространение электромагнитных волн в диапазоне длинных и средних волн. В данной работе приведены результаты определения коэффициента полезного действия (КПД) передающих антенн Якутского передающего центра на частотах 171, 549, 864 кГц. Оценка КПД была выполнена по результатам измерений напряженности поля в ближней зоне излучающих антенн. Предполагалось, что на этих частотах пространственная диаграмма направленности излучающих антенн совпадает с диаграммой направленности элементарного диполя Герца.

**Ключевые слова:** напряженность поля, диаграмма направленности, мощность излучения, коэффициент полезного действия антенны, проводимость подстилающей среды, ближняя зона излучения.

Для определения мощности излучения передающих антенн с высотой не более  $0,25\lambda$ , используются измерения напряженности поля в ближней зоне, где

не успевают проявиться поглощающие свойства подстилающей среды. Как известно, напряженность электрического поля мало отличается от поля элементарного диполя и выражается следующей формулой [1]:

$$E_{[\text{МВ/м}]} = \frac{D\varphi \cdot 300 \sqrt{P_{[\text{кВт}]}}}{R_{[\text{км}]}} \cdot |W| \quad (1)$$

где  $P$  – излучаемая мощность эквивалентного диполя;  $R$  – расстояние от источника до точки приема;  $|W|$  – модуль функции ослабления, зависящий от электрических свойств подстилающей среды и расстояния,  $D\varphi$  – коэффициент направленности излучения мощности антенны передатчика, зависящий от азимутального угла  $\varphi$ . В случае круговой диаграммы направленности  $D\varphi = 1$ . В ближней зоне  $|W| = 1$ . Тогда из формулы (1) следует, что излучаемая мощность передающей антенны равна:

$$P_{\text{кВт}} = \left( \frac{E_{\text{МВ/м}} \cdot R_{\text{км}}}{300} \right)^2 \quad (2)$$

Зная мощность, подводимую к антенне, можно рассчитать коэффициент полезного действия  $\eta$  антенны:

$$\eta = \frac{P_{\text{изл.}}}{P_{\text{подв.}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

Измерения диаграммы направленности передающих антенн на частотах 171, 549, 864 и 1450 кГц, расположенных в 25 км от г. Якутска в долине р. Лены проводились в летнее время года. Долина реки представляет очень ровную безлесную равнину с абсолютными уровнями 90–98 м. Геоэлектрический разрез представлен аллювиальными отложениями, состоящими из песка, галечника, суглинка. Мерзлые рыхлые отложения имеют мощность порядка 5–20 м. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) мерзлых рыхлых отложений может достигать нескольких десятков тысяч Ом·м. УЭС нижней части георазреза составляет несколько сот Ом·м.

При экспериментальных работах использовался измеритель напряженности поля типа FSM 6.5 с магнитной антенной FMA 6.2. Размеры ближней зоны определяются согласно соотношению [1]:

$$1.5\lambda < R < \lambda\sigma, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волн,  $\sigma$  – проводимость подстилающей среды.

Поскольку подстилающая среда на глубину скин-слоя является слоистой, то для оценки проводимости подстилающей среды нами использовались значения эффективного УЭС, вычисленные по данным полученными методом радиоэлектромагнитного зондирования (РЭМЗ):

$$\rho = (60 \cdot \lambda \cdot |\delta|^2) / \sin(2\varphi_\delta), \quad (5)$$

где  $|\delta|$  – измеренное значение модуля поверхностного импеданса,  $\varphi_\delta$  – измеренное значение фазы импеданса.

Результаты измерений поверхностного импеданса в долине реки методом РЭМЗ в разные сезоны года с помощью аппаратуры ИПИ-1000 приведены в таблице. В числителе даны пределы изменения рассматриваемого параметра, а в знаменателе их средние значения.

Таблица 1

## Результаты измерений поверхностного импеданса

f, кГц	Лето			Зима		
	\delta	$\varphi_\delta$ , град.	$\rho$ , Ом м	\delta	$\varphi_\delta$ , град.	$\rho$ , Ом м
171	0.033–0.091 0.056	-26–62 -44	120–1160 440	0.033–0.12 0.073	-48–72 -61	190–1590 780

549	<u>0.032–0.22</u> 0.092	<u>–13–51</u> –32	<u>55–1540</u> 485	<u>0.064–0.283</u> 0.092	<u>–17–61</u> –47	<u>330–3090</u> 1580
864	<u>0.037–0.28</u> 0.112	<u>–11–33</u> –24	<u>760–1890</u> 560	<u>0.069–0.408</u> 0.255	<u>–13–47</u> –36	<u>500–3480</u> 1720

Как видно из таблицы 1 средние значения УЭС подстилающей среды составляют 440–560 Ом·м в летнее время года. Оценки размеров ближней зоны показывают, что в данном диапазоне частот можно проводить измерения напряженности поля на расстояниях больших по сравнению с длиной волны. В зимнее время года условие (4) не выполняется т.е. верхний предел расстояний ближней зоны становится меньше, чем расстояние равное  $1.5\lambda$ . Поэтому для определения мощности необходимо пользоваться методом экстраполяции.

Для построения диаграммы направленности в зависимости от азимутального угла  $\phi$  проводились измерения вертикальной электрической составляющей  $E_0$  в ближней зоне. Под разными углами наносились в определенном масштабе точки измерения, т.е. векторы  $R_{0i}$ , векторы напряженности поля  $E_{0i}$  и векторы произведения этих величин  $E_0 R_{0i}$ . Тогда концы векторов  $E_0 R_{0i}$ , пропорциональные излучаемой мощности, образуют кривую, которая и будет являться диаграммой направленности. Расстояние от передающей антенны до точки наблюдения измерялось с большой точностью триангуляционным методом с помощью теодолита Т30. На рис. 1 приведена диаграмма направленности антенны типа «диск», работающая на частоте 171 кГц ( $h/\lambda = 0.057$ ).

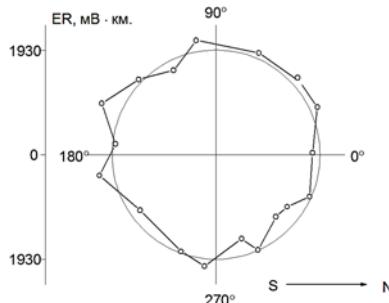


Рис. 1. Диаграмма направленности для передающей антенны 171 кГц

Считая, что в вертикальной плоскости диаграмма направленности не отличается от диаграммы направленности элементарного диполя, можно определить среднюю излучаемую антенной мощность, предварительно усреднив значения  $E_{0i} R_{0i}$ :

$$P_{изл.} = 41.3 \text{ кВт}$$

Мощность подводимая к антенне и измеренная тепловым методом на выходе передатчика составила 150 кВт. Таким образом КПД антенны при этом составляет 27.6%.

Диаграммы направленности для антенн, работающих на частотах 549 и 864 кГц и представляющих собой мачты с нижним питанием высотой 60 м приведены на рисунке 2 а, б.

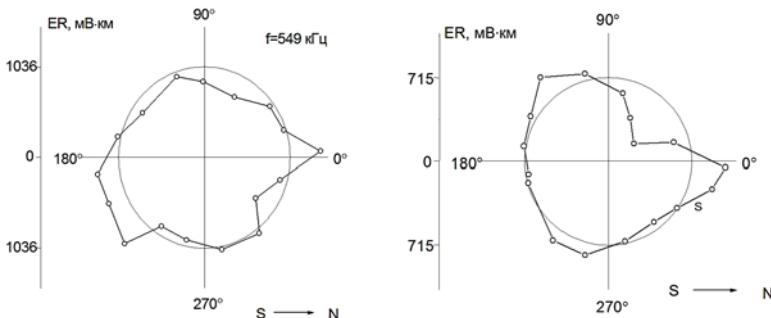


Рис. 2. Диаграмма направленности передающей антенны 549 и 864 кГц

Средние излучаемые мощности равны 11.9 и 5.65 кВт. Подводимая к антеннам мощности составляют 50 и 25 кВт соответственно.

Таким образом, получаем оценку КПД для антенны 549 кГц – 23.8%, а для антенны 864 кГц – 22.6%.

На частоте 1450 кГц измерения напряженности поля должны проводиться на расстояниях меньших по сравнению с длиной волны, так как на расстояниях  $R \approx 1.5\lambda$  уже в значительной степени будут проявляться поглощающие свойства подстилающей среды. Для того чтобы повысить достоверность результатов оценки излучаемой мощности, оказывается возможным привлекать измерения на более далеких точках. Известно, что на относительно небольших расстояниях от передатчика функция ослабления для поля над плоской землей, выраженная интегралом Зоммерфельда может быть разложена в ряд [2]:

$$W \approx 1 + \sqrt{\pi} \cdot s \cdot R, \quad (6)$$

где  $sR = \frac{ik\delta^2}{2}$  – численное расстояние.

Используя формулу (1) и логарифмируя ее получим:

$$\lg(E_{[\frac{мВ}{м}]} \cdot R_{[км]}) \approx \lg(300\sqrt{P_{[кВт]}}) + i\sqrt{\pi \cdot s \cdot R} \quad (7)$$

Построив зависимость  $\lg(E_{[\frac{мВ}{м}]} \cdot R_{[км]})$  от  $\sqrt{R}$  и найдя точку пересечения ее с осью ординат можно определить  $\lg(300\sqrt{P_{[кВт]}})$  и оценить среднюю излучаемую мощность, считая диаграмму направленности круговой. Определенная таким образом излучаемая мощность на частоте 1450 кГц составляет 2.8 кВт и к.п.д. антенны составляет около 40% по выбранному направлению. В случае использования точек измерения, находящихся на расстоянии около  $1.5\lambda$  КПД оказывается равным 30% в этом же направлении. Таким образом использование метода интерполяции дает другую величину излучаемой мощности, которая, на наш взгляд, более близка к действительной.

Измерения в зимнее время года показали, что напряженность поля на частотах 171–549 кГц остается почти постоянной, что свидетельствует о том, что КПД антенны не испытывает значительных вариаций при переходе от зимних условий к летним. На частотах 864 и 1450 кГц измерения вблизи антенн показали, что уровень поля испытывает значительные сезонные вариации. С использованием вышеизложенного метода определения излучаемой мощности

антенн установлено, что мощность излучения остается постоянной с точностью, которая обеспечивается при измерениях поля данным комплектом аппаратуры.

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При измерении излучаемой мощности передающих антенн, расположенных на криолитозоне, в ДВ диапазоне можно пользоваться измерениями в ближней зоне на расстояниях, удовлетворяющих неравенству (3). На более высоких частотах необходимо проведение измерений вдоль радиального направления с целью построения логарифмической зависимости произведения  $E_0 \cdot R_0$  от  $\sqrt{R}$ . Путем интерполяции определяется базовое значение  $E_0 \cdot R_0$ , из которого находится излучаемая антенной мощность.

2. Оказалось, что для антенн в ДВ-СВ диапазонах, расположенных в долине р. Лены КПД антенн не превышает 40%. В то время как в Европейской части России для радиовещательных антенн достигаются значения КПД в 70–80%.

3. В зимнее время года значительно увеличивается затухание радиоволн в верхней части средневолнового диапазона даже на расстояниях в 1,5λ, вызванное промерзанием верхних слоев подстилающей среды в ближней зоне. Использование метода интерполяции для определения КПД антennы показывает, что мощность излучения в зимнее время не изменяется.

*Список литературы*

1. Кашпрровский В.Е. Кузубов Ф.Е. Распространение средних радиоволн земным лучом. – М.: Радио и связь, 1971.
2. Макаров Г.И., Новиков В.В., Рыбачек С.Т. Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью. – М.: Наука, 1991.

*Павлов Андрей Александрович*

магистрант

Томский университет

систем управления и радиоэлектроники

г. Томск, Томская область

*Жебсанн Василий Васильевич*

заведующий кафедрой радиотехники

и информационных технологий

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **ПРИКЛАДНАЯ ПРОГРАММА ИНВЕНТАРИЗАЦИИ ПРИБОРОВ, ОБОРУДОВАНИЯ, ДЕТАЛЕЙ РАДИОЛАБОРАТОРИИ**

**Аннотация:** в работе представлена авторская прикладная программа для автоматизации учета приборов, оборудования, деталей радиолаборатории. При разработке учтены особенности радиолабораторий учебного назначения. Программа реализована в виде Windows приложения и состоит из двух частей: исполняемого файла и файла базы данных в формате системы управления базами данных (СУБД) MS Access.

**Ключевые слова:** прикладная программа, автоматизация, инвентаризация, базы данных.

Вопрос учета и инвентаризации лабораторного оборудования, приборов, деталей в научных и учебных заведениях всегда является актуальным, а сам

процесс его реализации достаточно трудоемким. В данной связи, не менее актуален и вопрос средств автоматизации учета лабораторного оборудования, приборов, деталей. Отметим, что автоматизация инвентаризации лабораторного оборудования, приборов, деталей в учебных заведениях имеет свои особенности, обусловленные тем, что в них объекты учета связаны с конкретными лабораторными работами. В данной работе предлагается прикладная компьютерная программа, разработанная авторами, предназначенная для учета и инвентаризации оборудования, приборов, деталей учебной радиолаборатории. Программа реализована в виде Windows приложения и состоит из двух частей: исполняемого файла и файла базы данных в формате системы управления базами данных (СУБД) MS Access. Исполняемый файл разработан в интегрированной среде разработки программного обеспечения Borland Delphi 7.

Основные функции программы:

- регистрация объектов учета (оборудования, приборов, радиодеталей) и присвоение им уникальных инвентаризационных номеров;
- хранение данных учета;
- быстрый поиск и фильтрация данных;
- формирование и печать отчетных форм;
- ведение базы данных оборудования, приборов, деталей радиолаборатории.

На рис. 1 представлено главная форма программы.

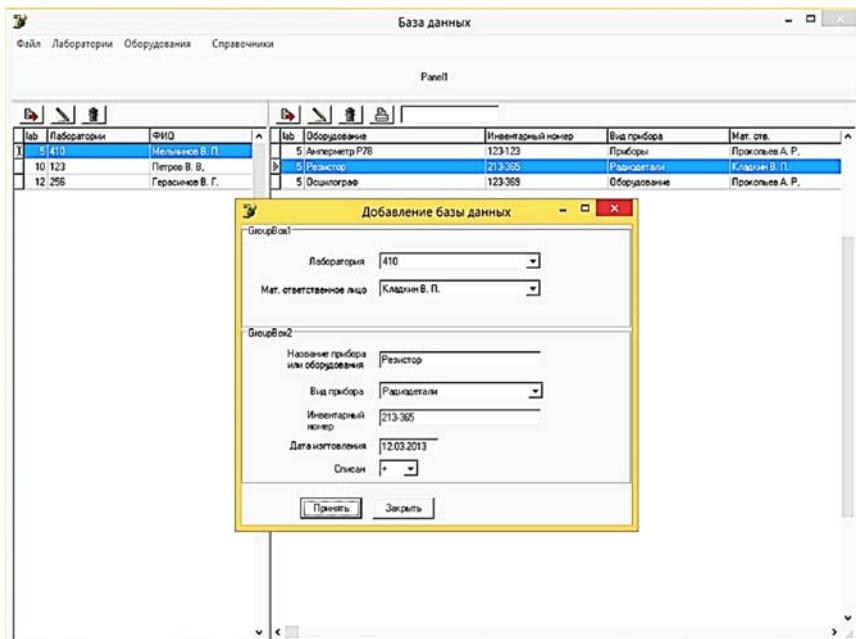


Рис. 1. Главная форма программы

Схема базы данных, поясняющая её структуру и связи между таблицами (сущностями) представлена на рис. 2.

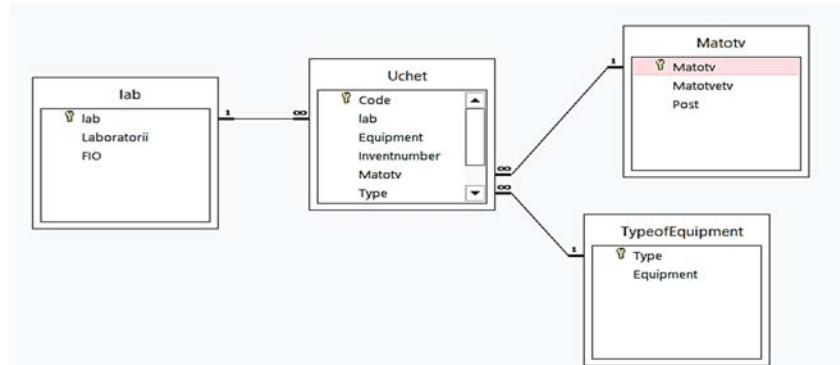


Рис. 2. Схема базы данных

Основные сведения об объектах учета хранятся в таблице **Uchet** связанной внешними ключами с таблицами – справочниками **Lab** (данные о лаборатории), **Matotv** (данные о материально-ответственных лицах), **TypeofEquipment** (данные о видах объектов учета).

Программа является прикладной разработкой и может применяться в различных учебных радиолабораториях. При необходимости может использоваться в сетевой архитектуре «файл – сервер» и с небольшими доработками, в архитектуре «клиент – сервер».

**Мельчинов Виктор Петрович**  
 доцент кафедры радиотехники  
 и информационных технологий  
**Кладкин Василий Павлович**  
 заведующий лабораторией кафедры радиотехники  
 и информационных технологий  
**Прокопьев Айсен Русланович**  
 студент 4 курса  
 Физико-технический институт  
 СВФУ им. М.К. Аммосова  
 г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УКВ НА РЕАЛЬНЫХ ТРАССАХ

**Аннотация:** приведены результаты измерений уровня поля в диапазоне ультракоротких волн и сравнения с расчетами по радиотрассам г. Якутска. Результаты исследований могут быть использованы для оценки зоны охвата телерадиовещанием и сотовой связью, при строительстве новых передающих центров в УКВ диапазоне.

**Ключевые слова:** распространение ультракоротких волн, методы расчета напряженности поля УКВ.

При расчетах напряженности поля в УКВ диапазоне обычно пользуются классической формулой Введенского [1]:

$$E_m = \frac{\sqrt{60}P*\bar{D}}{r^2} * \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $P$  – мощность передаваемой антенны, в кВт;  $D$  – коэффициент усиления передающей антенны,  $h_1$  и  $h_2$  – высоты передающих и передаваемых антенн, в м;  $\lambda$  – длина волны, в м;  $r$  – расстояние, в км.

Эта формула впервые была получена Б.А. Введенским и характеризует зависимость напряженности электрического поля от расстояния, длины волн и высоты расположения передающей и приемной антенн. Несмотря на то, что при выводе формулы (1) сделан ряд допущений, проводимые по ней расчеты достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными в условиях открытой местности.

В условиях городской застройки распространение УКВ носит сложный характер вследствие переотражений от зданий и технических сооружений. В настоящее время для расчетов напряженности поля в УКВ диапазоне используется модель Окамура-Хата, которая базируется на результатах экспериментальных исследований напряженности поля, поэтому она часто называется экспериментальной моделью. Суть этой модели заключается в аппроксимации графиков Окамура специально подобранными формулами для различных территориальных зон, которые условно классифицируются на большой город, средним и малый города, пригород, сельскую местность, открытую местность. Формулы расчета потерь для указанных зон с подробными пояснениями приводятся в [2]:

$$E = 70,62 - 7,72f + 13,82lgH + h(1,1lgf - 0,7) - (44,9 - 6,55lgH) \cdot (lgR)^b, \quad (2)$$

где:  $b = 1$  для  $R \leq 20$  км и

$$b = 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107H') \cdot (lg|0,05 \cdot R|)^{0,8}, \quad (3)$$

для  $R > 20$  км, где:

$$H' = \frac{H}{\sqrt{1+0,000007H^2}}, \quad (4)$$

Уравнение (4) рекомендовано для  $H = 30 \dots 200$  м и  $h = 1 \dots 10$  м. Вне этих диапазонов она дает ощутимые погрешности.

Известные формулы Введенского и формула Окамуры-Хата на расстояниях менее 1 километра дают ощутимые погрешности. В противовес этим формулам, С.Н. Песковым предложена эмпирическая формула для расчета напряженности поля УКВ [3]:

$$E_{[db\mu V]} = 64,5 + 20 \lg(Hh) - 40 \lg R - \sqrt{\frac{H}{h}} \cdot 10 \lg \left(1 + \frac{R}{R_m}\right) - 5 \lg f, \quad (5)$$

где дальность радиовидимости  $R_m$  вычисляется по формуле:

$$R_m = 4,12 * (\sqrt{H} + \sqrt{h}) \quad (6)$$

Измерения уровня поля проводились по сигналам УКВ радиовещательных станций на частотах 105,3 и 107,1 МГц мощностью 1 кВт. Передающие антенны установлены на телевизионной вышке г. Якутска с высотой подвеса 200 м. Запись уровня сигнала вдоль исследуемой трассы осуществлялась с помощью приемника Winradio G305e со встроенной программой Calibrated S-meter. Таким образом, во время движения автомобиля записывается на ноутбук уровень сигнала на входе приемника в дБм или в мкВ. В качестве приемной антенны использовалась внешняя антенна типа штырь, установленная на металлической крыше автомобиля. Действующая высота приемной антенны определялась путем сравнения записи сигналов на калиброванную биконическую антенну НБА-02. При обработке данных уровень сигнала на входе приемника переводился в значение напряженности поля с учетом действующей высоты приемной антенны.

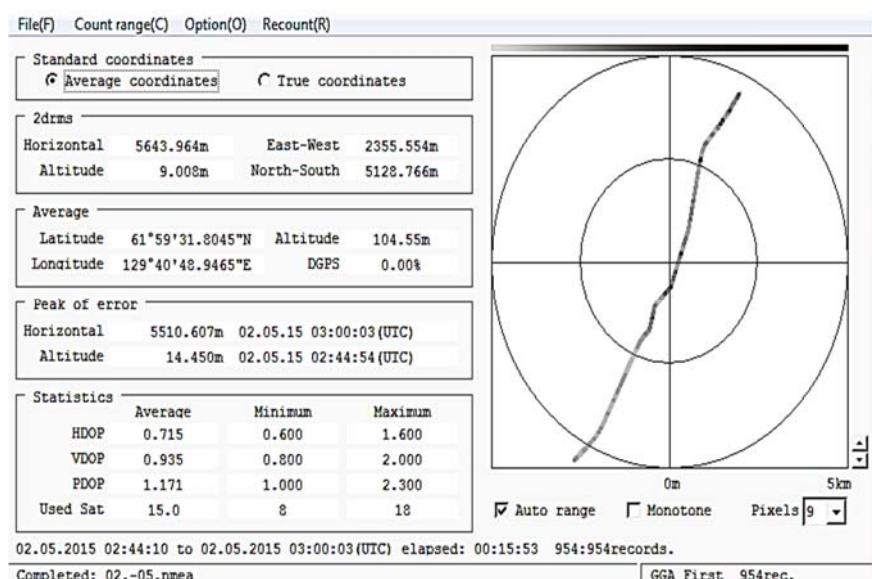


Рис. 1. Программа NMEAConverter

Одновременно производилась запись географических координат с выхода GPS приемника. Для обработки записи GPS использовалась программа NMEA Converter; запись файла производилась в NMEA – формате, конвертация – в CSV. На рис. 1. приведен скриншот записи географических координат в программе NMEA Converter.

Расчет и построение усредненных значений напряженности поля производились на Mathcad 15.

На рис. 2. приведены сравнения экспериментальных значений напряженности поля для частоты 105,3 МГц с расчетами по разным формулам. Из рис. 2 видно, что формула Введенского дает завышенные значения до 22 дБ. Наиболее близки к экспериментальным значениям расчеты по формуле, предложенной в работе [3]. Максимальное отклонение от измеренных значений в среднем не превышает 6 дБ.

На рис. 3 приведены графики: экспериментальное значение напряженности поля для частотой 107,1 МГц и сравнения с теоретическими расчетами.

Из рис. 3 видно, что расчеты по формуле Введенского отличаются от экспериментального, максимальное отклонение составляет более 17 дБ.

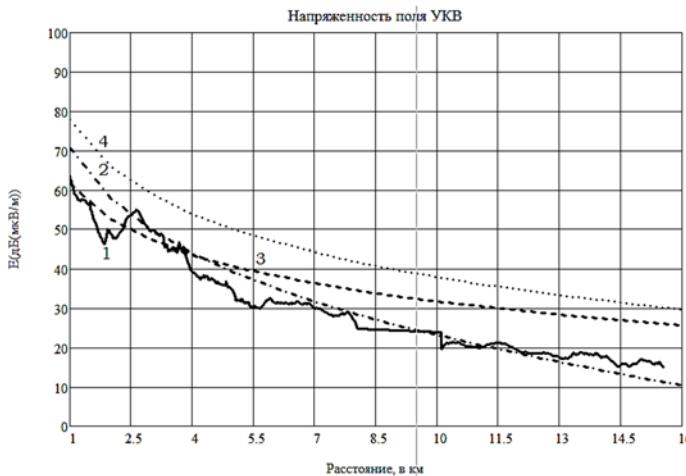


Рис. 2. Зависимость напряженности поля от расстояния на частоте 105,3 МГц  
 (1 – экспериментальное усредненные значения, 1 – расчет по формуле  
 Пескова, 3 –формула Окамуры-Хата, 4 –формула Введенского)

Результаты расчетов по формуле Окамура-Хата также значительно отличаются от экспериментальных значений, максимальное отклонение составляет 8 дБ.

Таким образом, наиболее точное совпадение с результатами экспериментов в условиях небольшого города наблюдается с расчетами напряженности поля по формуле С.Н. Пескова.

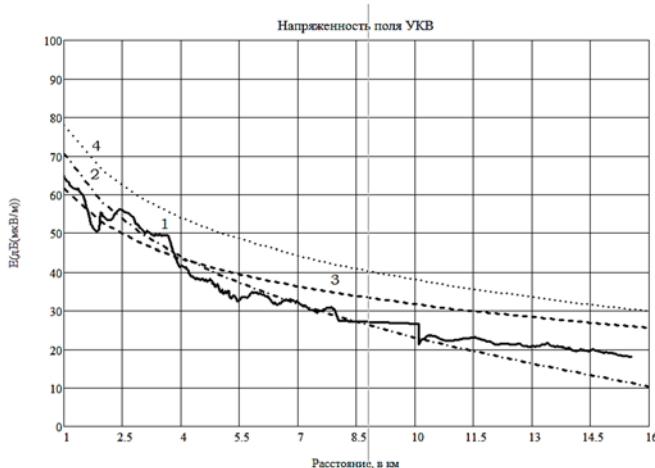


Рис. 3. Зависимость напряженности поля от расстояния на частоте 107,1 МГц  
 (1 – экспериментальное усредненные значения, 1 – расчет по формуле  
 Пескова, 3 –формула Окамуры-Хата, 4 –формула Введенского).

**Список литературы**

1. Черный В.Б. Распространение радиоволн. – М.: Советское радио, 1972.
2. Милютин Е.Р. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона / Е.Р. Милютин, Г.О. Василенко, М.А. Сиверс [и др.]. – СПб.: Триада, 2003. – 159 с.
3. Песков С.Н. Аналитические методы расчета напряженности поля, создаваемой передатчиком / Теле-Спутник. – 2008. – №10 (156).

**Елгина Галина Александровна**

ассистент

**Ивойлов Евгений Вячеславович**

аспирант

**Научный руководитель:**

**Слободян Степан Михайлович**

д-р техн. наук, профессор

Томский политехнический университет

г. Томск, Томская область

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВИТКОВ ОБМОТОК ИНДУКТИВНОСТИ ПРИ ИХ ЗАМЫКАНИИ**

**Аннотация:** в данной статье авторами рассматривается проблема контроля и диагностики состояния индуктивных элементов и структур (катушек индуктивности, индуктивных датчиков вихревых полей, трансформаторных, соленоидных устройств и т.п.).

**Ключевые слова:** деформация, обмоток, пробой.

В настоящее время проблема контроля и диагностики состояния индуктивных элементов и структур (катушек индуктивности, индуктивных датчиков вихревых полей, трансформаторных, соленоидных устройств и т.п.) ввиду их широкого распространения в электронной, радиоэлектронной и электротехнических и многих других отраслях мировой экономики – актуальна. Электрическое старение материала изоляции межвиткового промежутка сопутствует появлению тенденций необратимых изменений свойств изоляции и самого индуктивного элемента. Ухудшение свойств материала изоляции межвиткового промежутка с течением времени эксплуатации индуктивной структуры приводит [1–5] к возникновению нарушений топологии индуктивности и проявлению эффектов замыканий витков, смежных в пространстве геометрии их расположения в объёме индуктивной структуры, например, трансформатора.

Появление замыкания сопровождается потерями энергии, проявляющими выделением тепловой энергии, в конечном счёте, к механическим деформациям витков структуры, потере устойчивости (электродинамической стойкости), повреждениям изоляции проводников и материала слоя межвиткового промежутка. При замыкании витков проявляется физическое воздействие различия термодинамического поведения свойств материалов, из которых выполнен тот или иной радиоэлемент. Различие термического поведения приводит к сдвигу поверхностей и изменению объема элементов в геометрии, занимаемого ими пространства. Перемещение провода при осевых и радиальных остаточных деформациях, скручивания и раскручивания обмоток и их сдавливании вызывает повреждения слоя изоляции – фактор пробоя. В данной работе выполнена оценка поперечных деформаций проводов обмотки катушек индуктивности, вызванных их коротким замыканием при повреждениях.

В работе для оценки деформаций обмотки трансформатора при токах короткого замыкания проведён расчет поперечной деформации обмоток с использованием математического пакета COMSOL Multiphysics.

**Список литературы**

1. Елгина Г.А., Ивойлов Е.В., Слободян С.М. Влияние замыканий на свойства индуктивности // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – №5. – С. 21–26.
2. Елгина Г.А., Ивойлов Е.В., Слободян С.М. Преобразование свойств соленоида электрического колпра при замыкании витков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №5 (46). – С. 175–184.
3. Елгина Г.А., Слободян С.М. Преобразование свойств индукционной катапульты замыканием витков катушки // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №3. – С. 170–175.
4. Elgina Galina, Ivojlov Evgeny, Slobodyan Stepan. Physical modeling of induction internal fault // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 46–51.
5. Deeva V., Slobodyan S. Dynamics of electrical conduction field of the sliding current collector // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 698. – P. 258–263.

**Сычикова Яна Александровна**  
канд. физ.-мат. наук, доцент  
кафедры методики преподавания  
физико-математических наук  
и информационных технологий в обучении  
*Научный руководитель:*  
**Вамболь Сергей Александрович**  
д-р техн. наук, профессор  
Бердянский государственный  
педагогический университет  
г. Бердянск, Украина

## **ПОРИСТЫЙ ФОСФИД ИНДИЯ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

**Аннотация:** в данной статье авторами рассматривается отвода тепла от электронных компонентов и узлов. Исследователями отмечается, что оптимальными параметрами в этом отношении обладает фосфид индия.

**Ключевые слова:** радиоэлектроника, теплопроводность.

Актуальной проблемой современной радиоэлектроники является задача отвода тепла от электронных компонентов и узлов. Повышение степени интеграции полупроводниковых компонентов и увеличение их объемной плотности размещения является одной из причин увеличения выделения тепла на единицу площади. Материалы с высокой теплопроводностью позволяют повысить эффективность отвода тепла. Кроме теплопроводности необходимо учитывать такие параметры полупроводниковых материалов, как термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР) и удельный вес.

Оптимальными параметрами в этом отношении обладает фосфид индия, поэтому он все чаще используется в качестве материала для радиоэлектроники.

Часто необходимо учитывать удельный вес материала, причем чем этот параметр меньше, тем больше применений находит материал. Удельный вес фосфida индия можно уменьшить за счет формирования на его поверхности пористой фазы.

Пористая структура фосфida индия образуется в результате анодной обработки кристалла в растворах кислот и щелочей, где происходит образование узких каналов травления, уходящих вглубь образца. Поры во время травления

увеличиваются и расширяются, в результате на поверхности остается множество остатков этих стенок в виде нитей, расположенных преимущественно перпендикулярно поверхности или в направлении кристаллографических осей. Толщина этих нитей, как правило, не превышает единиц нанометров, что обуславливает возникновение ряда квантово-размерных эффектов, в том числе увеличение ширины запрещенной зоны.

Вторичные нейтральные атомы кристалла, образующиеся в результате реакции электрохимического травления, также адсорбируются поверхностью кристалла. При этом на поверхности образуются своеобразные начальные дефекты – «лишние» поверхностные атомы полупроводника и их соединения с кислородом. Их концентрация превышает поверхностную концентрацию решетки кристалла, и происходит хаотическое распределение вторичных атомов по поверхности. В результате квантово-размерного расширения запрещенной зоны их электрическое сопротивление превышает исходное, что увеличивает их устойчивость к растворению – возникают поверхностные кристаллиты. Они представляют собой неоднородности квантоворазмерного масштаба, то есть области с повышенной и пониженнной пористостью, различным диаметром пор и взаимным распределением.

Одной из особенностей частиц малого размера является уменьшение способности электронов экранировать электростатические поля, в результате чего наблюдается увеличение радиуса взаимодействия между электронами. Благодаря разному размеру пор структура пористого образца является неоднородной вдоль поверхности. Пространственное квантование электронного энергетического спектра приводит к собственным значениям энергии электронов и дырок, которые зависят от поперечного размера нитей.

#### *Список литературы*

- Suchikova Y.A., Kidalov V.V., Sukach G.A. Morphology of porous n-InP (100) obtained by electrochemical etching in HCl solution // Functional Materials. – 2010. – Vol. 17. – №1. – P. 1–4.

*Слепцов Иннокентий Алексеевич*  
аспирант кафедры радиофизики и электроники  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **ВОЗМОЖНЫЕ МЕТОДЫ СИНТЕЗА ЯКУТСКОГО ЯЗЫКА**

**Аннотация:** в статье описываются первые шаги в применение компилятивного и формантного методов синтеза речи к якутскому языку. Даны результаты использования методов. Приведен общий вывод трудностей и задач.

**Ключевые слова:** база данных, компилятивный синтез, синтез речи, формантный синтез, формантная частота, фонема.

Мы опробовали два метода автоматического синтеза якутского языка. Первый метод компилятивный синтез и второй метод формантный.

Модель компилятивного синтеза предполагает синтез речи путем составления записанных образцов отдельных звуков, произнесенных диктором.

Модель компилятивного синтеза подходит, главным образом, только в простейших случаях, когда синтезатор должен произносить относительно небольшой и заранее известный набор фраз. При этом обеспечивается довольно высокое качество речи. Тем не менее, на стыке составляемых звуковых фрагментов возможны интонационные искажения и разрывы, заметные на слух. Кроме того, создание крупной базы данных звуковых фрагментов, учитывающей все

особенности произношения фонем и аллофоном с разными интоциями, представляет собой сложную и кропотливую работу [5].

Наша система представляет собой интернет-сервис «Автоматизированный синтез якутского языка» (рис. 1). Использовались веб-сервер Apache и система управления базами данных MySQL. База данных состоит из базы фонем и голосов, в таблице фонем указаны символьное представление фонем, ссылка на звуковой файл, идентификатор голоса. Всего получилось 40 фонем, в него входят: согласные, гласные, долгие гласные, дифтонги.

## Работа с фонемами

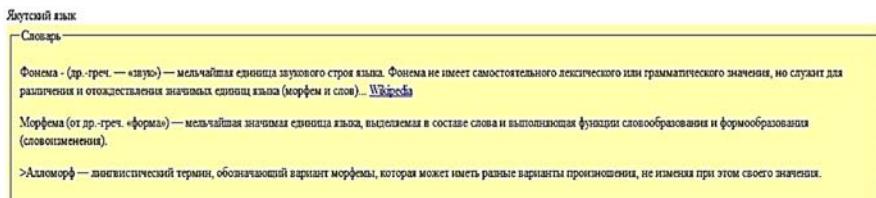


Рис. 1. Входной интерфейс автоматизированного синтеза якутского языка, методом компиляционного синтеза

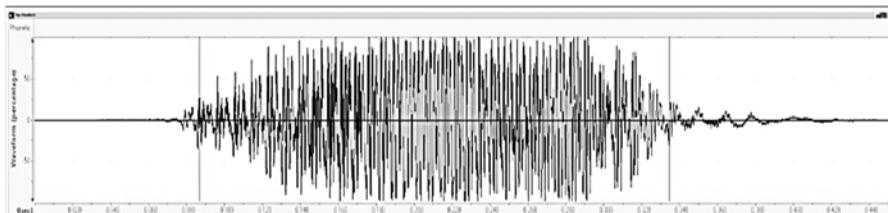
Автоматизированный синтез речи создается компиляционным синтезом с помощью склейивания фонем. Фонемы записаны в файл типа WAVE с расширением .wav. Используется 16 битное кодирование, частота дискретизации 44100 кГц, монозвук.

В ходе тестирования выяснилось, что возникает искажение на границе фонем, постановка ударения отличается от традиционного якутского ударения на последнем слоге. По результатам тестирования удалось четко различить короткие слова, более длинные слова на слух воспринимаются хуже и различить их удается в половине случаев.

Дальнейшее доработка будет состоять в создании более качественной фонемной базы, создании правил произношения и фильтров для сглаживания звуков [3].

Формантный синтез – синтез, в основе которого лежит воссоздание спектре звука акустических резонансов (форманты) (<http://synthmusic.ru/articles/synthesistypes/formant>).

Под формантами понимают частотные резонансы (полюса передаточной функции) речевой акустической системы. Параметр формант (частота, ширина, уровень) определяются акустическими свойствами системы. Наиболее важный параметр – частота форманты, тесно связан с геометрической конфигурацией речевого тракта (рис. 2). Поскольку в процессе речи конфигурация речевого тракта меняется, то соответственно меняются формантные частоты.



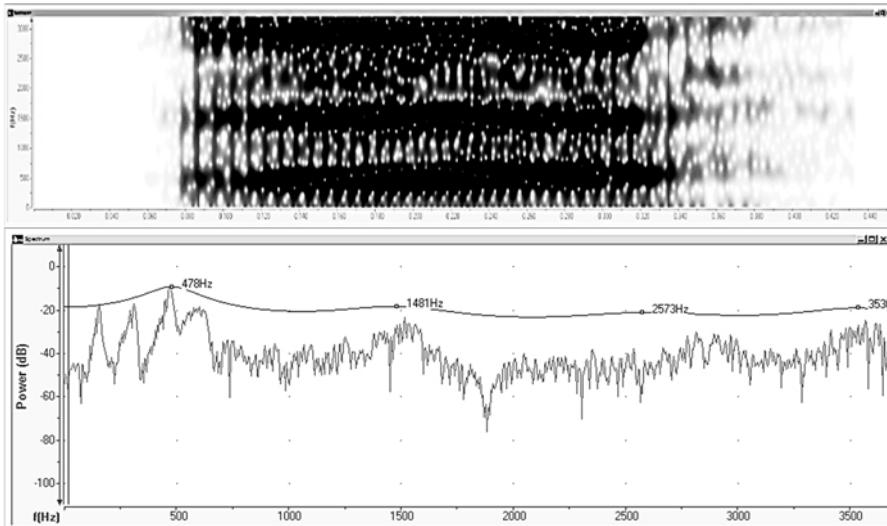


Рис. 2. Форма сигнала по времени, спектrogramма и спектр фонемы «ø» диктором мужского пола, носителем якутского языка

Для удовлетворительного синтеза речи обычно нужны две – четыре формантные частоты. Они лежат в диапазоне от 200 (первая форманта мужского голоса) до 2000 Гц (третья форманта женского голоса). Точным расположением формантных частот в звуковом спектре и определяется звук, который мы интерпретируем как речь. Причем, все формантные частоты присутствуют в речи одновременно и непрерывно перемещаются вверх-вниз по частотному спектру в соответствии с особенностями произносимого слова. Поэтому, слушая говорящего человека, вы слышите звук не какой-либо

одной частоты, а множество обертонов, которые образуются при фильтрации импульсов, формируемых на выходе голосового тракта [2].

Приведем таблицу формантных частот для некоторых фонем гласных звуков.

Таблица 1  
Формантные частоты якутских гласных «ø», «øø», «ү» и «үү»

Фонемы	Формантные частоты (Гц)			
	F1	F2	F3	F4
ø	470	1500	2600	3600
øø	440	1500	2600	3500
ү	170	2200	3100	
үү	260	1900	2300	3300

Нахождение формантных частот четырех фонем «ø», «øø», «ү» и «үү» якутского языка проводилось с помощью программы SpeechAnalyzer версии 3.0.1 фирмы SIL International. Фонемы были записаны на компьютере с микрофона на программе SoundForge в формате wav. Диктор мужчина средних лет, носитель якутского языка [4].

Форманта, может быть, с одной стороны, определена расчетным путем для каждой фонемы по конфигурации речевого тракта, а с другой – измерена экспериментально по спектру звука. Главным выводом акустической теории является то, что различия в конфигурациях речевого тракта, обусловленные местом образования фонем, отражаются на акустическом уровне в положении на частотной оси полюсов (резонансов) акустической системы [1].

В ходе эксперимента сняты спектограммы всех фонем якутского алфавита. Заполнена полная таблица формантных частот якутского языка.

Для генерации одновременно формантных частот F1-F4, фонем якутских гласных из таблицы в компьютере можно с помощью программы eSpeak.

В формантном синтезе особых результатов достичь не удалось. Озвучивание исследованных фонем гласных, путем формантного синтеза, пока не смогли воспроизвести более воспринимаемый на слух фонему. В данном этапе пришли к выводу нужно просчитать огибающие частоты между формантами и сгенерировать их вместе с формантными частотами.

### *Список литературы*

1. Лобанов Б.М. Компьютерный синтез и клонирование речи / Б.М. Лобанов, Л.И. Цирульник. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 316 с.
2. Савчук В.Л. Электронные средства сбора, обработки и отображения информации: Методические указания по курсовому проектированию для студентов специальности 200.400. / В.Л. Савчук. – Томск, 1998. – 32 с.
3. Слепцов И.А. Компилиятивная модель для автоматизированного синтеза якутского языка / Н.А. Леонтьев, И.А. Слепцов // Инновационный потенциал молодежной науки: материалы Всероссийской научной конференции. – Уфа, 2013. – 304 с.
4. Слепцов И.А. Формантный синтез якутских гласных / И.А. Слепцов // V Всероссийская научно-практическая конференция: информационные технологии в науке, образовании и экономике. – Якутск, 2014
5. Фролов А.В. Синтез и распознавание речи. Современные решения / А.В. Фролов, Г.В. Фролов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Frolov-lib.ru

**Ефремов Александр Витальевич**

аспирант кафедры радиофизики и электроники

**Неустров Ефим Петрович**

канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ЧАСТИЧНОГО ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА**

**Аннотация:** исследовано воздействие обработки в плазме Ar/SF<sub>6</sub> частично восстановленного оксида графена методами спектроскопии комбинационного рассеяния, электронной и атомной силовой микроскопии и вольт-амперных характеристик. Установлено, что обработка в плазме приводит к эффективному адсорбированию поверхностью оксида графена атомов фтора. Определены изменения спектров комбинационного рассеяния, электрического сопротивления образцов в зависимости от параметров обработки в плазме.

**Ключевые слова:** оксид графена, восстановление, обработка в плазме, физические свойства.

Фторирование графена привлекает к себе интерес благодаря возможности создания полупроводниковых и диэлектрических слоев со стабильными свой-

ствами [1]. В то же время, методы, используемые при получении фторографена, требует использования токсичных веществ, обработка при повышенных температурах большой длительности [1]. Использование плазмохимического процесса позволяет проводить процесс фторирования при температурах близких к комнатным и уменьшить длительность обработки [2]. В данной работе исследованы свойства оксида графена (ОГ), подвергнутого плазмохимической обработке в смеси газов Ar/SF<sub>6</sub>.

Исследованный ОГ был получен усовершенствованным методом Хаммерса [3]. Водный раствор ОГ был нанесен на поверхность SiO<sub>2</sub> толщиной 300 нм и выпарен при комнатной температуре в течение суток. Подложкой для SiO<sub>2</sub> служил р-типа проводимости кремний. Термообработки для восстановления были выполнены в диапазоне температур от 200 до 4000С длительностью от 15 мин до нескольких часов в атмосфере аргона. Для исследований привлечены методы спектроскопии комбинационного рассеяния (КРС), электронной, атомно-силовой и оптической микроскопии (АСМ) и измерены электрофизические характеристики. Источником плазмы служил индуктивный генератор с частотой 13.56 МГц. Мощность плазма составляла от 100 до 300 Вт. Реакция проводилась в камере, откаченной до 0.001 мБар. Рабочее давление в камере после напуска газов составляло 0,15 мБар. Плазмохимическая обработка выполнена в потоке газов аргона и элегаза в соотношении 30/10 см<sup>3</sup>/мин.

Измерения методом комбинационного рассеяния света (КРС) проводились при комнатной температуре с использованием возбуждающего излучения с длиной волны 532 нм. Для предотвращения нагрева образца мощность излучения лазера не превышала 2–3 мВт, размер диаметра пучка составлял 0,5 мкм. На рисунке 1 показан спектр КРС для образца оксида графена, обработанного в плазме Ar/SF<sub>6</sub> мощностью 150 Вт и длительностью 30 сек.

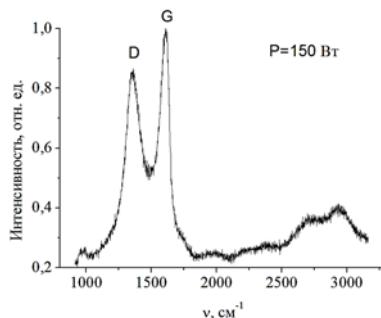


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния образца, обработанного в плазме Ar/SF<sub>6</sub> при мощности 150 Вт длительностью 30 сек.

Охлаждение образцов при обработке плазмой в реакторной камере осуществлялось потоком гелия и температура образца в течение процесса не превышала 50°С. В спектрах КРС отчетливо проявляются характерные для оксида графена линии D и G при частотах в окрестности 1350 см<sup>-1</sup> и 1600 см<sup>-1</sup>, соответственно. Природа D линии связана с дефектной структурой решетки и наличием функциональных групп кислорода [3]. G – линия обусловлена колебаниями в плоскости углеродной сетки и связана с sp<sup>2</sup>-гибридизованными связями [3].

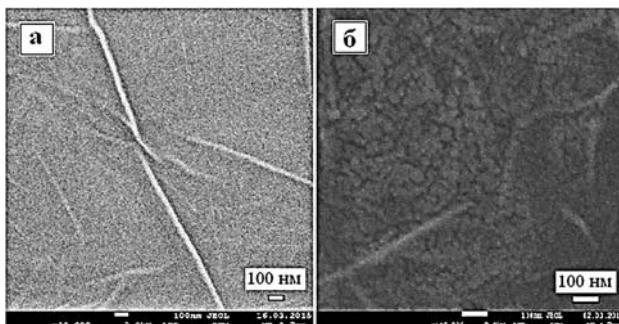


Рис. 2. Изображения поверхности пленок ОГ, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа. а – поверхность пленки ОГ после восстановления при  $T = 3000$  С длительностью 30 мин, б – после обработки в плазме  $\text{Ar}/\text{SF}_6$  при мощности  $P = 200$  Вт длительностью 3 мин.

Длина масштабной линейки 100 нм

На рисунке 2 показаны изображения поверхности образцов до и после обработки в плазме  $\text{Ar}/\text{SF}_6$ , полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM 7800F. Воздействие плазмы приводит к росту доли разупорядоченных и аморфизированных областей на поверхности ОГ (светлые участки на рисунке 2б).

С помощью энергодисперсионного микроанализатора «INCA Energy» была проведена оценка элементного состава на поверхности ОГ. Из полученных результатов следует, что при обработке в плазме ионов кислорода увеличивается содержание кислорода на поверхности ОГ. Аналогично, при обработке в среде  $\text{Ar}/\text{SF}_6$ , увеличивается содержание фтора (рис. 3). При этом функциональных групп серы на поверхности ОГ не обнаружено.

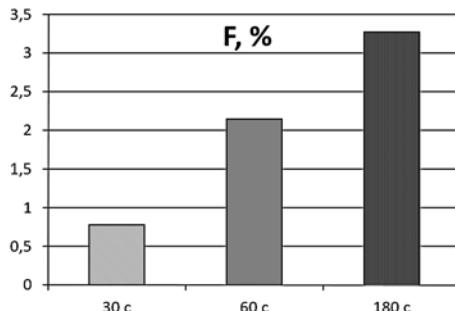


Рис. 3. Зависимость содержания фтора в процентах от общего количества атомов на поверхности ОГ после обработки в плазме  $\text{Ar}/\text{SF}_6$  мощностью 200 Вт различной длительности

Измерения вольт-амперных характеристик показали, что воздействие плазмы приводит к возрастанию сопротивления ( $R$ ) образцов примерно в два раза уже при времени обработки 30 с (таблица 1). Сопротивления измерялись между одними и теми же контактами до и после обработки в плазме. Увеличение  $R$  можно объяснить уменьшением размеров доменов графена, увеличением количества дефектов и разупорядочений решетки, ростом доли аморфизированных областей.

Таблица 1

Зависимость сопротивления образцов ОГ от условия обработки в плазме

№ образца	Среда	P, Вт	Время обработки, с	R до обработки, кОм	R после обработки, кОм
OG-2	Ar/O	200	30	768.5	1608
OG-9	Ar/SF <sub>6</sub>	200	30	38.3	62.8
OG-10	Ar/SF <sub>6</sub>	200	30	138.5	428

Таким образом, из экспериментальных данных следует, что плазменная обработка ОГ в смеси газов Ar/SF<sub>6</sub> обеспечивает альтернативное химической функционализации решение. При этом исключается образование вредных химических отходов, что способствует практическому использованию свойства графена в полной мере с учетом экологических факторов.

Работа выполнена по программе государственного задания МОИИ РФ «Организация и проведение научных исследований» №1894.

#### **Список литературы**

1. Nebogatikova N.A., Antonova I.V., Prinz V.Ya., Volodin V.A., Zatsepin D.A., Kurmaev E.Z., Zhidkov I.S., Cholakh S.O. Nanotechnologies in Russia. – 2014. – V. 9. – №(1-2). – P. 51-59.
2. Yu Y.-Y., Kang B.H., Lee Y.D., Lee S.B., Ju B.-K. Effect of fluorine plasma treatment with chemically reduced graphene oxide thin films as hole transport layer in organic solar cells. Applied Surface Science, 2013, 287. – P. 91–96.
3. Alexandrov G.N., Smagulova S.A., Kapitonov A.N., Vasil'eva F.D., Kurkina I.I., Vinokurov P.V., Timofeev V.B., Antonova I.V. Nanotechnologies in Russia. – 2014. – V. 9. – №7–8. – P. 363–368.

**Бурцева Евдокия Константиновна**  
студент кафедры радиофизики и электроники  
**Неуструев Ефим Петрович**  
канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ОЦЕНКА ЕГО ПАРАМЕТРОВ В ВОССТАНОВЛЕННОМ ОКСИДЕ ГРАФЕНА**

**Аннотация:** в данной статье авторами рассматривается вопрос воздействия низкотемпературного восстановления на свойства оксида графена.

**Ключевые слова:** электропроводность, оксид графен.

Оксид графена (ОГ) представляет интерес для многих приложений электроники, таких как прозрачные электроды, суперконденсаторы, сенсоры и т.д. Для повышения электропроводности оксида графена используют восстановительные процессы. Одним из таких процессов является термообработка. В настоящее время воздействие низкотемпературного восстановления на свойства оксида графена недостаточно изучено.

Для исследований был использован оксид графена, полученный модифицированным методом Хаммерса [1]. Исходная толщина пленок ОГ на поверхности подложки SiO<sub>2</sub> составляла от 4 до 35 нм. Восстановление проводилось в диапазоне температур от 500 до 650 К длительностью до нескольких часов в

атмосфере аргона. Для исследований привлечены методы спектроскопии комбинационного рассеяния, Ван-дер-Пау и эффекта Холла. Измерения сопротивлений образцов проведены в диапазоне температур от 100 до 300 К.

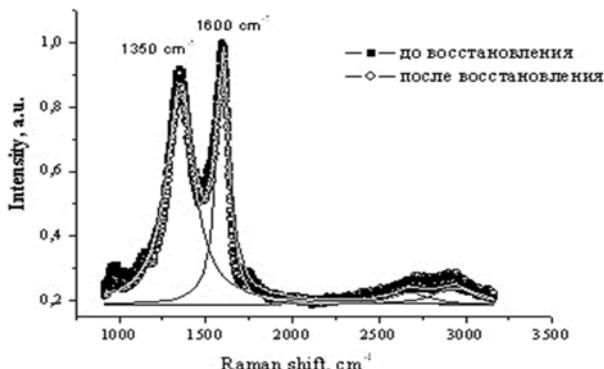


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния ОГ для образца OG-1 до и после восстановления в атмосфере аргона при температуре 250°C длительностью 30 минут

В спектрах комбинационного рассеяния исследованных образцов проявляются характерные для оксида графена пики (рис. 1). Как видно из рисунка наиболее отчетливо проявляются D- и G-линии при частотах 1350 и 1600 cm<sup>-1</sup>, соответственно. G-линия обусловлена колебаниями системы sp<sup>2</sup> углеродных связей [2]. D-линия связана с дефектностью кристаллической решетки [2]. Отношение интегральных интенсивностей линий D и G характеризует размеры отдельных кристаллов графена в пленке [2]. Произведенная оценка размеров кластеров L<sub>D</sub> показала, что они составляют примерно 6–7 нм.

Измерения температурной зависимости сопротивления восстановленного оксида графена в диапазоне температур от 500 до 650 К показали наличие двух областей с различными механизмами проводимости. В области T > 200 К и выше преобладает активационный механизм. Энергия активации зависит от степени окисления оксида графена и при выбранных режимах находилась в пределах от 0,12 до 0,35 эВ. При T < 200 К зависимости сопротивления от температуры описываются выражением [3]:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^m, \quad (1)$$

где T<sub>0</sub> – характеристическая температура, m равен 1/3 или 1/4 для планарных и объемных структур, соответственно, и m = 1/2 соответствует прыжковому механизму Эфроса-Шкловского. Построение температурной зависимости сопротивления при различных m показало, что наиболее точно экспериментальные точки ложатся на прямую при m = 1/3 (рис. 2). При этом коэффициент линейности прямой R принимает наибольшее значение (рис. 2). Зависимости, описываемые формулой (1), соответствуют прыжковому механизму электропроводности с переменной длиной прыжка носителей заряда. Учитывая, что при различных толщинах образцов были получены одинаковые значения m, можно предположить, что в электропроводности участвуют только тонкие приповерхностные слои оксида графена.

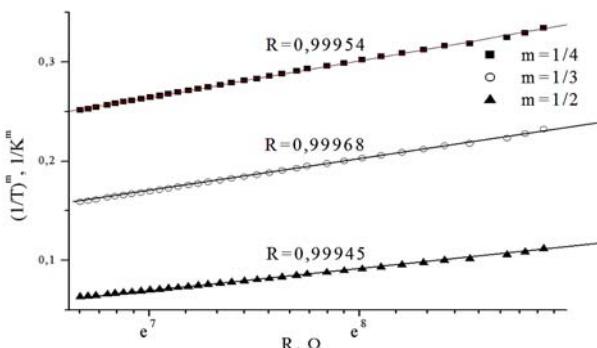


Рис. 2. Зависимости сопротивления образца OG-4 от  $(1/T)^m$  для трех значений  $m$  ( $R$  – коэффициент линейности)

Оценку длины прыжка между локализованными состояниями можно провести с помощью формулы [4]:

$$R(T) = \frac{L_D}{3} \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Характеристическая температура определяется с помощью выражения [4]:

$$T_0 = \frac{13,8}{k_B N(E_F) L_D^2}, \quad (3)$$

где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $N(E_F)$  – плотность состояний в окрестности уровня Ферми. Плотность состояний в работе определена по методике, приведенной в работе [5]. С учетом толщины образцов значение  $N(E_F)$  составило  $(1\text{--}4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{эВ}^{-1}$ . Путем подстановки (3) в формулу (2) определена длина прыжка, которая составила 15–16 нм при  $T = 100 \text{ К}$  и 20–22 нм при  $T = 200 \text{ К}$ . Радиус локализованных состояний составляет примерно 3–4 нм.

#### Список литературы

1. Alexandrov G.N., Smagulova S.A., Kapitonov A.N., Vasil'eva F.D., Kurkina I.I., Vinokurov P.V., Timofeev V.B., Antonova I.V. Nanotechnologies in Russia. – 2014. – V. 9. – №.7–8. – P. 363–368.
2. X. D'iez-Betriu, S. Alvarez-García, C. Botas, P. Alvarez, J. Sánchez-Marcos, C. Prieto, R. Menéndez, and A. de Andrés. J. Mater. Chem. C, 1, 6905 (2013).
3. M.M. Lucchese, F. Staval, E.H. Ferreira, C. Vilani, M.V.O. Moutinho, R.B. Capaz, C.A. Achete, A. Jorio. Carbon, 48, 1592 (2010).
4. Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. – М.: Наука, 416 (1979).
5. W.Y. Jang, N.N. Kulkarni, C.K. Shih, Z. Yao. Appl. Phys. Lett. 84, 1177 (2004).

*Васильева Федора Дмитриевича*  
инженер лаборатории «Графеновые нанотехнологии»  
*Капитонов Альберт Николаевич*  
канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник  
*Катанова Анна Гаврильевна*  
стажер-исследователь  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## ПОЛУЧЕНИЕ ГРАФЕНОВЫХ ЧЕШУЕК ПУТЕМ РАССЛОЕНИЯ ГРАФИТА БЛЕНДЕРОМ

*Аннотация:* в данной работе авторами использован метод получения графеновых чешуек с помощью турбулентного сдвига, создаваемого в жидкой среде с помощью кухонного блендера.

**Ключевые слова:** графен, блендер, раман-спектр.

Графен – двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом, находящихся в  $sp^2$ -гибридизации и соединённых посредством  $\sigma$ - и  $\pi$ - связей в гексагональную двумерную кристаллическую решётку. Его можно представить как одну плоскость графита, отдалённую от объёмного кристалла.

В последние годы синтез и свойства графена стали одной из самых широко обсуждаемых и быстро развивающихся тем в химии и физике. Повышенный интерес к новому материалу связан с рядом его уникальных свойств: электронных, оптических, механических и др.

Методы получения графена можно подразделить на несколько групп:

1. Механическое отщепление слоев графена от высокоориентированного пиролитического графита (скотч- метод).
2. Выращивание на подложке (химическое осаждение из газовой фазы с разложением углеводородов на поверхности металлов и карбидов металлов, термическое разложение SiC, процессы, включающие нагревание графитовых электродов в электрической дуге в водороде).
3. Органический синтез.
4. Химический метод с использованием коллоидных дисперсий на основе соединений, содержащих графеновые слои.
5. Механическое расщепление графита с помощью ультразвука.
6. Расслоение графита с помощью турбулентного сдвига.

В качестве растворителей были использованы: водный раствор ПАВ (моющее средство «Фейри») и дистиллированная вода.

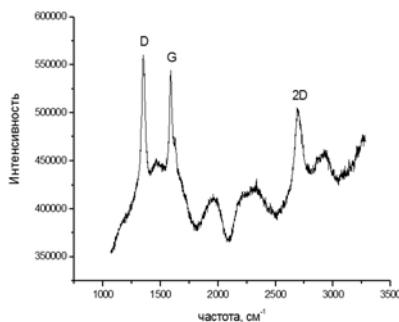
Условия расслоения графеновых чешуек в ПАВ соответствуют описанным в работе [1]. ПАВ разбавили водой в соотношении 1:10, соответственно. В полученный раствор объемом 200 мл добавили 10 г природного графита фирмы Aldrich (США). В начале, был использован ручной блендер с двумя ножами фирмы Supra (Китай) (рис. 1 а.). Данный блендер работает без перерыва в течение 2 минут, общее время работы блендера составило около 80 минут. Полученную суспензию графеновых чешуек в растворе ПАВ исследовали методом комбинационного рассеяния спектров.

В случае использования в качестве растворителя воды применяли автоматический настольный блендер фирмы BORK (Китай) с шестью ножами (рис. 2 а.). В воду объемом 200 мл добавили 10 г природного графита фирмы

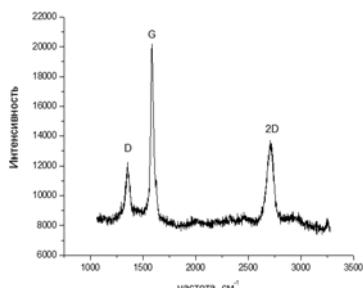
Aldrich (США). Общая продолжительность работы блендера составила 30 минут при скорости 10000 об/мин. Полученную суспензию графеновых чешуек в воде исследовали методом комбинационного рассеяния спектров.



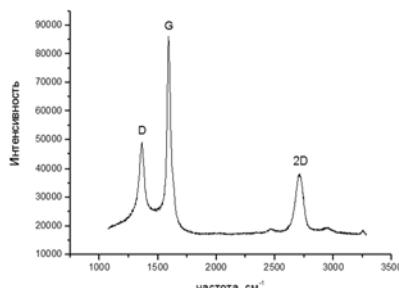
а



б



в



г

Рис. 1. а – вид ножа ручного блендера. Раман – спектр графеновых чешуек в растворе ПАВ, б – до центрифугирования, в. – после центрифугирования при скорости 3000 об/мин в течение 3 минут, г – после нагревания на кремниевой пластине при 600°C в вакууме в течение 1 часа

Анализ спектров комбинационного рассеяния образцов графена (рис. 1 б, в, г, рис. 2 б) позволил выявить наличие линий КРС: пик D около 1360 см<sup>-1</sup> – характерный для полносимметричного валентного колебания sp<sup>2</sup> связанных атомов в кольцах, пик G около 1575 см<sup>-1</sup> – характерный при валентном колебании связи sp<sup>2</sup> связанных атомов в цепочках и кольцах и 2D – линии около 2730 см<sup>-1</sup>, характерного для графена с высокой степенью порядка [24].

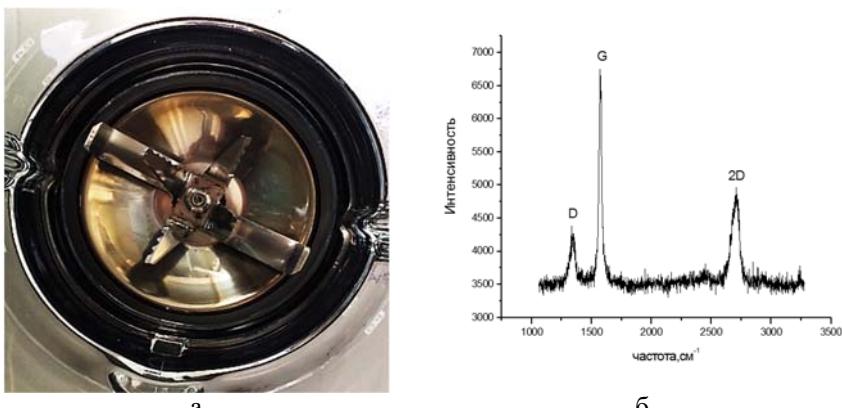


Рис. 2. а – вид ножа автоматического настольного блендера;  
б – Раман – спектр графеновых чешуек полученных в воде на кремнии

Наличие интенсивной и узкой линии  $1575\text{ см}^{-1}$  говорит о том, что подавляющая часть углеродных атомов находится в  $\text{sp}^2$ -состоянии и образует хорошо сформированные плоские структуры.

Таким образом, из рис. 1, 2 следует, что с помощью турбулентного сдвига создаваемого блендером в водном растворе ПАВ и в воде можно получать достаточно тонкие чешуйки графена.

#### *Список литературы*

1. Varrla E., Paton K.R., Backes C., Harvey A., Smith R.J., McCauley J., Coleman J.N. Turbulence-assisted shear exfoliation of graphene using household detergent and a kitchen blender // Nanoscale. – 2014. – V.6. – P. 11810-11819.

**Бинокуров Павел Васильевич**  
научный сотрудник лаборатории  
«Графеновые нанотехнологии»  
**Яковлева Римма Максимовна**  
студентка 4 курса  
Физико-технический институт  
СВФУ им. М.К. Аммосова  
г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ГРАФЕНА, ВОССТАНОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Аннотация:** оксид графена является одним из модификаций графена с уникальными свойствами. В данной работе был рассмотрен метод восстановления оксида графена с помощью метода LightScribe. Пленки были получены на прозрачных и гибких полиэстеровых подложках. Была исследована поверхность и состав полученных структур, также были сняты вольт-амперные характеристики.

**Ключевые слова:** оксид графена, лазерное восстановление, проводимость, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия.

Оксид графена (ОГ) является гибким материалом для создания различных структур благодаря своим уникальным свойствам [1; 2]. ОГ более удобен для

нанесения на разные подложки, чем графен и мультиграфен. Большой проблемой оксида графена является его диэлектрические свойства и нестабильность. Другим подходом для получения материалов на основе графена является восстановление оксида графена. Восстановленные пленки оксида графена проявляют гибкость и хорошую проводимость и могут быть использованы в качестве электродов для суперконденсаторов и элементов чувствительных сенсоров [3; 4]. Существует различные способы восстановления оксида графена, например, термическая обработка, фотовосстановление, функционализация различными газами и т.д. Одним из методов фотовосстановления оксида графена, является использование лазерного излучения [5].

В данной работе были исследованы оксид графеновые пленки. Образцы были подготовлены нанесением ОГ супензии на прозрачную подложку для лазерных принтеров, а затем высушены при комнатной температуре. ОГ супензия была получена из графитового порошка с помощью метода Хаммерса. Полученные пленки были обработаны в DVD проигрывателе с функцией LightScribe, которая позволяла восстанавливать выбранные регионы. Технология LightScribe была разработана компанией Hewlett-Packard и Lite-On в 2005 году. Процесс восстановления занимал примерно 30 минут.

Электрические характеристики были измерены с помощью автоматической системы электрофизических измерений (ASEC-03). Изменение рельефа и структуры до и после обработки лазерным лучом были исследованы с помощью атомно-силового микроскопа (Solver NEXT) и метода комбинационного рассеяния света (NTegra Spectra), соответственно. Также использовался сканирующий электронный микроскоп (JEOL JSM-7800F).

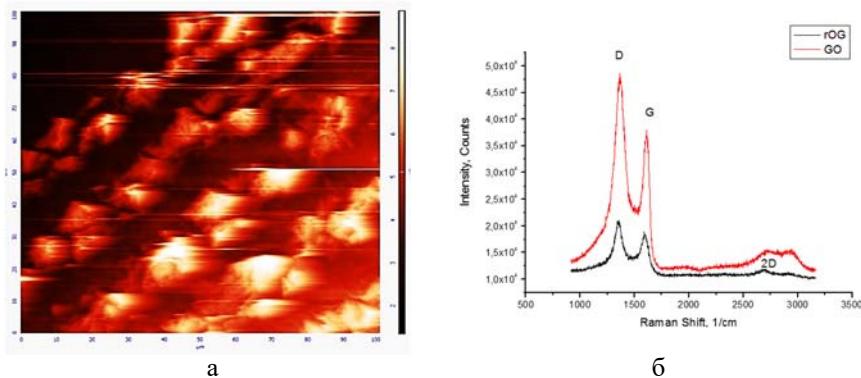


Рис. 1. АСМ изображения ОГ после облучения (а), спектры комбинационного рассеяния света для ОГ и вОГ (б)

Исследование поверхности обработанной пленки на атомно-силовом микроскопе демонстрирует изменения топографии пленки (рис. 1 а). Видно, что после восстановления оксид графена расширяется в местах, где прошел луч. Существует корреляция между толщиной ОГ пленки и характером его восстановления, так, более толстые пленки подвержены большей степени восстановления. После восстановления пленка меняет свой свет от светло-коричневого цвета до черного цвета. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (рис. 1 б) после восстановления дает увеличение 2D пика. Это может быть связано с формированием мультиграфена после восстановления лазерным лучом.

Электрические свойства пленок вОГ показывают уменьшение сопротивления. Пленки ОГ обладают почти диэлектрическим сопротивлением. Но после восстановления оно уменьшается до ~10 кОм. При измерении сопротивления

были использованы вольфрамовые зонды и на поверхность образцов не были посажены никакие металлы, это было сделано для того, чтобы избежать формирования потенциальных барьеров.

Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа также показали вспученные участки в ОГ пленки после обработки. Элементный анализ показал уменьшение содержания кислорода в процентном соотношении от 60 до 7%.

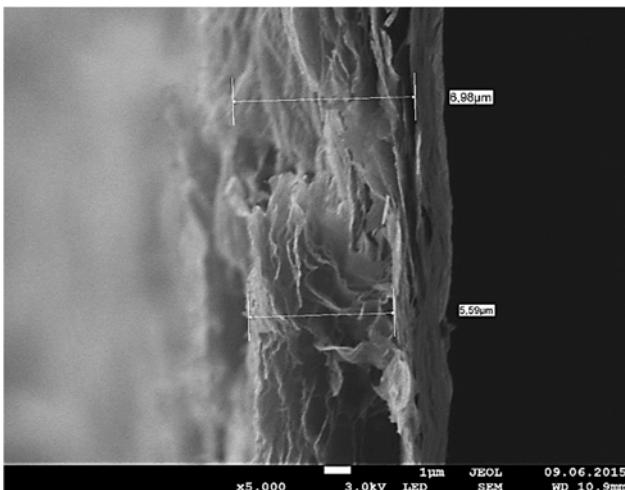


Рис. 2. СЭМ изображение восстановленного оксида графена (разрез)

А также были сняты изображения торцевой части пленки на сканирующем электронном микроскопе. Данные изображения показали расширение пленки ОГ с размерами до 8 мкм. На рисунке 2 четко видно, что слои ОГ при восстановлении отдаляются друг от друга, что, скорее всего, связано с уходом кислорода.

Таким образом, в результате проделанной работы были получены области с разным сопротивлением на одной пленке. Показано, что новый подход восстановления пленок оксида графена с помощью технологии LightScribe может применяться при создании структур на основе в ОГ. Полученные данные показывают восстановление ОГ, формирование областей с мультислойным графеном и увеличение проводимости на несколько порядков.

#### *Список литературы*

1. Becerril H.A., Mao J., Liu Z., Stoltzberg R.M., Bao Z., and Chen Y. Evaluation of Solution-Processed Reduced Graphene Oxide Films as Transparent Conductors // ACS Nano – 2008. – 2 (3). – C. 463–470.
2. Zhang Y-L., Guo L., Xia H., Chen Q-D., Feng J., Sun H-B. Photoreduction of Graphene Oxides: Methods, Properties, and Applications // Advanced Optical Materials – 2014. – 2 (1). – C. 10–28.
3. Tian H., Yang Y., Xie D., Cui Y-L., Mi W-T., Zhang Y., and Ren T-L. Wafer-Scale Integration of Graphene-based Electronic, Optoelectronic and Electroacoustic Devices // Scientific Reports. – 2014. – 4. – №3598.
4. Beidaghi M., Gogotsi Y. Capacitive energy storage in micro-scale devices: recent advances in design and fabrication of micro-supercapacitors // Energy Environ. Sci. – 2013. – 7. – 867.
5. El-Kady F. M., Strong V., Dubin S., Kaner B. R. Laser Scribing of High-Performance and Flexible Graphene-Based Electrochemical Capacitors // Science. – 2012. – 355. – 1326.

**Матаннанов Павел Павлович**

студент 5 курса

**Антонов Степан Романович**

канд. физ.-мат. наук,

ведущий научный сотрудник

Физико-технический институт

СВФУ им. М.К. Аммосова

г. Якутск, Республика Саха (Якутия)

## СОЗДАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА CVD-48

**Аннотация:** в статье проверяется возможность создания транзисторной структуры на основе графена CVD-48 и описывается ее создание. Для этого измерили спектр комбинационного рассеивания света графена, сопротивление графенового канала и ток сток-исток при изменении нижне затворного напряжения.

**Ключевые слова:** графен, CVD, транзистор на основе графена, фотолитография, ионно-лучевое травление (ИЛТ).

В работе была создана транзисторная структура на основе графена CVD-48. Изготовление транзисторной структуры разделена на четыре этапа: 1. создание нижнего затвора. 2. перенос графена большой площади. 3. формирование графенового канала. 4. создание контактов сток и исток.

Для создания нижнего затвора был вытравлен нижний слой оксида кремния с помощью плавиковой кислоты (10%). Перенос графена CVD-48 на кремниевую подложку с окислом проводился с помощью позитивного фоторезиста, по разработанной методике. Но перед этим для улучшения адгезии графена с поверхностью подложки, тщательно очистили кремниевую подложку. Далее формировали графеновый канал методом ионно-лучевого травления через защитную фотомаску. Первым этапом создания контактов было нанесение защитной пленки для проведения взрывной литографии [1]. Нижним слоем или так называемым адгезионным слоем являлся титан, верхним золото. Далее сделали контакты нижнего затвора из сплава индия-олово при помощи пайки.

После создания структуры полевого графенового транзистора были проведены измерения физических характеристик созданной структуры. Первым измерили спектры комбинационного рассеяния света (КРС) поверхности графена до переноса и после переноса (рис. 1).

На спектре КРС до переноса (рис. 1 а) из-за шумов мало, что можно разобрать, но на частоте  $1598 \text{ см}^{-1}$  имеется подобие пика G. Поэтому можно сказать, что CVD-48 имеет углеродоподобную структуру [2]. На рисунке 1 б мы видим несколько хорошо различных пиков: пик D наблюдается на частоте  $1358 \text{ см}^{-1}$  с интенсивностью 22644, пик G на частоте  $1596 \text{ см}^{-1}$  с интенсивностью 60986 и пик 2D на частоте  $2704 \text{ см}^{-1}$  с интенсивностью 26215.

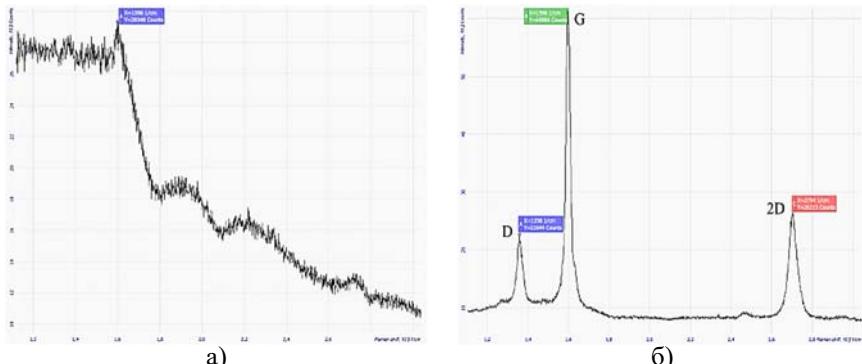


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния света поверхности графена CVD-48, по оси Y интенсивность в условных единицах, по оси X частота в  $\text{см}^{-1}$ . а) до переноса графена, б) после переноса графена на кремниевую подложку с окислом

Высота D пика существенна, тем самым показывает, что имеются дефекты на структуре графена. Из отношения интенсивностей 2D пика и D пика вытекает, что концентрации легирующей примеси в графене велика или графен имеет многослойную структуру [2; 3].

Измерение сопротивления графенового канала показала, что она имеет величину равную 70.524 кОм. Учитывая размеры канала слоевое сопротивление измеренного графенового канала равно  $R_s = 7.0524 \text{ кОм}/\square$ .

После измерили ток сток-исток при изменении нижне затворного напряжения, при постоянном напряжении сток–исток равном 100 мВ. Нижне затворное напряжение варьировалось от -35 вольт до +35 вольт. Минимальное значение тока стока-истока -450 мкА, максимальное 300 мкА. В значениях затворного напряжения от -10 В до +15 В ток сток-исток почти не менялся. Из рисунка 2 видно, что проводимость созданной структуры n-типа. Определить точку нейтральности нам не удалось, т.к. она находится за пределами проведенных измерений. По литературе она может находиться за пределами 200 вольт.

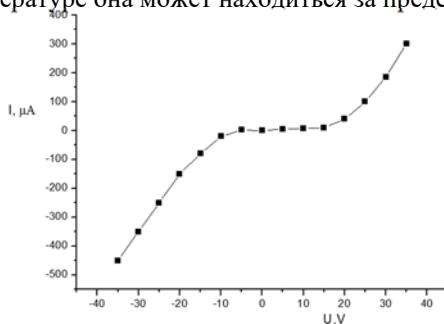


Рис. 2. Вольтамперная характеристика транзисторной структуры на основе графена

В заключении можно сказать, что создание транзисторной структуры на основе графена CVD-48, созданной в УНТЛ «Графеновые нанотехнологии»,

возможно, но требуется дальнейшее изучение. Проводимость созданной транзисторной структуры n-типа, это мы видим по графику вольтамперной характеристики. Определить точку нейтральности нам не удалось, т.к. она находится за пределами проведенных измерений. Одной из причин такой удаленности точки нейтральности может быть толщина полученного графена или графеновый канал возможно очень сильно n-легирован, многослойен и имеет большие структурные дефекты, что видно из измеренных спектров КРС.

***Список литературы***

1. Обращенная фотолитография // ФРАСТ-М. – 2013 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.frast.ru/obrlitograf.htm>.
2. Dresselhaus M.S., et al. Raman spectroscopy as a probe of graphene and carbon nanotubes. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering sciences. – 2008. – V. 366. – №1863. – P. 231–236.
3. Malard L.M., Pimenta M.A., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S. Raman spectroscopy in grapheme. Physics Reports. – 2009. – V. 473. – №5–6. – P. 51–87.

*Научное издание*

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ  
И МАТЕРИАЛЫ РАДИОФИЗИКИ**

Сборник материалов  
Всероссийской научной конференции  
молодых ученых, аспирантов и студентов,  
посвященной 120-летию дня изобретения радио  
Якутск, 19–20 мая 2015 г.

Редактор *А.М. Тимофеев*

Компьютерная верстка и правка *Н.А. Митрюхина*  
Дизайн обложки *А.В. Лаврентьева*.

Подписано в печать 05.02.2016 г. Формат 60×84/16  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times.  
Усл. печ. л. 3,72. Заказ К-73. Тираж 500 экз.  
Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс»  
428005, Чебоксары, Гражданская, 75  
8 800 775 09 02  
[info@interactive-plus.ru](mailto:info@interactive-plus.ru)  
[www.interactive-plus.ru](http://www.interactive-plus.ru)

Отпечатано в Студии печати «Максимум»  
428005, Чебоксары, Гражданская, 75  
+7 (8352) 655-047  
[info@maksimum21.ru](mailto:info@maksimum21.ru)  
[www.maksimum21.ru](http://www.maksimum21.ru)